

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique
Laboratoire de Commande des Processus



Département de Génie Electrique
Spécialité Automatique

MAGISTER en AUTOMATIQUE
Option : Commande et Conduite des Systèmes à Energie Electrique

MEMOIRE

Commande Prédictive Non Linéaire: Application au Palier Magnétique Actif (PMA)

Par
ATOUI Brahim

Soutenu le 01/07/2006

devant le jury:

Boucherit M. S.	Président.
Mahmoudi M. O.	Examineur.
Boukhetala D.	Examineur.
Nezli L.	Examineur.
Bali N.	Rapporteur.
Tadjine M.	Rapporteur.

Année Universitaire 2005/2006
Laboratoire de Commande des Processus

Dédicace

Je dédie ce Mémoire

A ma famille

Spécialement à ma mère qui m'a soutenu avec ses prières

A mon père qui n'a cessé de m'encourager et de me soutenir

A mes frères et soeurs

à Djazia qui partage ma vie

Remerciements

Je tiens à remercier M. Boucherit, Professeur à l'ENP qui m'a fait honneur de présider ce jury, et pour ses conseils et encouragements

Je remercie aussi M Tadjine Maître de conférence à l'ENP qui a accepté de diriger les travaux de ce Mémoire.

Je tiens aussi à exprimer vivement mes remerciements à M. Bali Nouredine Chargé de cours à l'USTHB qui ma beaucoup aidé.

Sans oublier d'adresser mes sincères remerciements à tous les membres du jury et les membres du département automatique et particulièrement ceux du Laboratoire Commande des Processus

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	6
CHAPITRE 1: LA COMMANDE PREDICTIVE GENERALISEE GPC	10
1.1. INTRODUCTION.....	11
1.2. LA COMMANDE GPC POUR UN SYSTEME SISO	11
1.2.1... <i>Approche algorithmique</i>	13
1.2.2... <i>Approche polynomiale</i>	16
1.3. CHOIX DES PARAMETRES GPC	18
1.4. LA COMMANDE GPC A DOUBLE MODELE DE REFERENCE (GPCDMR)	19
1.5. LA COMMANDE PREDICTIVE NON LINEAIRE.....	20
1.5.1... <i>La GPC associée à une commande adaptative</i>	20
1.5.2... <i>La GPC associée à une linéarisation exacte</i>	21
1.5.3... <i>La GPC associée à une commande Multi-contrôleurs</i>	21
1.6. CONCLUSION	22
CHAPITRE 2: LA COMMANDE MULTI-CONTROLEURS GPC (MGPC)	23
2.1. INTRODUCTION.....	24
2.2. METHODOLOGIE DE LA COMMANDE MULTI-CONTROLEURS	25
2.2. LA COMMANDE MULTI-CONTROLEURS GPC.....	26
2.3. STABILITE DE LA COMMANDE MULTI-CONTROLEURS GPC.....	27
2.4. CONCLUSION	28
CHAPITRE 3: PALIERS MAGNETIQUES ACTIFS (PMA)	29
3.1. INTRODUCTION.....	30
3.2. LES DIFFERENTS TYPES DE PALIER.....	30
3.2.1... <i>Le palier lisse</i>	30
3.2.2... <i>Le palier à roulement</i>	31
3.2.3... <i>Le Palier Magnétique Actif (PMA)</i>	32
3.2.4... <i>Caractéristiques du PMA</i>	33
3.3. DESCRIPTION DE LA PARTIE COMMANDE DES PMA.....	34
3.4. LES PALIERS AUXILIAIRES DU PMA.....	35
3.5. LIMITE ET CHAMPS D'APPLICATION DES PMA	35
3.6. EXPRESSION DE LA FORCE ELECTROMAGNETIQUE.....	37
3.7. LES DIFFERENTES METHODES DE COMMANDE DES PMA.....	39
3.7.1... <i>La commande par commutation</i>	39
3.7.2... <i>La commande par les courants de pré-magnétisation</i>	39

3.8. MODELISATION PMA A UN DEGRE DE LIBERTE (1-DDL).....	40
3.8.1... <i>Modèle non linéaire</i>	40
3.8.2... <i>Modèle linéaire</i>	41
3.9. MODELISATION PMA A DEUX DEGRES DE LIBERTE (2-DDL).....	43
3.9.1... <i>Modèle non linéaire</i> :.....	44
3.9.2... <i>Modèle linéaire</i> :.....	44
3.10. STABILITE DU PMA	45
3.11. EQUILIBRAGE DES ROTORS DESEQUILIBRES.....	45
3.12. CONCLUSION	46
CHAPITRE 4: APPLICATION DE LA GPC AU PMA	47
4.1. INTRODUCTION.....	48
4.2. DETERMINATION DU MODELE DISCRET DU PMA	48
4.2.1... <i>Exemple de dimensionnement d'un PMA</i>	49
4.2.2... <i>Réponse du système en boucle ouverte</i>	49
4.3. STABILISATION DU PMA A L'AIDE D'UN PI-AF	50
4.4. APPLICATION DE LA GPC DE BASE AU PMA.....	51
4.4.1... <i>Influences du changement des paramètres GPC</i>	51
4.4.2... <i>Influence de l'augmentation de la consigne</i>	53
4.5. APPLICATION DE LA GPCDMR AU PMA.....	54
4.6. APPLICATION DU MULTI-CONTROLEURS GPC AU PMA.....	55
4.7. COMPARAISON ENTRE LA GPC ET MGPC	55
4.8. REACTION DE LA MGPC AUX VARIATIONS PARAMETRIQUES.....	57
4.9. CONCLUSION:	57
CONCLUSION GENERALE	69
CONCLUSION	70
BIBLIOGRAPHIE	71

Introduction générale

Introduction Générale

La commande prédictive généralisée GPC est une commande qui a vu le jour avec la parution de la publication de Clarke et al. **[BIT-96]**. La commande GPC est applicable aux systèmes SISO et MIMO. L'antécédent de la commande GPC est bien la commande à variance minimale (MV), décrite par Åström cette commande repose sur le principe de minimisation d'un critère qui représente la variance de l'erreur entre la sortie et la consigne. Comme il est très bien connu cette technique de commande fonctionne très bien uniquement pour les systèmes à phase minimale, dans le cas des systèmes à phase non minimale le feedback a tendance à perdre sa stabilité. Afin de pallier à cette inconvénient une légère modification a été apporté au critère en faisant introduire l'énergie de la commande pondérée par un paramètre λ . La commande est connue sous le nom de Commande à Variance Minimale Généralisée (GMV), c'est une commande qui employait un horizon à un seul pas qui a rencontré aussi des échecs pour certains systèmes instables ou à phase non minimale et spécialement pour les systèmes à retard inconnu. Pour combler toute ces lacunes une autre extension a été faite par Clarke et al., en changeant le critère à minimiser, avec cette modification la commande est appelée la GPC. Le critère est constitué de la somme de l'énergie de l'erreur et de la commande pondérée sur un horizon fuyant situé dans le future, cette technique synthétise un vecteur d'incrément de la commande mais uniquement le premier terme qui est utilisé à chaque période d'échantillonnage **[BOU-96]** , **[BAL-96]**.

L'application de la commande prédictive est portée sur le palier magnétique actif. Cet organe fixe, supporte et guide l'arbre de transmission d'une machine tournante. Le palier est un équipement mécanique lié intimement aux machines tournantes. Il se trouve sur les supports rigides des arbres en rotation, c'est la partie la plus concernée par les frottements. Jusqu'à une certaine époque, il n'y avait aucun type de palier qui supprimait totalement les frottements, jusqu'au moment de l'arrivée des paliers magnétiques, qui se caractérisent particulièrement par des frottements pratiquement nuls **[HAB]**. Dans ce travail on étudiera la contribution des techniques de commande GPC dans l'asservissement des PMA notamment celle qui utilise plusieurs points de fonctionnement, en l'occurrence la commande Multi-contrôleurs **[PAG-01]**.

Le palier magnétique actif est constitué essentiellement de deux paires d'électroaimants arrangés dans la partie fixe du palier **[SCH]**, disposés à 90° l'une par rapport à l'autre. Dans la plus part du temps il est utilisé les matériaux ferromagnétiques, chaque paire d'électroaimants peut générer une force d'attraction, une dans le plan vertical et l'autre dans le plan horizontal. Les mouvements du rotor dans l'entrefer sont mesurés à l'aide des capteurs de position inductifs. Ces derniers envoient des signaux d'information sur le rotor et le correcteur en retour agit sur le courant de chaque électroaimant d'une manière à générer des forces nécessaires pour ramener le rotor à la position de consigne Dans

la littérature on trouve beaucoup de travaux qui font trait à l'asservissement des rotors lévité par de paliers magnétiques actifs on cite à titre indicatif [LÖW] , [RUS-95] et [FER].

Une des propriétés inhérentes au palier magnétique est la nature de rotation sans contact et sans frottement. Cette nature lui affère plusieurs avantages par rapport aux paliers conventionnels. L'élimination du lubrifiant, diminution des vibrations, la rotation à des très grandes vitesse avec des accélérations importantes, une bonne endurance, une très grande longévité tous ça a fait de lui un équipement très important. Mais l'utilisation de ces paliers dans l'industrie n'a pas été très large, vu la complexité du control de ce type de paliers. Ce n'est que récemment qu'on s'est penché à l'emploi des PMA dans l'industrie lourde, comme dans la conception des turbines à gaz et les réacteurs des avions [SCH] et [HAB].

Afin de pouvoir mettre en application la commande GPC pour asservir le PMA il va falloir déterminer la relation entre ces grandeurs d'entrée et ces grandeurs de sortie. L'ensemble de ces expressions constituent le modèle du système considéré et résultat de la modélisation le palier magnétique actif. Nous présenterons une modélisation du PMA à un degré de liberté pour mettre en évidence l'expression de la force générée par le champ magnétique des électroaimants [DEB-04]. Nous verrons par la suite le modèle d'un PMA à deux degrés de liberté, une dans la direction verticale et l'autre dans la direction horizontale. Le modèle est donné sous forme d'équation d'état et en fonction de transfert [RUS-95].

Le principe de lévitation dans le PMA repose principalement sur le principe de la force magnétique générée dans un champ magnétique. Ce champ magnétique est généré par un courant qui traverse une bobine ou par un aimant permanent. Le matériau utilisé dans la fabrication du palier est généralement un ferromagnétique. Le matériau ferromagnétique exposé à un champ inducteur généré par un aimant ou un électroaimant, crée un champ magnétique orienté dans la même direction du champ inducteur ce qui provoque une force d'attraction entre le matériau et l'électroaimant. En revanche, le matériau diamagnétique crée un champ opposé au champ inducteur ce qui provoque des forces de propulsion [PON-96].

La commande des PMA est classée en deux types. Il y a celle qui utilise des courants de pré-magnétisation et celle qui utilise le principe de commutation entre les électroaimants de la même paire [PON-96]. Chaque commande présente des avantages et des inconvénients, la première a tendance à générer des pertes sous formes d'échauffement inutile du palier en régime établi. La deuxième est une commande en commutation ce qui provoque des discontinuités dans la commande et peut mener à des lois de commande rudes.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres. Dans le chapitre I, nous considérons la commande prédictive généralisée avec ces deux approches algorithmique et polynomiale. Nous développerons les expressions de la commande optimale vis-à-vis d'une minimisation d'un critère qui porte sur

l'énergie de l'erreur et de l'incrémentation de la commande avec une certaine pondération. Les avantages et inconvénients de chaque approche sont exposés. Une approche améliorée de la GPC est présentée c'est la commande GPC à double modèle de référence, cette technique est un cas particulier de la commande GPC Etendue où on peut offrir plus de degré de liberté pour imposer l'allure de la sortie du système ce qui n'est pas toujours facile avec la commande GPC de base.

Dans le chapitre II, La commande Multi-contrôleurs est présentée et plus particulièrement la commande Multi-contrôleurs GPC qui repose sur l'utilisation de la commutation entre plusieurs régulateurs GPC en approche polynomiale sous forme de polynômes RST locaux. Nous présenterons la structure des régulateurs locaux qui prennent en considération les points de fonctionnement, ainsi que la structure de la commande globale avec son superviseur et son commutateur.

Le chapitre III porte sur la description exhaustive des PMA, commençant par la partie mécanique magnétique et allant jusqu'à la méthode de mesure du déplacement du rotor dans le palier et l'électronique puissance de commande. Les principales caractéristiques du PMA sont énumérées ainsi que leur principaux champ d'application. Nous avons consacré une partie pour la détermination des expressions reliant les entrées aux sorties afin de déterminer le modèle du PMA qui représente le comportement réel du système considéré. Plusieurs techniques de commande de PMA existent, que ce soit en type d'alimentation du PMA, en tension ou en courant, ou nature de la commande, continue ou à commutation. Finalement on aboutira à un modèle non linéaire du PMA. La non linéarité est introduite par l'expression de la force générée par les électroaimants.

Le dernier chapitre est consacré à la mise en application des différentes techniques prédictives moyennant la simulation. Nous effectuerons plusieurs essais de simulation afin de comparer les différentes techniques et voir l'apport de chacune et voir l'influence des variations paramétrique du PMA sur ces techniques.

Chapitre 1:

La commande prédictive généralisée GPC

1.1. Introduction

La commande numérique des systèmes se voit en prospérité de jour en jour. Avec tous ce qui apporte la technologie informatique, de vitesse d'exécution, temps d'accès et capacité de stockage. En réalité la théorie de la commande numérique existait depuis bien longtemps, mais elle resté gelée jusqu'au moment où le microprocesseur a envahi l'industrie.

De ces techniques de commandes numériques il existe celles qui utilisent un effet anticipatif qui repose sur la prédiction. Le recours à ces techniques de commande prédictive était pour résoudre le problème de retard dans les réponses des systèmes qui criait un problème de divergence avec la régulation classique à actions pures type PID et autre. Le problème de retard à était résolu par l'utilisation de la commande à variance minimale décrite par Aström. Cette commande repose sur la minimisation d'un critère qui représente la variance de l'erreur entre la sortie et la consigne. Comme il est très bien connu cette technique de commande fonctionne très bien uniquement pour les systèmes à phase minimale, dans certain cas de systèmes à phase non minimale le feedback a tendance à perdre sa stabilité. Afin de pallier à cette inconvénient une légère modification a été apporté au critère en faisant introduire l'énergie de la commande pondérée par un paramètre λ . La commande est connue sous le nom de Commande à Variance Minimale Généralisée (GMV), c'est une commande qui employait un horizon à un seul pas qui a rencontré aussi des échecs pour certains systèmes instables ou à phase non minimale et spécialement pour les systèmes à retard inconnu. Une autre extension a été faite par Clarke et al., en changeant le critère à minimiser, avec cette modification la commande est appelée la GPC. Le critère est constitué de la somme de l'énergie de l'erreur et de la commande pondérée sur un horizon fuyant situé dans le future, cette technique synthétise un vecteur d'incrémentations de la commande mais uniquement le premier terme qui est utilisé.

Comme toute loi de commande GPC a deux principaux objectifs; le premier est de stabiliser le système à commander, le deuxième conférer au système des dynamiques qui ne possédait pas auparavant. Mais la GPC se distingue par l'effet anticipatif qui vise à minimiser l'erreur sur un horizon qui se trouve au future, c'est-à-dire la commande prédictive agit avant le changement de la consigne ou avant l'effet de la perturbation si nous possédons des prévisions sur la dite perturbation. La GPC permet l'exploitation de toutes ces informations, ce qui permet l'amélioration considérable des performances du système en boucle fermée.

1.2. La commande GPC pour un système SISO

La première chose à devoir imposer est de supposer que la modélisation du système est représentée sous forme de modèle ARIMAX (Auto-Regressive Integrated Moving-Average eXogenous input) donnée par l'expression suivante:

$$A(q^{-1})y_t = B(q^{-1})u_{t-1} + \frac{C(q^{-1})}{\Delta} \xi_t \quad (1-1)$$

Où : u_t , y_t et ξ_t sont respectivement signal d'entrée, signal de sortie et signal de perturbation à l'instant t . Et A, B et C sont les polynômes de l'opérateur de retard unité q^{-1} , avec A et C premier.

Le rôle de l'opérateur Δ est d'assurer la présence d'une action intégrale dans le régulateur afin d'éliminer les erreurs statiques. Le signal de perturbation ξ_t peut être stochastique ou déterministe

Le modèle donné par l'expression ci-dessus peut être réécrit sous forme d'un modèle CARIMA (Controlled AutoRegressive Integrated Moving Average) de la façon suivante:

$$A(q^{-1})\Delta y_t = B(q^{-1})\Delta u_{t-1} + C(q^{-1})\xi_t \quad (1-2)$$

avec:

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_nq^{-n}$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_mq^{-m}$$

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_{nc}q^{-nc}$$

na=Degré de polynôme ($A(q^{-1})$)

nb=Degré de polynôme ($B(q^{-1})$)

$$\Delta(q^{-1}) = 1 - q^{-1}$$

Ce modèle va servir à la détermination du prédicteur optimal de la sortie du système dans le future. D'une façon générale ce prédicteur est très important dans la méthodologie des commandes prédictives.

La fonction coût que la commande GPC vise à minimiser est la suivante:

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_2} (\hat{y}_{t+j} - r_{t+j})^2 + \lambda \sum_{j=1}^{N_u} (\Delta u_{t+j-1})^2 \quad (1-3)$$

On admet que $\Delta u_{t+j} = 0$, $j = Nu, \dots, N2$

Où : N_1 , N_2 , N_u et λ sont les paramètres de la GPC, tel que N_1 La borne minimale de l'horizon future. N_2 est la borne supérieur de l'horizon future. N_u est l'horizon de la commande. y_t est la sortie du modèle à l'instant t . r_t est la consigne qu'on veut que le système la poursuit.

1.2.1. Approche algorithmique

Dans cette approche la commande est calculée à chaque période d'une manière à minimiser un critère appelé aussi fonction coût qu'on va présenter plus loin. Cette approche est caractérisée par le fait qu'on cherche pas à trouver une relation linéaire entre la commande et les autres variables du système (consigne, sortie et perturbation), par conséquent, nous n'avons pas besoin de recourir aux méthodes de résolution des équations de Diophantine.

L'algorithme de cette approche est constitué de deux parties essentielles. Une partie où beaucoup de calculs se fait en offline, cette partie consiste à déterminer la matrice G d'une dimension qui dépend de ($N1$, $N2$ et Nu) et le calcul de l'inverse de la matrice $[G^T \cdot G + \lambda \cdot I]$. La deuxième partie consiste à calculer en online la commande en commençant par la détermination du vecteur des valeurs prédites de la sortie sur un horizon dans le futur.

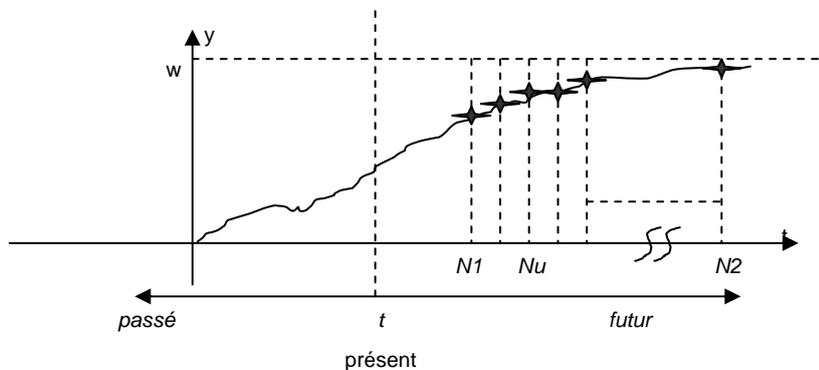


Figure: 1.1 Présentation de l'horizon de prédiction

a) Prédicteur optimal:

C'est la partie la plus importante de la commande prédictive, car il va servir à prévoir le comportement du processus dans le futur.

$$\hat{y}(t+j) = \sum_{i=1}^j g_i \Delta u(t+j-i) + \rho_j \quad (1-4)$$

$$\rho_j = \sum_{i=j+1}^{\infty} g_i \Delta u(t+j-i) \quad (1-5)$$

$\hat{y}(t+j)$ représente la réponse forcée et correspond aux incréments de commandes futures et présente. les ρ_j représentent la réponse libre et sont dus au incréments de commandes passées, les g_i sont les coefficients de la réponse indicelle du système définis par $g_i = s_1(iT_e)$ et s_1 la réponse indicelle du système continu.

On note par $y^*(t+j)$ la réponse libre (entrée nulle) à partir des conditions initiales à l'instant t , on peut écrire en fonction des incréments de la commandes passées:

$$\rho_j = y^*(t+j) = \sum_{i=0}^{\infty} g_i \Delta u^*(t+j-i)$$

avec : $\Delta u^*(t+j-i) \equiv 0$ pour $i \leq j$

On peut écrire finalement la relation récurrente liant les ρ_j :

$$\rho_j = \rho_{j-1} + \Delta y^*(t+j)$$

tel que les incréments $\Delta y^*(t+j)$ sont obtenus du modèle :

$$A(q^{-1})\Delta y^*(t+j) = B(q^{-1})\Delta u^*(t+j-1) \text{ tel que : } \Delta u^*(t+j) \equiv 0 \text{ pour } j \geq 0$$

Grâce à ces résultats, il est possible de calculer l'estimée de la sortie sur l'horizon futur de façon récurrente sans avoir à recourir à la résolution des équations diophantines.

On peut récrire les résultats précédents sous forme matricielle. Posant alors:

$$\hat{y}_N = [\hat{y}(t+1) \cdots \hat{y}(t+N)]^T \text{ sorties futures, estimées}$$

$$\tilde{u}_N = [\Delta u(t) \cdots \Delta u(t+N-1)]^T \text{ incréments des commandes futures}$$

$$\rho_N = [\rho_1 \cdots \rho_N]^T$$

alors on peut écrire l'équation de prédiction matricielle comme suit:

$$\hat{y}_N = G_N \tilde{u}_N + \rho_N \quad (1-6)$$

avec:

$$G_N = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ g_2 & g_1 & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ g_{N-1} & g_{N-2} & g_{N-3} & \cdots & 0 \\ g_N & g_{N-1} & g_{N-2} & \cdots & g_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ s_{12} & s_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ s_{1N-1} & s_{1N-2} & s_{1N-3} & \cdots & 0 \\ s_{1N} & s_{1N-1} & s_{1N-2} & \cdots & s_{11} \end{bmatrix}$$

Les termes de la matrice G_N peuvent être obtenus directement d'une identification du système. Ce que veut dire qu'on a pas besoin d'avoir une structure de modèle bien déterminée, C'est directement la réponse indicielle du système sur un intervalle de temps de $N \cdot T_e$.

b) Expression du critère

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_2} [w(t+j) - \hat{y}(t+j)]^2 + \lambda \sum_{j=1}^{N_u} \Delta u(t+j-1)^2 \quad (1-7)$$

On supposant que:

$$\Delta u(t+j) = 0 \text{ pour } j \geq N_u$$

Le critère est composé de deux termes. Le premier terme représente l'énergie de l'erreur entre la consigne et la sortie prédite du système, sur un horizon dans le futur, de longueur égale à $N_2 - N_1$.

Le deuxième terme représente l'énergie de l'incrément de la commande sur un horizon futur de longueur égale à N_u , cette énergie est pondérée avec le paramètre λ .

c) Expression du critère sous forme matricielle

$$J = (\mathbf{G} \cdot \tilde{\mathbf{u}} + \boldsymbol{\rho} - \mathbf{w})^T \cdot (\mathbf{G} \cdot \tilde{\mathbf{u}} + \boldsymbol{\rho} - \mathbf{w}) + \lambda \cdot \tilde{\mathbf{u}}^T \cdot \tilde{\mathbf{u}} \quad (\mathbf{1-8})$$

avec:

$$\mathbf{w} = [w(t+N_1) \cdots w(t+N_2)]^T$$

$$\hat{\mathbf{y}} = [y(t+N_1) \cdots y(t+N_2)]^T$$

$$\tilde{\mathbf{u}} = [\Delta u(t) \cdots \Delta u(t+N_u-1)]^T$$

$$\boldsymbol{\rho} = [\rho_{N_1} \cdots \rho_{N_2}]^T$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} s_{1N_1} & s_{1N_1-1} & s_{1N_1-2} & \cdots & \cdots \\ s_{1N_1+1} & s_{1N_1} & s_{1N_1-1} & \cdots & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \cdots \\ s_{1N_2} & s_{1N_2-1} & s_{1N_2-2} & \cdots & s_{1N_2-N_u+1} \end{bmatrix}; \text{ de dimension } (N_2 - N_1 + 1) \times N_u$$

d) Détermination de la commande optimale

En développant l'expression matricielle du critère, donnée par l'équation on obtient:

$$J = \tilde{\mathbf{u}}^T \cdot [\mathbf{G}^T \cdot \mathbf{G} + \lambda \cdot \mathbf{I}_{N_u}] \cdot \tilde{\mathbf{u}} + \tilde{\mathbf{u}}^T \cdot \mathbf{G}^T (\boldsymbol{\rho} - \mathbf{w}) + (\boldsymbol{\rho} - \mathbf{w})^T \cdot \mathbf{G} \cdot \tilde{\mathbf{u}} + (\boldsymbol{\rho} - \mathbf{w})^T \cdot (\boldsymbol{\rho} - \mathbf{w})$$

$$\frac{\partial J}{\partial \tilde{\mathbf{u}}} = 2 \cdot [\mathbf{G}^T \cdot \mathbf{G} + \lambda \cdot \mathbf{I}_{N_u}] \cdot \tilde{\mathbf{u}} + 2 \cdot \mathbf{G}^T (\boldsymbol{\rho} - \mathbf{w}) \equiv 0$$

soit la commande optimale:

$$\tilde{\mathbf{u}}_{\text{opt}} = [\mathbf{G}^T \cdot \mathbf{G} + \lambda \cdot \mathbf{I}_{N_u}]^{-1} \cdot \mathbf{G}^T \cdot (\mathbf{w} - \boldsymbol{\rho}) \quad (\mathbf{1-9})$$

Malgré que le vecteur de commande est de dimension, on n'utilise que le premier terme du vecteur pour commander le système, alors il suffit de calculer le premier terme comme suit.

$$u(t) = u(t-1) + m_1 \cdot (\mathbf{w} - \boldsymbol{\rho}) \quad (\mathbf{1-10})$$

avec:

$$M = [G^T \cdot G + \lambda \cdot I_{N_u}]^{-1} \cdot G^T = \begin{bmatrix} m_1 \\ \vdots \\ m_{N_u} \end{bmatrix}$$

Cet algorithme est considéré comme rapide, il trouve son utilisation dans beaucoup d'applications notamment dans le cas des systèmes à constantes de temps très faibles. Néanmoins cette approche possède certains inconvénients. Un de ces inconvénients est l'inexistence d'une théorie claire permettant d'étudier la stabilité du système en BF. De plus il n'y a pas de relation exacte entre la dynamique conférée au système en boucle fermée et les paramètres de la GPC.

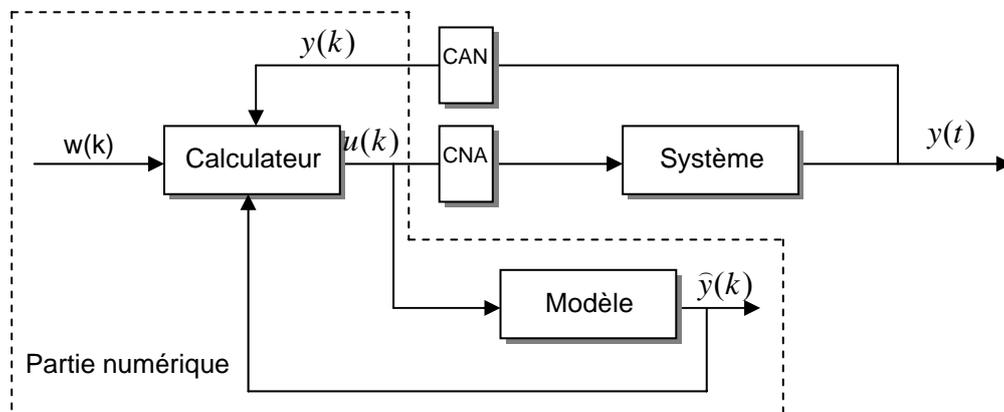


Figure 1.2 Structure de l'approche algorithmique

1.2.2. Approche polynomiale

Dans cette approche on garde le même principe sauf qu'il est établi une relation linéaire pour la commande en fonction des variables du système. Une structure est imposée pour le régulateur conformément au schéma indiqué ci-après. Les paramètres de ce régulateur sont déterminés en résolvant les équations Diophantines pour faire correspondre la commande du régulateur polynomial au régulateur GPC. Cette approche est caractérisée par la détermination des trois polynômes R, S et T représenté le schéma ci-dessous. Elle est appelée conventionnellement la commande RST. Le polynôme T est non causal, c'est une propriété inhérente à la commande prédictive, et c'est ce polynôme qui fait que ce régulateur est anticipatif.

Cette approche permet finalement l'utilisation de toutes les techniques d'analyse fréquentielle et temporelle discret connues dans le domaine de synthèse des régulateurs pour les systèmes linéaires ou linéarisés autour d'un point de fonctionnement.

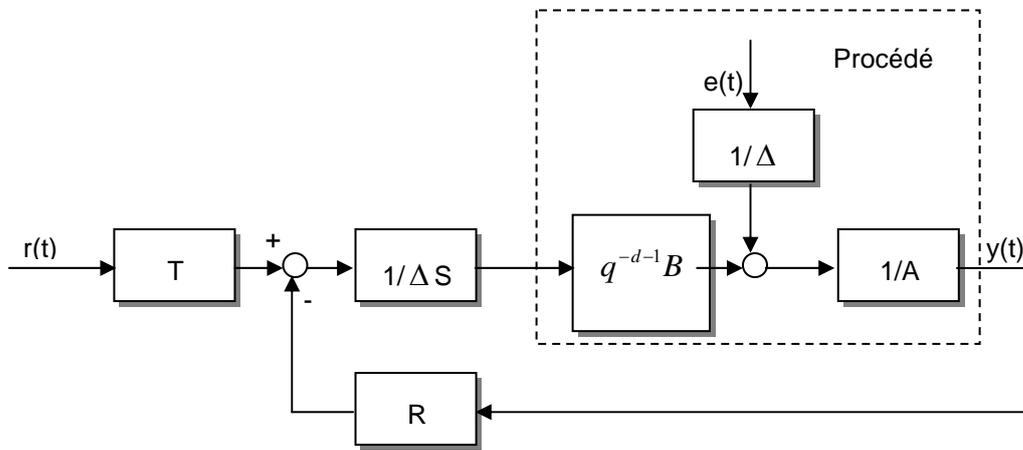


Figure 1.3 Structure de l'approche polynomiale de la commande GPC (RST):

L'expression du modèle est donnée comme suit:

$$y(t + j) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} \cdot u(t + j - d - 1) + \frac{1}{A(q^{-1})\Delta(q^{-1})} \cdot e(t + j) \quad (1-11)$$

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_{n_a}q^{-n_a}$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_{n_b}q^{-n_b}$$

$$\Delta(q^{-1}) = 1 - q^{-1}$$

Afin de pouvoir déterminer l'expression de la commande nous devons tous d'abord écrire le prédicteur optimal sous forme polynomiale en faisant apparaître la réponse libre et forcée de la façon suivante:

$$y(t + j) = \underbrace{F_j(q^{-1})y(t)}_{\text{réponse libre}} + \underbrace{H_j(q^{-1})\Delta u(t-1) + G_j(q^{-1})\Delta u(t + j - 1) + J_j(q^{-1})\xi(t + j)}_{\text{réponse forcée}} \quad (1-12)$$

La loi de commande de la structure représentée par la fig. 1.3 est donnée par l'expression suivante:

$$S(q^{-1})\Delta(q^{-1})u(t) + R(q^{-1})y(t) = T(q)r^*(t) \quad (1-13)$$

En utilisant l'expression de la commande optimale donnée par l'équation (1 10)

avec:

$$\begin{aligned} R &= m_1 \cdot if \\ S &= (1 + m_1 \cdot ih \cdot q^{-1}) \\ T &= m_1 \cdot [q^{N_1} \dots q^{N_2}] \end{aligned} \quad (1-14)$$

où :

$$M = [G^T \cdot G + \lambda \cdot I_{N_u}]^{-1} \cdot G^T = \begin{bmatrix} m_1 \\ \vdots \\ m_{N_u} \end{bmatrix} \quad (1-15)$$

if , ih sont déterminés par la résolution des équations Diophantines.

1.3. Choix des paramètres GPC

En réalité il n'y a pas une relation directe entre les paramètres de la commande prédictive généralisée et la dynamique voulue. Néanmoins on peut présenter quelques techniques pour le choix des paramètres de la GPC.

- N_1 : correspond au retard pur du système $N_1 = \frac{\text{retard du système}}{T_e}$, il est convenu pour le système qui n'a pas de retard de le choisir égale à 1.
- N_2 : est tel que $N_2 = \frac{\text{Temps de réponse}}{T_e}$; T_e est la période d'échantillonnage.
- N_u, λ sont les paramètres les plus délicats à régler, elle en dépend la stabilité du système.
Pour se situer on prend généralement $N_u = 1$ et $\lambda = \text{trace}(G^t \cdot G)$.

Dans le cas des systèmes à phase non minimale on choisit N_1 supérieur ou égale au temps que met la sortie du système pour changer de signe. Ce choix permet de stabiliser d'avantage la commande du procédé. Dans la littérature on trouve certaines techniques de recherche de paramètres de la GPC [BOU-96]

1.4. La commande GPC à double modèle de référence (GPCDMR)

Parfois même en choisissant de bon paramètres de GPC, on n'arrive pas à améliorer d'avantage ou à imposer l'allure de la réponse de poursuite. Dans certaines situations les cahiers des charges impose un dépassement maximal de la sortie du système par rapport à la consigne lors de la poursuite.

L'introduction d'un deuxième modèle de référence devient impérative.

Pour déterminer la loi de commande de la GPCDMR, nous avons la loi de commande de la GPC:

$$S(q^{-1})\Delta(q^{-1})u(t) + R(q^{-1})y(t) = T(q)r^*(t) \quad (1-16)$$

Le deuxième modèle de référence est donné par l'expression suivante:

$$A^*(q^{-1})r(t) = B^*(q^{-1})r^*(t)$$

Les équation en boucle fermée deviennent:

$$y(t) = \frac{q^{-d-1}B^*(q^{-1})T(q)B(q^{-1})}{A^*(q^{-1})P(q^{-1})} \cdot r(t) + \frac{S(q^{-1})}{P(q^{-1})} \cdot e(t) \quad (1-17)$$

$$u(t) = \frac{B^*(q^{-1})T(q)A(q^{-1})}{A^*(q^{-1})P(q^{-1})} \cdot r(t) + \frac{R(q^{-1})}{\Delta(q^{-1})P(q^{-1})} \cdot e(t) \quad (1-18)$$

avec :

$$P(q^{-1}) = A(q^{-1})S(q^{-1})\Delta(q^{-1}) + q^{-d-1}B(q^{-1})R(q^{-1})$$

On voit clairement de ces expressions que la dynamique de la sortie liée à la perturbation n'a aucune relation avec le deuxième modèle de référence. En revanche la dynamique de la sortie liée à la consigne peut être complètement imposée par le deuxième modèle de référence, et ce là nous permet d'imposer l'allure de la sortie en poursuite de la consigne, en lui conférant un temps de réponse supérieur au temps de réponse du système régulé avec seulement la GPC.

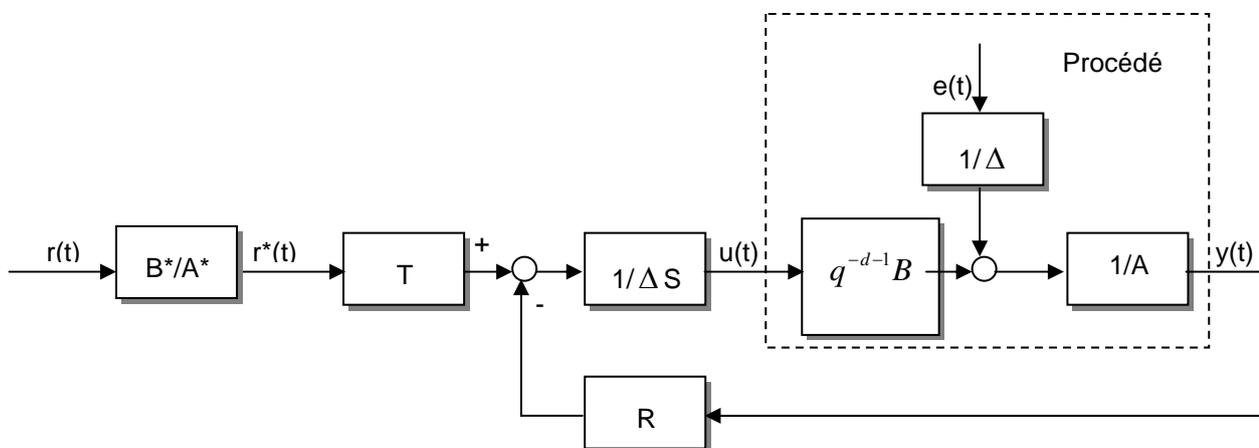


Figure 1.4 Structure de la commande GPCDMR

1.5. La commande prédictive non linéaire

La commande prédictive a prouvé ses résultats dans le domaine des systèmes linéaire ou linéarisé autour d'un point de fonctionnement, pour autant ne pas s'éloigner beaucoup du voisinage du point de fonctionnement. Nous savons très bien que tous les systèmes considérés comme linéaires ne le sont pas vraiment si on élargit la plage de fonctionnement, d'où vient la nécessité de trouver un régulateur basé sur la GPC et qui tient compte de la non linéarité du système.

En réalité il y a beaucoup de techniques de commande non linéaire qui peuvent être associées à la commande GPC. On peut citer à titre indicatif quelques techniques évoquées dans la littérature.

1.5.1. La GPC associée à une commande adaptative

Le feedback a été conçu initialement pour pallier aux perturbations affectant le système. Ces perturbations peuvent être de nature structurées, comme les perturbations paramétriques, ou non structurées comme les perturbations externes agissant directement sur les variables régulées du système.

La régulation classique conçoit un régulateur à paramètres fixes pour rejeter l'effet des perturbations agissant sur les variables régulées. Mais en ce qui concerne les perturbations paramétrique ce régulateur se trouve incapable de prendre en compte ce type de perturbations. C'est à ce niveau qu'intervient la boucle d'adaptation du régulateur, afin de maintenir les performances désirées en dépit des variations paramétriques du procédé.

La philosophie de la commande adaptative repose sur la présence de deux boucles. On retrouve une boucle classique à feedback comportant le procédé et le régulateur à paramètres ajustables. La seconde boucle permet d'adapter en ligne les paramètres du régulateur en fonction de certain indice de performance. La structure de la commande adaptative est donnée par la figure ci- dessous:

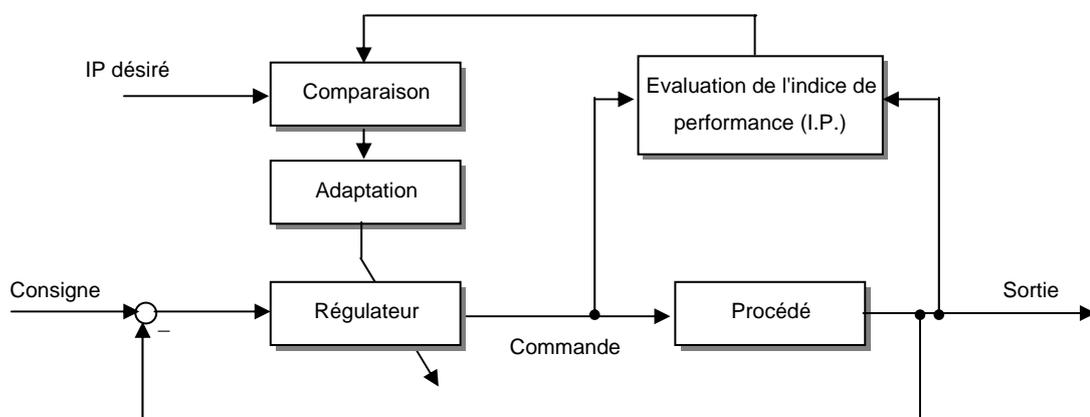


Figure 1.5 Structure générale de la commande adaptative.

Cette commande exige la satisfaction de certaines conditions:

- Les paramètres estimés doivent être bornés.
- L'évolution des paramètres doit être lente par rapport à l'état du procédé.
- Le modèle estimé doit être stabilisable par cette loi de commande.

L'association de la GPC à la commande adaptative permet de couvrir toute la plage de la sortie du système et aussi de régler le problème de retard du système. En revanche l'inconvénient de cette technique vient du fait qu'elle nécessite un temps de calcul plus ou moins important, ce qui peut altérer la réponse du système en régime transitoire.

1.5.2. La GPC associée à une linéarisation exacte

La commande par la linéarisation exacte repose sur le principe de faire un bouclage endogène qui annule de façon exacte les non linéarités du modèle. Ce qui permet d'avoir un modèle équivalent linéaire. Cette technique exige que le système soit différentiellement plat. La propriété de platitude permet

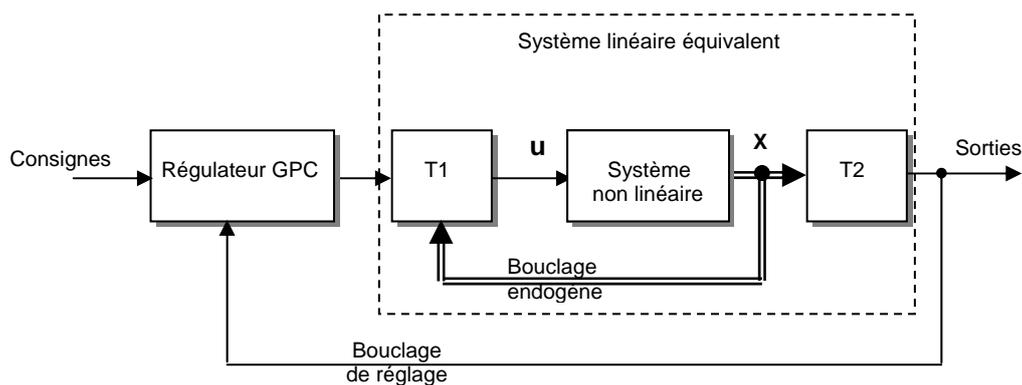


Figure 1.6 Commande d'un système plat non linéaire

Les fonctions $T1$ et $T2$ sont des fonctions de transformation des grandeurs physiques en grandeurs fictives et vis versa. Le système est supposé à paramètres fixes, sinon le bouclage endogène aura des difficultés à éliminer les non linéarités, chose qui n'est pas toujours vérifiée, cette technique rencontre certaines difficultés lors de son implantation.

1.5.3. La GPC associée à une commande Multi-contrôleurs

Cette technique repose sur le principe qu'il existe plusieurs contrôleurs locaux, qui sont sensés donner de bonnes performances au voisinage du point de fonctionnement autour duquel on a linéarisé le modèle non linéaire du système. Cette approche sera abordée d'une manière exhaustive dans le chapitre qui suit.

1.6. Conclusion

Nous avons montrés la méthodologie de la commande GPC avec ces deux approches, polynomiale et algorithmique. La première est appropriée pour les systèmes où on ne peut pas faire des essais de la commande soit par risque d'abîmer le procédé ou par défaut de faisabilité, alors cette approche permet l'étude de stabilité connue, que ce soit dans le plant fréquentiel ou temporel. En revanche, vu la rapidité de la deuxième, elle est appropriée pour les systèmes à constantes de temps très faibles comme dans le cas des systèmes électriques.

La commande GPC est basée sur un modèle linéaire, cela ne fait pas d'elle systématiquement une commande linéaire. L'approche polynomiale à polynômes RST fixes et l'approche algorithmique qu'on vue précédemment sont des commandes linéaires par contre l'approche algorithmique n'est pas forcément linéaire si la minimisation du critère se fait récursivement.

Chapitre 2:

La Commande Multi-contrôleurs GPC (MGPC)

2.1. Introduction

Les techniques de commande linéaire ont prouvé leur efficacité dans l'asservissement des systèmes linéaires. Ces techniques sont actuellement très bien maîtrisées. Malheureusement on sait très bien que les systèmes physiques sont loin d'être linéaires, surtout lorsqu'ils sont conduits loin du voisinage du point de fonctionnement autour duquel on a conçu le modèle et par conséquent la commande. L'idée était d'essayer d'élargir le champ d'application des techniques de commande linéaire aux systèmes non linéaires. Afin de faire bénéficier ces systèmes de cette simplicité relative de conception de régulateurs.

C'est depuis plus de trois décennies que la commande Multi-contrôleurs existe, représentée par les filtres de KALMAN [PAG-2001]. Cette approche s'appelle en anglais Multi-Modèle Control. Beaucoup de recherches ont contribué au développement de cette approche. Cette approche qui utilise les filtres de KALMAN suppose que le procédé est LTI représenté par un nombre fini de modèles. Des régulateurs sont associés à ces modèles et le signal de la commande globale appliqué au système est une combinaison linéaire des signaux issus de ces régulateurs. Les coefficients de la combinaison linéaire sont basés sur les probabilités réglées suivant l'erreur de prédiction de chaque filtre de KALMAN. La probabilité du filtre de KALMAN le plus proche du procédé devrait tendre vers 1, alors que les autres devraient tendre vers zéro. Parmi les inconvénients de cette technique est pour trouver le meilleur filtre de KALMAN parmi les autres prend beaucoup de temps, ce qui affecte le régime transitoire.

On trouve aussi la commande à gain préprogrammé. Cette technique se rapproche beaucoup de la commande Multi-contrôleurs. Elle a été élaborée afin de pallier au problème de variation paramétrique du système en fonction des paramètres environnementaux ou du système. On cite un cas particulier de la commande à gain préprogrammé où on linéarise le modèle non-linéaire autour d'un point de fonctionnement, et pour chaque modèle linéaire on synthétise un régulateur approprié. Entre les points de fonctionnement autour desquels nous avons fait la linéarisation le régulateur est interpolé et un contrôleur global non linéaire est obtenu.

L'objectif de ce chapitre est de présenter la méthodologie de la commande Multi-contrôleurs d'une façon générale et ces différentes structures. On mettra en relief spécialement la commande Multi-contrôleurs GPC. Qui va servir par la suite à la simulation commande des paliers magnétiques

2.2. Méthodologie de la commande Multi-contrôleurs

La commande Multi-contrôleurs est fondée sur le principe de commutation entre plusieurs régulateurs locaux qu'ils soient linéaires ou non linéaires, pour avoir finalement une commande globale non linéaire. Les régulateurs locaux sont synthétisés d'une façon à obtenir une stabilité et certaines performances dans la plage locale qui leur correspond.

Le classement de la commande Multi-contrôleurs peut être faite de différentes manières, selon le type de superviseur, la nature de commutation ou selon le fonctionnement des régulateurs locaux. Pour ce qui est de la supervision, il existe deux classes principales :

a) Multi-contrôleurs directe

Dans cette classe, la commutation se fait selon une séquence prédéterminée basée sur la mesure des grandeurs du système (la sortie du procédé, composante de vecteur d'état ...) afin de sélectionner un ou plusieurs régulateurs.

b) Multi-contrôleurs indirecte

Dans cette classe de commande Multi-contrôleurs, la commutation se fait sur la base de l'estimation des paramètres du système à partir des informations reconstruites afin de sélectionner un ou plusieurs régulateurs.

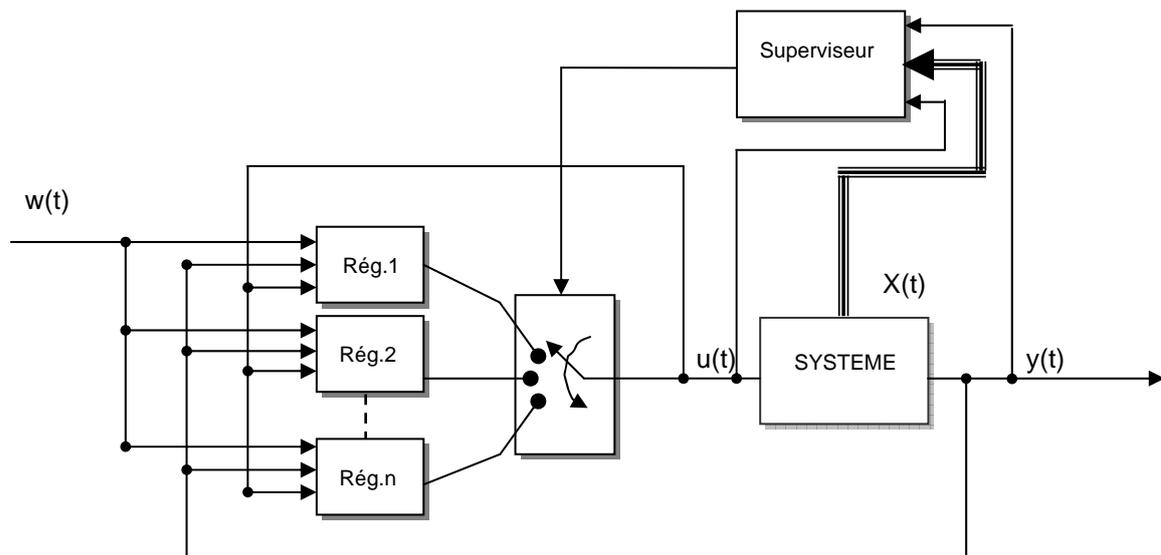


Figure: 2.1. Schéma de principe de la commande Multi-contrôleurs

En ce qui concerne la commutation il existe deux types de commutation :

a) Multi-contrôleurs à commutation franche

Dans cette classe de commandes Multi-contrôleurs, la commutation se fait d'une manière à n'avoir en fonctionnement qu'un seul régulateur local à la fois. Dans la commande globale il n'y a qu'un seul régulateur local actif les sorties des autres régulateurs sans en poursuite de la commande globale.

b) Multi-contrôleurs à commutation floue

Dans cette classe de commandes la commutation peut faire en sorte d'avoir deux ou plusieurs régulateurs locaux qui contribuent en même temps pour élaborer la loi de commande globale. La commande Multi-contrôleurs à commutation floue généralement emploi

2.2. La commande Multi-contrôleurs GPC

La commande Multi-contrôleurs est une commande basée sur l'utilisation de plusieurs contrôleurs GPC locaux pour constituer un régulateur global en commutant d'un contrôleur à un autre moyennant une certaine loi de supervision de la commutation.

Les techniques de commande Multi-contrôleurs ne sont pas forcement utilisées qu'avec la GPC, mais elle peut être utilisée avec une panoplie de régulateurs. La technique de commande Multi-contrôleurs peut utilisée la commutation franche ou floue, entre les régulateurs locaux, qui peuvent être de même type ou de type différents. Dans ce qui suit on va s'intéresser à la commande Multi-contrôleurs utilisant plusieurs régulateurs GPC, avec une commutation franche entre ces derniers. Ces régulateurs GPC sont sensés donnés de bonnes performances localement autour du point de fonctionnement pour lesquels ont été synthétisés.

Le schéma de structure de se régulateur est donné par la figure ci-dessous. Cette stratégie de commande est caractérisée par une supervision directe et une commutation franche.

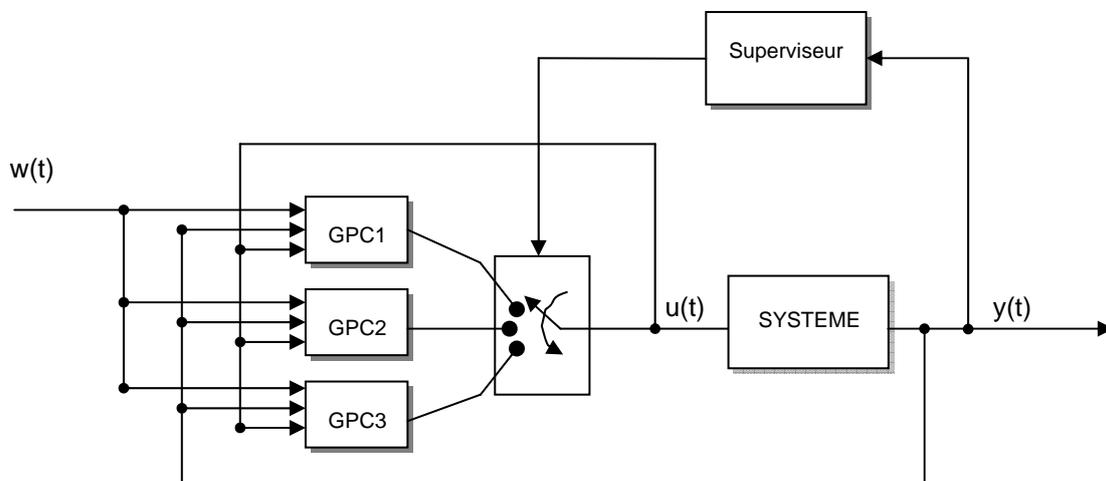


Figure: 2.2. Structure de la commande Multi-contrôleurs GPC.

Dans cette technique de commande il est très important de savoir que le point de fonctionnement est incorporé dans les régulateurs locaux. En réalité pour chaque point de fonctionnement on a la structure suivante:

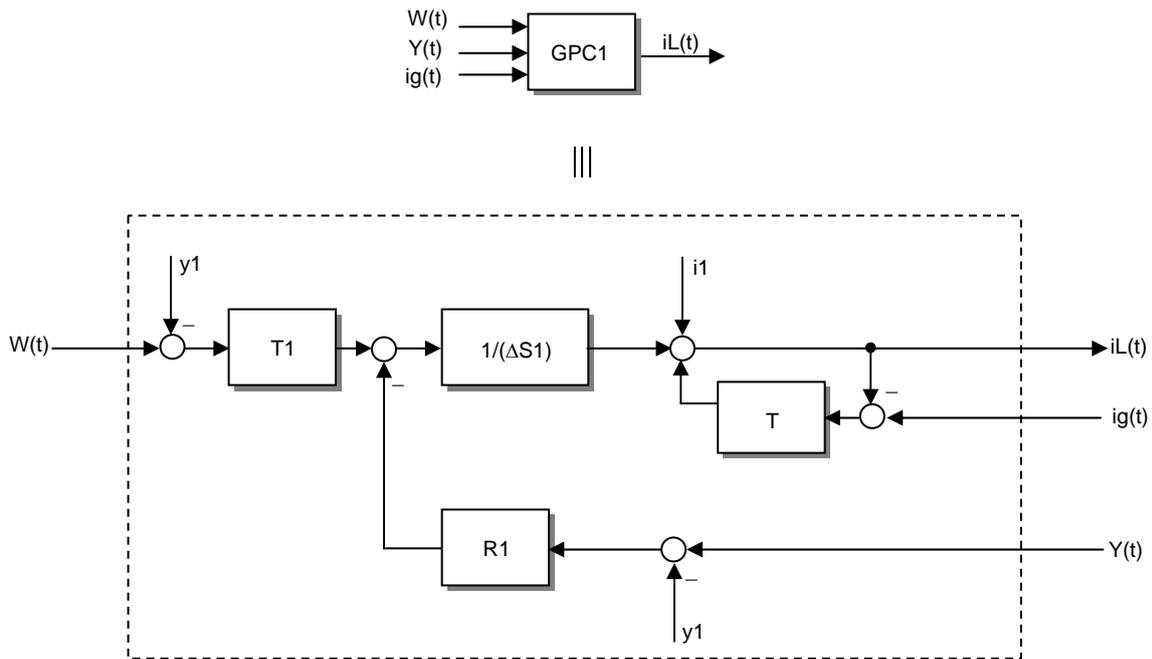


Figure: 2.3. Structure du régulateur RST local.

Les termes RST sont ceux du régulateur GPC polynomial; le bloc T est une fonction de transfert stable qui possède une action intégrale, cette fonction de transfert assure une poursuite de la commande locale à la commande globale. La fonction de transfert T est indispensable pour la stabilité de la commande Multi-contrôleurs. Lorsqu'on commute sur un régulateur toutes les autres commandes locales poursuivent cette commande locale qui est en action sur le système.

2.3. Stabilité de la commande Multi-contrôleurs GPC

La stabilité des commandes locales est nécessaire mais elle n'est pas suffisante pour la stabilité de la commande globale. Pour que la commande globale soit stable il faut que les régulateurs locaux soient stables pour des valeurs de conditions initiales très importantes, et que la commutation soit faite au moment du passage par les points de fonctionnement ce qui réduit l'effet des conditions initiales.

2.4. Conclusion

L'objectif de ce chapitre est de présenter brièvement la méthodologie et la philosophie de la commande Multi-contrôleurs d'une façon générale et plus spéciale la commande Multi-contrôleurs GPC. Aussi nous avons présenté un rapprochement entre plusieurs techniques de commande qui peuvent être vues comme un cas particulier de la commande Multi-contrôleurs. L'apport de ces techniques sera illustré par les essais de simulation dans le chapitre IV de ce mémoire.

Chapitre 3:

Paliers magnétiques actifs (PMA)

3.1. Introduction

Le palier magnétique actif PMA est un organe fixe, supporte et guide l'arbre de transmission d'une machine tournante. Le palier est un équipement mécanique lié intimement aux machines tournantes. Il se trouve sur les supports rigides des arbres en rotation, c'est la partie la plus concernée par les frottements. Jusqu'à une certaine époque, il n'y avait aucun type de palier qui supprimait totalement les frottements, jusqu'au moment de l'arrivée des paliers magnétiques, qui se caractérisent particulièrement par des frottements pratiquement nuls.

Dans ce chapitre nous présenterons brièvement les différents paliers existant et nous insisterons beaucoup plus sur le palier magnétique actif (PMA) radial. Nous commencerons par la modélisation d'un PMA radial à un seul degré de liberté ce qui aide très bien à comprendre le comportement du palier magnétique actif, et en finir par la modélisation du PMA à deux degrés de liberté.

La modélisation du PMA repose principalement sur la connaissance des lois des circuits magnétiques. Ces lois vont servir pour déterminer la force générée par un électroaimant. Nous avons procédé par la modélisation d'un PMA à un degré de liberté afin de mieux comprendre le comportement du PMA puis nous développerons les équations du modèle du PMA à deux degrés de liberté. Nous donnerons le modèle non linéaire qui reflète beaucoup plus la réalité, en outre nous développerons le modèle linéarisé autour d'un point de fonctionnement donné.

Afin d'illustrer l'importance des PMA nous exposerons les avantages et les inconvénients du PMA. Aussi nous présenterons les limites d'utilisation des PMA ainsi que leur différentes conceptions.

3.2. Les différents types de palier

Actuellement il existe trois types de paliers que ce soit en paliers radiaux ou axiaux; qui sont les paliers lisses, les paliers à roulement et les paliers magnétiques. En réalité on trouve plusieurs façons de classer ces paliers. Ils peuvent être classés selon s'ils sont actifs ou passifs, avec ou sans lubrifiant, axial ou radial, dans tous ce qui suit on se penchera sur le palier radial.

3.2.1. Le palier lisse

Les paliers lisses sont les paliers les plus simples de point de vue conception, mais leur principe de fonctionnement est relativement le plus complexe. Les paliers lisses sont constitués d'une ou de plusieurs parties. Les surfaces d'appui de l'arbre sont les coussinets, qui sont fait généralement en fonte douce ou en acier revêtu avec du laiton. La partie de l'arbre portée par le palier est le tourillon. La partie du palier qui porte l'arbre est le manchon. La surface de contact de l'arbre s'appelle la soie et celle du palier le régule.

Ce type de palier est le plus ancien des paliers. Néanmoins il est toujours utilisé, vu les avantages qu'il présente. Ce palier tolère un fonctionnement dans les conditions les plus contraignantes, que ce soit de point de vue charge importante, haute température ou vitesse élevée. Il possède une durée de vie importante, sur tout lorsque la machine fonctionne en régime de marche continue. Il est dans la plus part des machines formé de deux moitiés, ce qui rend son démontage très facile lors des inspections. Les jeux dans ces paliers sont de l'ordre de dixième de millimètre. On utilise un filme d'huile (d'eau ou de l'aire) comme lubrifiant et antifricion. Ce palier est très susceptible aux contaminations de l'huile par des particules solides, c'est pour ça qu'il est exigé d'installer des filtres de très faible porosité et on exige dans le cas des machines tournantes importantes un contrôle systématique de comptage de particules dans le lubrifiant avec un contrôle on line de la température métal des coussinets.

Ce palier est caractérisé par un frottement relativement important au démarrage, vu l'écrasement du filme d'huile à l'arrêt de la machine. Mais ce frottement diminue avec la vitesse de rotation de la machine. Pour les machines à grande charge les concepteurs prévoient des pompes de soulèvement du rotor afin qu'elles diminuent le frottement de démarrage, qui se retirent une fois la machine est en service. Dans des conditions normales de fonctionnement les intervalles de maintenance de ces paliers peuvent atteindre facilement des centaines de mille d'heures.

Ce palier est considéré généralement comme un palier passif. Néanmoins il y a certaines exceptions, où le palier lisse est actif, lorsque une de ces parties est modulé en déplacement vertical moyennant un actionneur pneumatique, ou lorsque le débit de l'huile de graissage est modulé en pression dans les deux directions verticale et horizontale.

3.2.2. Le palier à roulement

Le palier à roulement est couramment employé. Il substitue un mouvement de roulement au glissement. Il supporte des vitesses de rotation élevées mais ne peut pas être utilisé pour les charges importantes. Les paliers à roulement peuvent être à billes, à rouleaux ou à aiguilles.

Dans un roulement à billes, les billes tournent librement entre un anneau interne solidement fixé à un arbre en rotation, et un anneau externe solidement fixé au palier. Les anneaux et les billes sont en alliage d'acier, avec une finition habituellement à très faible tolérance. Les billes sont maintenues par une monture qui leur assure un espacement régulier et qui les empêche de se frotter les unes contre les autres. La lubrification des roulements se fait avec de l'huile ou de la graisse.

Le roulement à rouleaux est semblable à un roulement à billes, mais des petits cylindres d'acier remplacent les billes. Le roulement à aiguilles est un roulement à rouleaux très longs et très fins. Un roulement à rouleaux comporte des rouleaux où la longueur est de l'ordre de deux fois la largeur, par contre les roulements à aiguilles, les aiguilles ont une longueur de

l'ordre de dix fois la largeur. Les roulements à aiguilles sont particulièrement utiles dans les dispositifs où l'encombrement est limité.

3.2.3. Le Palier Magnétique Actif (PMA)

Le palier magnétique actif radial est constitué essentiellement de deux paires d'électroaimants arrangés dans la partie fixe du palier, disposés à 90° l'une par rapport à l'autre, comme il est représenté dans la figure ci-après Figure(1.1). Dans le cas des matériaux ferromagnétiques, chaque paire d'électroaimants peut générer une force d'attraction, une dans le plan vertical et l'autre dans le plan horizontal. Les mouvements du rotor dans l'entrefer sont mesurés à l'aide des capteurs de position inductifs. Ces derniers envoient des signaux d'information sur le rotor et le correcteur en retour agit sur le courant de chaque électroaimant d'une manière à générer des forces nécessaires pour ramener le rotor à la position de consigne.

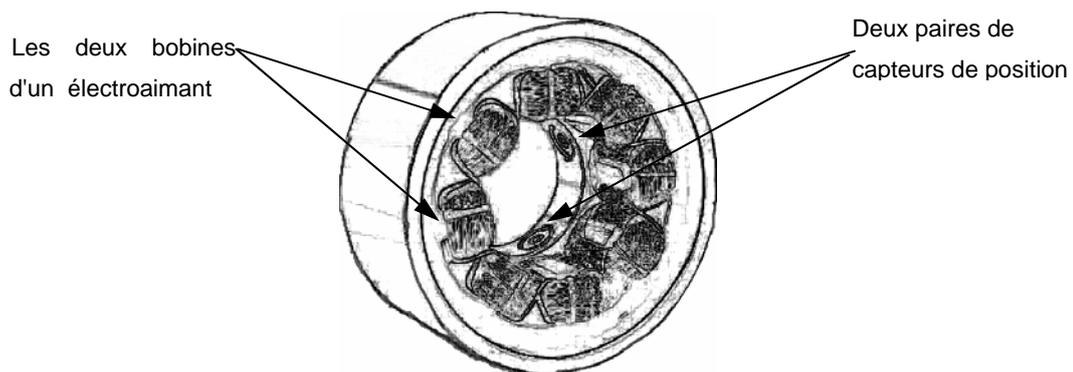


Figure:3.1 Palier magnétique actif.
(Modèle de SKF disponible de 0.06 à 40kN)

Une des propriétés inhérentes au palier magnétique est la nature de rotation sans contact et sans frottement. Cette nature lui confère plusieurs avantages par rapport aux paliers conventionnels. L'élimination du lubrifiant, diminution des vibrations, la rotation à des très grandes vitesses, une bonne endurance, tout ça a fait de lui un équipement très important. Mais l'utilisation de ces paliers dans l'industrie n'a pas été très large, vu la complexité du contrôle de ce type de paliers. Ce n'est que récemment qu'on s'est penché à l'emploi des PMA dans l'industrie lourde, comme dans la conception des turbines à gaz et les réacteurs des avions.

Dans le domaine de conception des machines ce n'est pas seulement le rendement qui compte mais il y a aussi la fiabilité qui est très importante. Ces deux paramètres sont le cheval de bataille de tous les concepteurs de machines. Si on sait que l'énergie dissipée dans les machines tournantes équipées de paliers ordinaires ne dépasse guère 1%, le recours au PMA n'est justifié que par le fait qu'ils ont de meilleures performances, notamment

l'endurance, longévité et fiabilité de ces paliers. Dans l'industrie on entend toujours parler des équipements indisponibles à cause de l'usure des roulements. On imagine un petit peu le volume des coûts d'entretien de ces équipements surtout dans les usines qui possèdent des centaines voir même des milliers de ces équipements. Relativement, le PMA offre un coût de maintenance pratiquement nul.

3.2.4. Caractéristiques du PMA

Il existe deux types de PMA, il y a le PMA radial et le PMA axial. Le rôle du premier est de commander le déplacement du rotor dans la direction radial, en revanche le deuxième, son rôle est de commander le déplacement axial du rotor. Le PMA est caractérisé par :

- a) L'entrefer: c'est la distance entre le rotor et le stator, et il dépend du diamètre du rotor ou le palier. Généralement on prend un entrefer de 0.3 à 0.6mm pour les diamètres <100mm; et 0.6 à 1mm pour des diamètres >100mm.
- b) Vitesse et l'accélération de rotation: Dans les PMA radiaux la vitesse et l'accélération de rotation ne sont limitées que par la résistance de la surface feuilletée du rotor aux forces centrifuges. En utilisant des matériaux feuilletés standards on peut atteindre une vitesse superficielle de 200m/s, équivalent à 19000tr/mn pour un rotor de diamètre de 100mm. Dans le PMA axial la vitesse n'est limitée que par la résistance du disque du PMA aux efforts de poussées, avec du matériel standard on peut atteindre des vitesses superficielles de l'ordre de 350m/s.
- c) La capacité en charge: Cette caractéristique dépend principalement du diamètre du rotor, de la longueur axiale du stator du PMA et de la nature du matériaux ferromagnétique utilisé. La charge unitaire max des PMA conçus avec des matériaux standards est 9daN/cm². Cette charge unitaire est faible devant la charge unitaire des paliers conventionnels, mais la vitesse circonférentielle permise dans le PMA permet l'augmentation du diamètre du palier et du rotor sans l'augmentation de la longueur axiale, pour atteindre des surfaces circonférentielles qui permettent la même charge d'un palier conventionnel. En utilisant une solution très chère le cobalt-alloys comme matériau ferromagnétique qui possède une induction de saturation au-dessus de 2 Tesla, le PMA peut être conçu pour une induction de 1.9 Tesla pour atteindre une capacité de charge unitaire supérieure à 60N/cm².
- d) L'énergie consommée: l'énergie globale consommée par un système à PMA est composée de l'énergie prise par le rotor, qui dépend du phénomène d'hystérésis et des courants Foucault, et de l'énergie consommée par l'électronique de puissance de la commande du PMA. Les pertes d'énergie dans les PMA sont moindres de 10 à 100 fois que les pertes dans les paliers conventionnels pour des machines d'un ordre comparable.
- e) Les conditions environnementales: à ce jour les PMA ont fonctionnés dans des conditions très sévères, des températures qui va de 20K (-253°C) au +450°C voir même

plus. Il y a des PMA conçus pour fonctionner dans le vide, l'air, eau de mer et hélium sans avoir besoin d'un système d'étanchéité.

f) La longévité: la durée de vie du PMA est très élevée, MTBF de l'ordre de 40000h

3.3. Description de la partie commande des PMA

Aux premiers temps, les armoires de commande des PMA étaient très gênantes de point de vue dimensions, mais actuellement avec le développement de la technologie de l'électronique de puissance les armoires ont diminués considérablement en encombrement et en puissance consommée tout en augmentant en fiabilité et en performances. Cette partie des PMA est très importante pour la stabilité et le bon fonctionnement du palier, et elle est responsable de la commande du PMA. La mesure de la position radiale du rotor dans le palier est donnée à l'aide de capteurs de position analogique, généralement on utilise deux paires de capteurs, une paire composée de deux capteurs inductif diamétralement opposés pour la direction verticale et une paire pour la direction horizontale. Les deux paires sont montés en pont de Weatstone et alimentés en courant alternatif de quelques dizaines de kilohertz comme il est représenté par la figure ci-dessous.

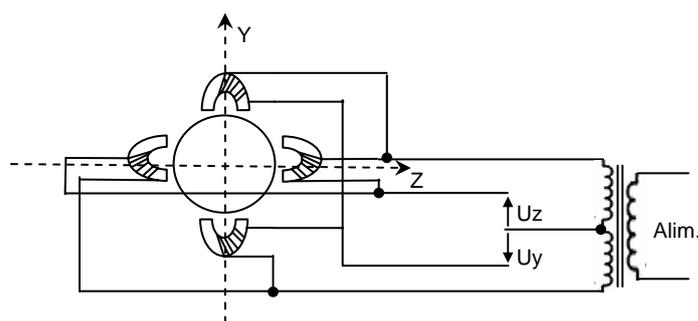


Figure: 3.2 Capteurs de position radiale.

Les capteurs peuvent être fixés individuellement ou faire partie d'une couronne découpée de façon semblable à ceux des électroaimants du palier radial mais avec des dimensions plus faibles. Sur le rotor est fixée une couronne feuilletée en tôles magnétiques (généralement de 0.1mm), appelée couronne de référence. On sait très bien que le système en boucle fermée est très sensible aux perturbations paramétriques sur le feedback donné par le capteur des grandeurs à réguler, cependant la fabrication de ces capteurs de position radiale nécessite un très grand soin en qualité de matériaux et en matière de procédure de fabrication. En ce qui concerne l'électronique de puissance on utilise des amplificateurs linéaires pour les paliers à faible puissance, mais pour les paliers à puissance plus au moins importante on doit passer au amplificateurs à commutation qui ne consomment qu'environ le dixième de la puissance mise en jeu contrairement aux amplificateurs linéaires qui consomment environ la moitié de la puissance mise en jeu [HAB].

3.4. Les paliers auxiliaires du PMA

La non utilisation de lubrifiant rend tout contact entre le rotor et le stator impardonnable et cause des dommages très importants. Ce cas peut avoir lieu si la commande est défaillante pour une raison ou une autre, ou lorsqu'il s'agit d'une perte de l'alimentation électrique du PMA, alors les concepteurs de machines tournantes lévitées par des PMA ont pensés à équiper la machine de paliers auxiliaires à roulement qui servent à l'atterrissage en douceur du rotor de la machine tournante. La figure ci-dessous illustre l'utilisation des paliers auxiliaires appelés aussi paliers d'atterrissage.

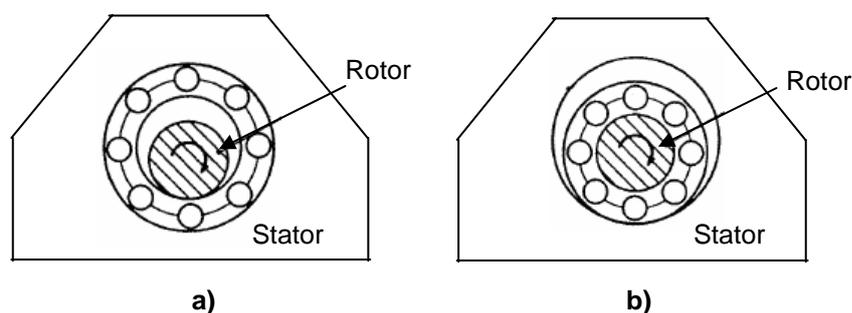


Figure: 3.3 Paliers auxiliaires.

La figure 3.3.a représente un palier auxiliaire fixé sur le stator. Un vide d'environ 50 à 60% de l'entrefer du PMA est laissé entre le rotor et le roulement du palier auxiliaire. Lorsque le rotor est en rotation autour d'un axe qui passe par le centre du PMA le roulement reste à l'arrêt, dans le cas où le rotor tombe sur le palier auxiliaire, le roulement se met à tourner éliminant ainsi des dégâts sur le rotor et le palier. La figure 3.3.b représente une autre façon de conception de palier auxiliaire qui a le même principe de fonctionnement sauf que cette fois ci le roulement est adhérent au rotor. Cette dernière se trouve limitée en vitesse de rotation vu que le roulement est en rotation avec le rotor et il ne supporte pas des vitesses tangentielles élevées.

3.5. Limite et champs d'application des PMA

Il y a trois décennies, le palier magnétique actif a été conçu pour surmonter les insuffisances des paliers conventionnels tels que les paliers lisses et les paliers à roulement. Principalement dans les laboratoires, ils ont prouvé leurs capacités et leurs aptitudes de fonctionner dans le vide sans avoir besoin de lubrification et sans contamination de l'environnement. Ils ont permis d'atteindre des vitesses de rotation très élevées et de donner aux systèmes à paliers magnétiques actifs des nouvelles dynamiques qui étaient inaccessibles auparavant.

Aujourd'hui, le palier magnétique actif a envahi le monde de l'industrie. Il est considéré comme un équipement de très grande valeur qui a pu être utilisé dans plusieurs applications.

Maintenant il y a certaines questions qui viennent à l'esprit concernant leurs caractéristiques. Généralement on parle de la charge supportée par le PMA, sa dimension, sa précision, sa vitesse, les pertes, et notamment sa température de fonctionnement.

La charge supportée par le PMA dépend de certaines propriétés du palier. Notamment l'arrangement des électroaimants dans le PMA, la nature magnétique des matériaux utilisés dans la fabrication du palier et de la loi de commande utilisée dans le contrôle du PMA. De plus, la charge supportée par le PMA n'a pas un aspect statique seulement mais aussi un aspect dynamique qui compte beaucoup dans la détermination des dimensions du palier. Si les charges statiques sont faciles à déterminer ce n'est pas toujours le cas pour les charges dynamiques qui demandent une attention particulière pour pouvoir les déterminer. Actuellement il existe des PMA pour des charges de l'ordre de 50 tonnes utilisés dans des turboalternateurs hydrauliques.

La lévitation dans le PMA repose principalement sur le principe de la force magnétique générée dans un champ magnétique. Ce champ magnétique est généré par un courant qui traverse une bobine ou par un aimant permanent. Le matériau utilisé dans la fabrication du palier est généralement un ferromagnétique et peut être aussi un diamagnétique. Le matériau ferromagnétique exposé à un champ inducteur généré par un aimant ou un électroaimant, crée un champ magnétique orienté dans la même direction du champ inducteur ce qui provoque une force d'attraction entre le matériau et l'électroaimant. En revanche, le matériau diamagnétique crée un champ opposé au champ inducteur ce qui provoque des forces de propulsion.

La commande des PMA est classée en deux types. Il y a celle qui utilise des courants de pré-magnétisation et celle qui n'utilise pas de courants de pré-magnétisation (commande en commutation). Chaque commande présente des avantages et des inconvénients, la première a tendance à générer des pertes sous formes d'échauffement inutile du palier en régime établi. La deuxième est une commande en commutation ce qui provoque des discontinuités dans la commande et peut mener à des lois de commande rudes.

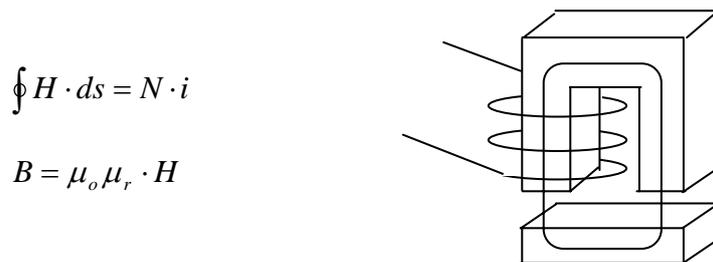
En ce qui concerne la température de fonctionnement elle est limitée principalement par la classe d'isolement du bobinage et par le type d'instrumentation utilisée pour la mesure du déplacement dans l'entrefer. Parce que c'est la partie du palier la plus sensible à la température. L'emploi des PMA dans les turbines à gaz et dans les avions nécessite un passage à une autre technologie d'isolation des bobines des électroaimants qui utilise une isolation faite avec un revêtement en céramique. Des PMA haute température sont en cours de développement, actuellement des prototypes ont atteint des températures de fonctionnement de l'ordre de 600°C. Les tests fonctionnels ont donné de bons résultats, mais des PMA haute température qui résistent à une exposition prolongée à des grandes températures nécessitent des recherches supplémentaires.

Actuellement on peut recenser une panoplie d'utilisation des paliers magnétiques, à commencer par les disques durs dans les équipements informatiques, dans le domaine de la

médecine chirurgicale, la micromécanique et terminer par les batteries de stockage d'énergie à disque d'inertie et les pompes à vide. Mais les opportunités les plus importantes qu'offre le palier magnétique sont très importantes, citant à titre indicatif, la possibilité de faire un équilibrage actif en ligne d'un rotor en rotation, la possibilité de faire un diagnostic des rotors en rotation ce qui permet d'anticiper les pannes curatives. Ainsi le PMA permet aux machines tournantes notamment dans la production d'électricité d'avoir une disponibilité considérable avec une fiabilité intéressante et des intervalles d'entretien les plus longs possible, ce qui réduit considérablement les coûts dus à la maintenance de ces équipements et au manque à gagner suite à des indisponibilités prolongées.

3.6. Expression de la force électromagnétique

Afin de pouvoir déterminer l'expression de la force électromagnétique appliquée par les PMA, on doit adopter certaines hypothèses simplificatrices et qui se rapprochent de la réalité des choses. La première des choses, on néglige les pertes de flux et on suppose que le flux est uniforme et la section du chemin emprunté par le flux est constante. Aussi on néglige les courants de Foucault induits dans le circuit magnétique.



$$\oint H \cdot ds = N \cdot i$$

$$B = \mu_o \mu_r \cdot H$$

Figure:3.4 Représentation d'un circuit magnétique à partie mobile

On sait très bien de la théorie de base des circuits magnétiques que la réluctance la plus importante est bien la réluctance dans l'air. L'énergie la plus importante, dissipée dans le circuit magnétique est celle emmagasinée dans l'entrefer. L'énergie emmagasinée dans l'entrefer est donnée par l'expression suivante :

$$W_a = \frac{1}{2} B_a \cdot H_a \cdot V_a = B_a \cdot H_a \cdot s \cdot C_o \quad (3-1)$$

En appliquant le principe de la variation de l'énergie mécanique est égale à la somme des travaux externes du système on trouve:

$$dW_a = \frac{f}{2} \cdot dC_o + \frac{f}{2} \cdot dC_o \Rightarrow f = \frac{dW_a}{dC_o} = B_a \cdot H_a \cdot s$$

$$f = \frac{B_a^2 \cdot s}{\mu_o} = \mu_o \cdot s \cdot \left(\frac{N \cdot i}{2C_o} \right)^2 = \frac{\mu_o \cdot s \cdot N^2}{4} \cdot \left(\frac{i^2}{C_o^2} \right) \quad (3-2)$$

Réellement les forces générées par l'électroaimant ne sont pas parfaitement en parallèle avec l'axe de l'électroaimant. Elles constituent un angle α avec l'axe du repère comme il est représenté dans la figure ci-dessous. De ce fait on introduit un terme de correction qui est $\cos \alpha \approx 0.92$. L'angle α est très faible et dépend des grandeurs géométriques du système comme il est consigné dans la fig.1.3 ci-dessous.

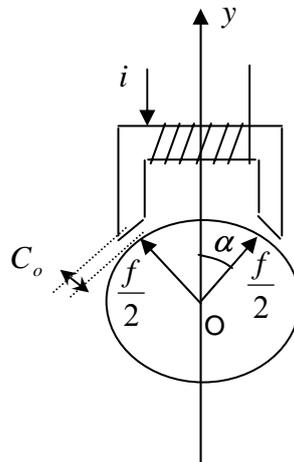


Figure:3.5 La force générée par le PMA

Alors la force est donnée dans un repère placé en l'axe géométrique de la bille comme suit:

$$f = \frac{\mu_o \cdot s \cdot N^2}{4} \cdot \left(\frac{i}{C_o - y} \right)^2 \cdot \cos \alpha \quad (3-3)$$

- μ_o : est la perméabilité dans l'air.
- s : La surface de la section transitée par le flux.
- N : Nombre de spires d'une bobine.
- C_o : L'entrefer.
- i : Courant de commande.
- y : Déplacement vertical dans le repère OYZ

L'expression de la force montre bien qu'elle ne peut être que positive. En effet les matériaux ferromagnétiques exposés aux électroaimants ne donnent lieu qu'à des forces d'attraction, nous devons utiliser deux électroaimants opposés l'un par rapport à l'autre afin de pouvoir contrôler ce système dans les deux directions. Cette conception permet d'imposer la dynamique du système dans le cas de la montée et de la descente de la bille. En revanche l'utilisation d'un seul électroaimant dans le sens opposé de la gravité n'impose que la dynamique de la montée, la dynamique de la descente est fixe et imposée par la gravité, puisque la bille est abandonnée à elle-même. Dans le cas où la gravité est nulle (cas de la commande de déplacement dans un plan horizontal) l'utilisation de deux électroaimants est indispensable.

3.7. Les différentes méthodes de commande des PMA

Il existe plusieurs techniques de commande des PMA que ce soit en tension ou en courant. elles peuvent être classées en deux types; Il y a celles qui utilisent la commutation entre les deux électroaimants diamétralement opposés et celles qui utilisent des courants de pré-magnétisation desdits électroaimants. Chaque technique possède des avantages et des inconvénients.

3.7.1. La commande par commutation

Dans cette commande on utilise la commutation franche entre les deux électroaimants qui donne lieu à une force donnée par l'expression suivante:

$$f = \begin{cases} \frac{\mu_o \cdot s \cdot N^2}{4} \cdot \left(\frac{i}{C_o - y}\right)^2 \cdot \cos \alpha ; & i \geq 0 \\ -\frac{\mu_o \cdot s \cdot N^2}{4} \cdot \left(\frac{i}{C_o - y}\right)^2 \cdot \cos \alpha ; & i < 0 \end{cases} \quad (3-4)$$

Dans la pratique, cette technique peut rencontrer des contraintes d'application, liés au fait de discontinuité de la force qui peut surgir au voisinage de $i = 0$ et aussi à la complexité de synthèse de la loi de commande. Mis à part ces difficultés cette méthode permet de diminuer l'énergie consommée par les PMA en régime établi et permet de diminuer l'échauffement inutile du PMA [PON-96].

3.7.2. La commande par les courants de pré-magnétisation

En ce qui concerne la technique des courants de pré-magnétisation, la force est donnée par l'expression suivante:

$$F(y,i) = K \cdot \left[\frac{(I_o + i)^2}{(C_o - y)^2} - \frac{(I_o - i)^2}{(C_o + y)^2} \right] \quad \text{avec: } K = \frac{\mu_o \cdot s \cdot N^2}{4} \cdot \cos \alpha \quad (3-5)$$

I_o : Courant de pré-magnétisation.

Cette technique est moins complexe que la première. Elle permet d'avoir un modèle continu non linéaire. Néanmoins elle présente certains inconvénients, à titre indicatif, les courants de pré-magnétisation contribuent dans l'échauffement inutile du système et augmentent dans le temps l'énergie consommée par le PMA en régime établi. Lesdites courants sont des paramètres du modèle du système, ils doivent être générés par des sources de courant très stables, afin de ne pas avoir une variation paramétrique importante. Dans tous ce qui suit on utilisera cette technique pour déterminer les équations dynamiques des PMA.

3.8. Modélisation PMA à un degré de liberté (1-DDL)

Dans cette modélisation, on adopte la technique de commande par les courants de pré-magnétisation évoquée dans (3.7.2). Afin de pouvoir écrire les équations dynamiques d'un système à un (1) degré de liberté, on prend l'exemple d'une bille suspendue entre deux électroaimants. Le système est représenté par la figure 3.4:

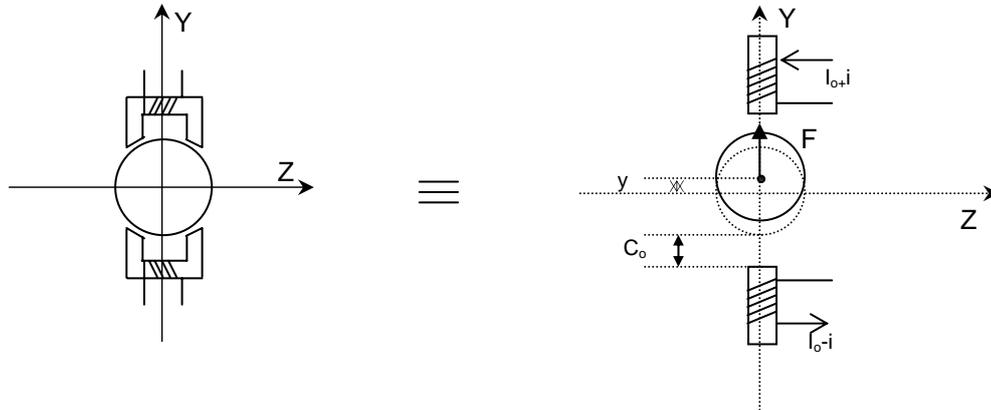


Figure: 3.6 Représentation d'un PMA à 1 DL

Comme on la déjà présentée ci-dessus la force résultante appliquée par les deux électroaimants sur la bille est donnée par l'équation (3.5), pour α très petit on peut prendre $\cos \alpha \approx 1$, On aura l'expression suivante:

$$F(y,i) = K \cdot \left[\frac{(I_o + i)^2}{(C_o - y)^2} - \frac{(I_o - i)^2}{(C_o + y)^2} \right] \quad \text{avec: } K = \frac{\mu_o \cdot s \cdot N^2}{4} \quad (3-6)$$

3.8.1. Modèle non linéaire

On retrouve le modèle non linéaire du système en appliquant la loi fondamentale de la mécanique $\sum F = m \cdot \gamma$:

$$F - m \cdot g = m \cdot \ddot{y} \quad (3-7)$$

m : La masse de la bille.

g : La gravité.

\ddot{y} : L'accélération de la bille dans la direction verticale du repère OYZ.

En remplaçant la force F par son expression donnée par l'équation (3.6), on obtient le modèle représenté sous forme d'équation d'état suivant:

$$\frac{d}{dt}X = \begin{bmatrix} \dot{y} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dy}{dt} \\ \frac{K}{m} \cdot \left(\frac{(I_o + i)^2}{(C_o - y)^2} - \frac{(I_o - i)^2}{(C_o + y)^2} \right) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

Ce modèle reste valable lorsque la bille est posée sur un plan horizontal sans frottement il suffit d'éliminer la pesanteur en faisant $g=0$.

Pour la caractéristique statique de la force en fonction du déplacement elle est de la forme présentée ci-dessous:

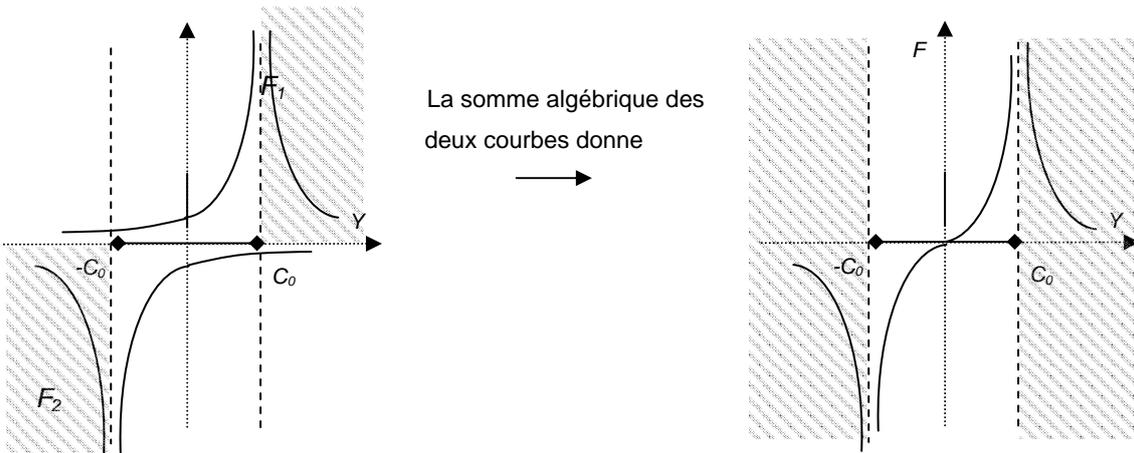


Figure:3.7 Caractéristique statique de la force en fonction de la position.

Les forces F_1, F_2 correspondent respectivement à la force générée par l'électroaimant supérieur et l'électroaimant inférieur. La force F est la résultante des deux forces, c'est la partie qui fait introduire une non linéarité au système.

Le système est caractérisé par l'existence de deux points singuliers, où la force prend des valeurs très importantes. Ces deux points correspondent au cas où la bille est complètement collée à l'électroaimant; $y = C_o$ correspond au collage de la bille à l'électroaimant supérieur et $y = -C_o$ correspond au collage à celui de l'inférieur. Dans ces deux cas la force employée pour faire décoller la bille est très importante, alors il est judicieux d'éviter que la bille atteigne ces deux points singuliers. Moyennant les paliers auxiliaires on peut garantir que le rotor n'atteindra en aucun cas ces deux points singuliers. On admettra dans tous ce qui suit que la divergence du système est le fait d'atteindre ces deux extrémités.

3.8.2. Modèle linéaire

On voit très bien que les équations qui régissent le système sont réellement non linéaires. Pour retrouver les équations du modèle linéarisé du système on utilise le développement de Taylor de la force F au voisinage du point de fonctionnement (y_o, i_o) ce qui aboutit à:

$$F(y,i) = F(y_o, i_o) + \left[\frac{\partial F}{\partial y} \quad \frac{\partial F}{\partial i} \right]_{(y_o, i_o)} \cdot \begin{bmatrix} (y - y_o) \\ (i - i_o) \end{bmatrix} + O(y,i) \quad (3-9)$$

$$\frac{\partial F}{\partial y} \Big|_{(y_o, i_o)} = 2 \cdot K \cdot \left(\frac{(I_o + i_o)^2}{(C_o - y_o)^3} + \frac{(I_o - i_o)^2}{(C_o + y_o)^3} \right)$$

$$\frac{\partial F}{\partial i} \Big|_{(y_o, i_o)} = 2 \cdot K \cdot \left(\frac{(I_o + i_o)}{(C_o - y_o)^2} + \frac{(I_o - i_o)}{(C_o + y_o)^2} \right)$$

Pour des (y, i) très proche du point de fonctionnement (y_o, i_o) , on $O(y, i) \rightarrow 0$. Le terme peut être considéré comme une perturbation qui augmente en s'écartant du point de fonctionnement et qui devient insignifiant au voisinage du point de fonctionnement.

dés lors l'équation dynamique s'écrit comme suit:

$$\ddot{y} = K_y \cdot y + K_i \cdot i - (K_y \cdot y_o + K_i \cdot i_o + g) \quad (3-10)$$

avec:

$$K_y = \frac{1}{m} \cdot \frac{\partial F}{\partial y} \Big|_{(y_o, i_o)}$$

$$K_i = \frac{1}{m} \cdot \frac{\partial F}{\partial i} \Big|_{(y_o, i_o)}$$

La gravité est considérée comme une grandeur de perturbation lorsque la bille est suspendue dans le plan vertical et elle peut être annulée par un choix judicieux du point de fonctionnement. Par exemple on peut choisir le point de fonctionnement de la manière suivante:

$$y_o = 0$$

$$i_o = -\frac{m \cdot C_o^2 \cdot g}{4 \cdot K \cdot I_o}$$

Lorsque la bille est commandée dans le plan horizontal on a $g = 0$, on peut choisir le point de fonctionnement $(i_o, y_o) = (0, 0)$, l'équation(3.10) donnée ci-dessus est simplifiée, et on obtient l'équation suivante:

$$\ddot{y} = K_y \cdot y + K_i \cdot i \quad (3-11)$$

avec:

$$K_y = \frac{\mu_o \cdot s \cdot N^2 \cdot I_o^2}{m \cdot C_o^3}$$

$$K_i = \frac{\mu_o \cdot s \cdot N^2 \cdot I_o}{m \cdot C_o^2}$$

La fonction de transfert est donnée par la transformée de Laplace suivante:

$$Y(s) = \frac{K_i}{s^2 - K_y} \cdot I(s) \quad (3-12)$$

où: $Y(s), I(s)$ sont respectivement les transformée de Laplace de $y(t)$ et de $i(t)$.

Le système peut être représenté dans l'espace d'état comme suit:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{y} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ K_y & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_i \end{bmatrix} \cdot i \\ y &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3-13)$$

On remarque très bien que ce modèle est valable pour les deux cas; lorsque le déplacement de la bille est dans le plan horizontal (sans frottement statique) ou vertical (sans frottement visqueux), il suffit de mettre la gravité $g = 0$ et on retrouve le même modèle mais avec K_i et K_y différents.

3.9. Modélisation PMA à deux degrés de liberté (2-DDL)

Le système à deux degrés de liberté est représenté par la figure ci-dessus. C'est un système qui possède deux paires d'électroaimants, une paire dans la direction verticale identique à ce que nous avons présenté ci-dessus, cas d'un seul degré de liberté, et une autre paire dans la direction horizontale. Dans certains contextes on peut tolérer que l'action des deux paires d'électroaimants sont indépendantes et il n'y a pas de fortes interconnexions entre eux qui peuvent généralement être négligées.

Dans la pratique dans le cas de l'utilisation du palier magnétique pour supporter horizontalement un rotor, les deux paires ne sont pas disposées exactement d'une manière une paire horizontale et l'autre verticale. Mais elles sont disposées de la manière illustrée par la figure ci-dessus. Cette méthode de disposer les deux paires d'électroaimants permet de diviser la contrainte de gravité sur les deux paires et avoir une géométrie symétrique du palier.

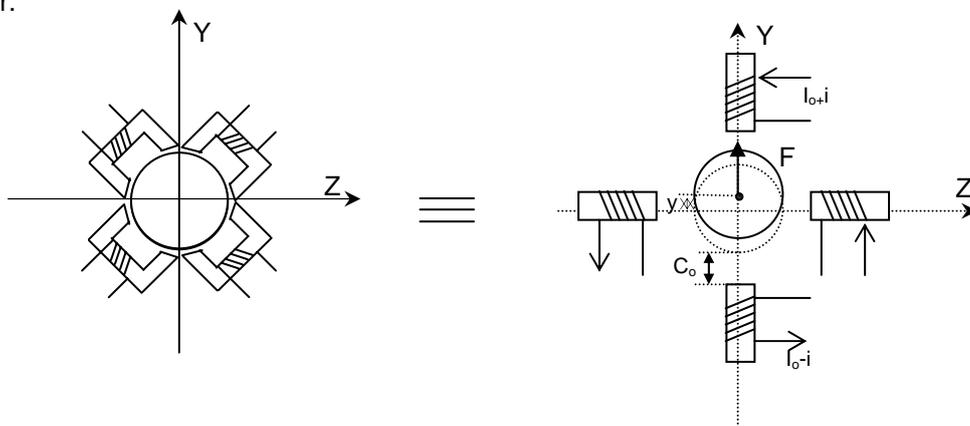


Figure:3.8 Représentation d'un PMA à 2 degrés de liberté

3.9.1. Modèle non linéaire

En agissant par analogie aux équations développées pour le cas de un degré de liberté, et partant de l'hypothèse que l'entrefer est très réduit nous trouvons les équations données ci-dessous représentées sous forme d'équation d'état:

$$\frac{d}{dt} X = \begin{bmatrix} \dot{y} \\ \ddot{y} \\ \dot{z} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dy}{dt} \\ \frac{K}{m} \cdot \left(\frac{(I_o + i_y)^2}{(C_o - y)^2} - \frac{(I_o - i_y)^2}{(C_o + y)^2} \right) \\ \frac{dz}{dt} \\ \frac{K}{m} \cdot \left(\frac{(I_o + i_z)^2}{(C_o - z)^2} - \frac{(I_o - i_z)^2}{(C_o + z)^2} \right) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

L'étude et l'asservissement du système à quatre degrés de liberté peut être résumée dans ce cas à l'étude l'asservissement du système à un degré de liberté, du moment où il est constitué de deux systèmes à un degré de liberté totalement indépendants et non interconnectés, la seule différence entre les deux directions est la présence de la gravité dans la direction verticale.

Cette possibilité est valable que dans certaines conditions, ce qui n'est pas toujours le cas spécialement pour les PMA à large entrefer, qui nécessite une attention particulière quant à la modélisation des interconnexions entre les deux directions, verticale et horizontale. On retrouve dans la littérature certains travaux de modélisation des palier à large entrefer, dans l'article [QUE-97] est développée une modélisation d'un PMA à deux degrés de liberté, en utilisant un modèle de force non linéaire couplé entre les deux axes pour un large entrefer, une stratégie de commutation est présentée dans le but d'assurer la force désirée pour l'asservissement du rotor.

3.9.2. Modèle linéaire

Avec un choix judicieux des points de fonctionnement qui élimine l'apparition de la pesanteur dans les équations et qui garde une symétrie dans les équations, le modèle linéaire du système est représenté dans l'espace d'état comme suit:

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \ddot{y} \\ \dot{z} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ K_y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & K_z & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \\ z \\ \dot{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ K_{iy} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & K_{iz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & i_z & 0 \end{bmatrix} \quad (3-15)$$

$$\begin{bmatrix} y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \\ z \\ \dot{z} \end{bmatrix}$$

Il est donné aussi sous forme de fonction de transfert:

$$G_y(s) = \frac{K_{iy}}{s^2 - K_y} ; G_z(s) = \frac{K_{iz}}{s^2 - K_z} \quad (3-16)$$

Ce système est un système diagonal, constitué de deux sous-systèmes totalement indépendants. Ce modèle est plus proche de la réalité d'autant l'entrefer est petit. En revanche, pour les PMA à entrefer large la modélisation fait entrer d'autres considérations qui font apparaître l'interconnexion entre l'axe vertical et horizontale [QUE-97].

3.10. Stabilité du PMA

En analysant les équations du modèle du PMA, équation (3.12), que se soit à un ou deux degrés de liberté, on constate que le système possède un pôle réel situé dans la partie positive du plan d'Evans. Ce qui indique que le système en boucle ouverte est instable, d'où la nécessité d'une commande adéquate afin de le stabiliser et de lui conférer la dynamique voulue.

Beaucoup d'oeuvres ont exposé des méthodes de commande et de stabilisation du PMA. On cite l'exemple d'une commande à actions pures proportionnelle et intégrale associé à un correcteur de phase PI-AF a été utilisé pour la commande d'un PMA [DEB-04]. On trouve aussi dans la littérature des contributions de plusieurs techniques de commande que ce soit linéaires ou non linéaires, citant l'exemple de l'utilisation de la commande du gain préprogrammé, l'utilisation de la commande de linéarisation exacte basée sur la propriété de platitude du modèle du système à PMA [PON-96],

3.11. Equilibrage des rotors déséquilibrés

En mécanique de mouvement gyroscopique est très connu le problème de déséquilibre des rotors généralement sous forme de balourds. Ce phénomène est du essentiellement à plusieurs causes, à titre d'exemple il peut être causé par le fléchissement du rotor représenté par la figure 3.9.

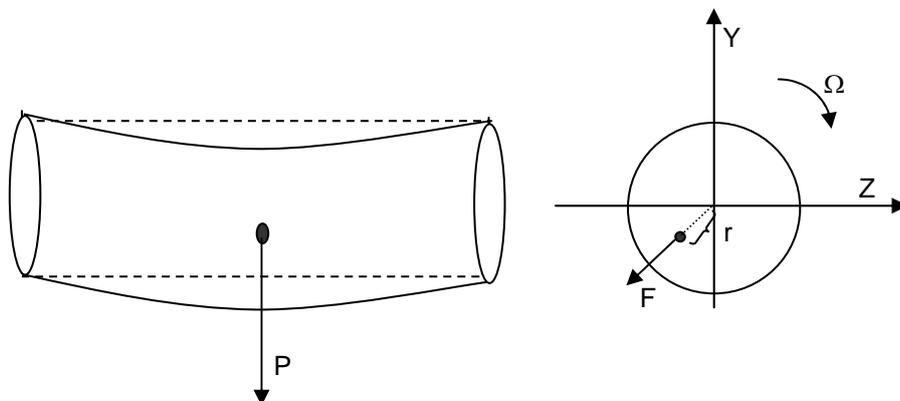


Figure: 3.9 Représentation d'un rotor déséquilibré

Ce déséquilibre génère une force centrifuge vue par rapport aux axes vertical et horizontal comme une perturbation alternative donnée pour vitesse de rotation constante par l'expression suivante :

$$F_y = mr\Omega^2 \cos(\Omega t + \varphi_y)$$

$$F_z = mr\Omega^2 \cos(\Omega t + \varphi_z) \quad (3-17)$$

Cette force est source des vibrations mécaniques qui peuvent causer une dégradation prématurée de la machine. Les interventions d'équilibrage conventionnel consistent à installer une masse de correction dans le sens opposé de la masse de déséquilibre pour annuler son effet et ramener le centre de gravité de l'ensemble au centre de l'axe de rotation qui se trouve habituellement au centre géométrique du rotor. En revanche l'équilibre actif consiste à ramener le centre de l'axe de rotation au centre de gravité du rotor déséquilibré ce qui annule la force centrifuge.

La différence entre la première solution d'équilibrage et la deuxième évoquées ci-dessus c'est que la première nécessite l'arrêt du rotor pour ajouter la masse de correction, en revanche la deuxième solution peut être faite rotor en rotation moyennant des PMA, ce qui la rend actif. C'est un autre privilège qui s'ajoute aux propriétés des paliers magnétiques actifs.

3.12. Conclusion

Nous avons présenté le palier magnétique actif comme une très bonne alternative pour surmonter les insuffisances des paliers conventionnels. Nous avons montré également que les PMA sont des paliers instables. Sans une commande de régulation le PMA ne peut pas fonctionner, alors un asservissement est indispensable pour le fonctionnement de ce palier. C'est un équipement très prometteur et offre beaucoup d'opportunités. C'est vrai qu'il nécessite une attention et un soin particulier dans sa conception, plus particulièrement dans sa commande mais nous pensons qu'il mérite toute cette peine.

La chose la plus importante dans l'utilisation des PMA c'est qu'ils offrent l'opportunité de faire un équilibrage actif des rotor afin de diminuer au minimum les vibrations mécaniques, causes des détériorations des équipements et de leur dégradation prématurée, si on sait que la longévité des équipements mécaniques est tributaire des niveau de ces vibrations. Actuellement avec les PMA ces niveaux de vibrations sont généralement divisés par un facteur de 10.

Chapitre 4:

Application de la GPC au PMA

4.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons l'application des différentes techniques basées sur la commande prédictive généralisée GPC présentée les chapitres précédents. Nous appliquerons ces techniques au système à PMA à un degré de liberté exposé plus haut. Aussi nous passerons d'une technique à une autre afin de faire une comparaison entre les différentes techniques et déterminer l'apport de chacune d'elles avec ces avantages et inconvénients.

4.2. Détermination du modèle discret du PMA

Afin de pouvoir synthétiser un régulateur GPC pour la commande d'un PMA, nous utiliserons le modèle évoqué dans le chapitre I ci-dessus. Etant donné que la GPC est une commande numérique, on aura besoin de passer du domaine continu au domaine discret. Ce que veut dire que nous devons avoir le modèle discret du système sous forme de fonction de transfert en z . Par conséquent nous utiliserons les techniques appropriées pour transformer la fonction de transfert en " s " en fonction de transfert en " z ".

La synthèse du régulateur GPC se fera sur la base du modèle linéaire du système et à l'aide de la simulation nous allons l'appliquer au modèle non linéaire qui représente mieux le comportement dynamique du système réel.

La détermination de la fonction de transfert en z pour une période d'échantillonnage T_s du modèle linéaire continu avec élément de maintien revient à déterminer la fonction en z suivante: $(1 - z^{-1}) \cdot Z\left(\frac{G(s)}{s}\right)$ tel que $G(s)$ est donnée par l'équation (3.12) comme suit:

$$G(s) = \frac{K_i}{s^2 - K_y} \quad (4-1)$$

L'utilisation des techniques de passage de la fonction de transfert en s au fonction de transfert en z alors nous obtiendrons l'expression du modèle discret comme suit:

$$G(z^{-1}) = K' \cdot \frac{z^{-1} + z^{-2}}{1 + (e^{T_s \sqrt{K_y}} + e^{-T_s \sqrt{K_y}}) \cdot z^{-1} + z^{-2}} \quad (4-2)$$

avec:

$$K' = \frac{K_i}{K_y} \left[\left(\frac{e^{T_s \sqrt{K_y}} + e^{-T_s \sqrt{K_y}}}{2} \right) - 1 \right]$$

$$K_i = \frac{\mu_o \cdot S \cdot N^2}{2m} \cdot \left[\frac{(I_o + i_o)}{(C_o - y_o)^2} + \frac{(I_o - i_o)}{(C_o + y_o)^2} \right]$$

$$K_y = \frac{\mu_o \cdot S \cdot N^2}{2m} \cdot \left[\frac{(I_o + i_o)^2}{(C_o - y_o)^3} + \frac{(I_o - i_o)^2}{(C_o + y_o)^3} \right]$$

tel que:

μ_o	La perméabilité dans l'air
S	La surface traversée par le champ magnétique
N	Le nombre de spires des électroaimants
m	La masse de la bille
I_o	Le courant de pré-magnétisation
C_o	L'entrefer
T_s	Période d'échantillonnage
i_o, y_o	Point de fonctionnement au voisinage duquel on a fait la linéarisation.

4.2.1. Exemple de dimensionnement d'un PMA

Afin d'avoir un modèle numérique du PMA nous avons choisi les valeurs des paramètres comme suit

μ_o	S (m ²)	N	m (kg)	I_o (A)	C_o (m)	T_s (s)	i_o, y_o
$4\pi \times 1e-7$	$920.28e-6$	100	8.5	$35e-3$	$1e-3$	0.01	(0,0)

Alors pour ces paramètres on obtient la fonction en "z" suivante:

$$G(z^{-1}) = (2.381e-6) \cdot \frac{z^{-1} + z^{-2}}{1 - 2 \cdot z^{-1} + z^{-2}} \quad (4-3)$$

4.2.2. Réponse du système en boucle ouverte

Dans le cas où il n'y a aucune perturbation externe au système et lorsqu'on choisi un courant d'entrée du système en boucle ouverte $i = 0$ et les conditions initiales du système nulles alors la sortie du système est théoriquement nulle et le système est à son point d'équilibre critique. Par ailleurs, dans la pratique on ne peut pas avoir une condition initiale de position absolument nulle. Alors nous avons simulé la réponse du système en boucle ouverte avec une condition initiale de position égale à -0.1% de l'entrefer. Le résultat de simulation est consigné par la figure 4.1. Nous constatons clairement la divergence du système en boucle ouverte.

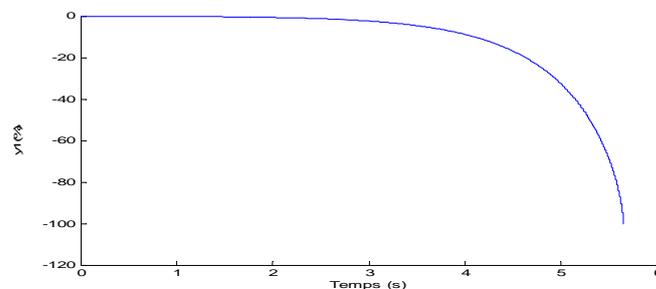


Figure 4.1 La réponse du PMA en BO.

4.3. Stabilisation du PMA à l'aide d'un PI-AF

Afin de stabiliser le PMA nous avons utilisé un régulateur conventionnel PI-AF représenté dans la figure 4.2. C'est un régulateur composé des actions pures, proportionnelle et intégrale (PI) et une action de correction de phase celle d'un avance phase (AF) [DEB-04]. L'expression du régulateur est donnée par l'équation 4-4.

$$G_c(s) = \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s + 1}{(T_d/K)s + 1} \right) \cdot K_p \quad (4-4)$$

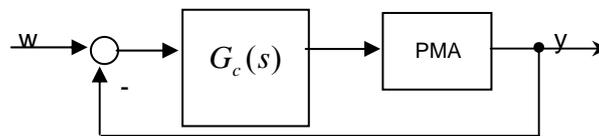


Figure 4.2 Schéma bloc du PMA en BF

Les résultats de simulations du PMA en boucle fermée avec le régulateur PI-AF ($K_p=180$, $T_i=0.4$, $T_d=1$, $K=50$) et $W=5\%$ sont consignés dans la figure 4.4. Nous constatons que le palier magnétique actif est actuellement stable en boucle fermée. Nous avons choisi une consigne de 5% parce que c'est une limite max au-delà de cette valeur le PMA perd sa stabilité.

Afin de pouvoir augmenter la plage de la consigne en gardant toujours la stabilité du PMA, nous avons introduit un filtre de premier ordre sur la consigne comme il est illustré par la figure 4.3. Les résultats de simulation sont représentés par la figure 4.5. Nous constatons que à l'aide de ce filtre nous avons pu atteindre une consigne de 30% sans perdre la stabilité du PMA, mais au-delà de cette valeur la stabilité n'est pas conservée.

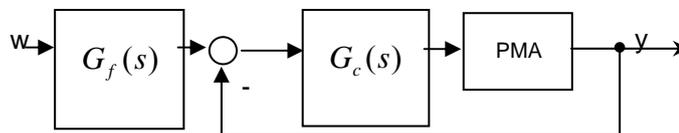


Figure 4.3 Schéma bloc du PMA en BF avec un filtre sur la consigne

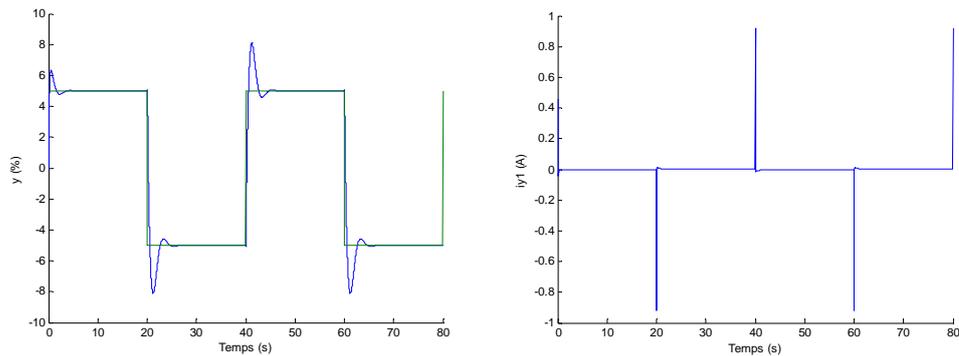


Figure 4.4 La sortie et la commande du PMA en BF.

PI-AF($K_p=180$, $T_i=0.4$, $T_d=1$, $K=50$) avec $W_y=5\%$.

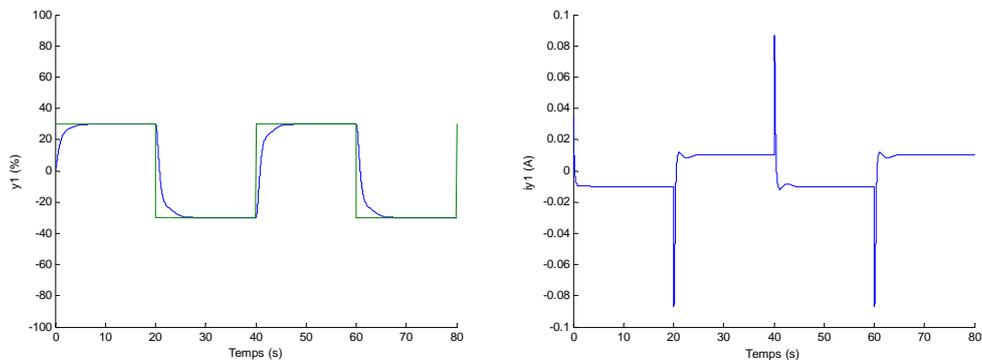


Figure 4.5 La sortie et la commande du PMA en BF avec un filtre sur la consigne

PI-AF($K_p=180$, $T_i=0.4$, $T_d=1$, $K=50$) avec $W_y=30\%$.

4.4. Application de la GPC de base au PMA

4.4.1. Influences du changement des paramètres GPC

L'impacte de variation des paramètres GPC sur la réponse du système est donné par la figure 4.6. Nous avons fixé $N_1 = N_u = 1$ et nous avons varié N_2 de 50 à 200 avec un pas de 50 et nous avons calculé pour chaque valeur de N_2 le coefficient optimal $\lambda_{Opt} = \text{trace}(G^t \cdot G)$.

A l'aide de cette simulation nous avons pu vérifier que le paramètre N_2 de la GPC a une incidence sur le temps de réponse conformément à ce que nous avons déjà évoqué dans le chapitre I. Avec un choix judicieux de ces paramètres nous avons pu stabiliser le système et par ailleurs lui imposer plusieurs dynamiques. Le choix de la dynamique voulue dépend des critères du cahier des charges imposé.

En observant les résultats de simulation obtenus, nous remarquons que la commande présente de plus en plus des pics importants lorsque on augmente la rapidité du système, ce

qui est logique parce qu'il faut de plus en plus une énergie importante dans un laps de temps réduit ce qui est traduit par des pics. Il faut remarquer une chose pour augmenter la rapidité du système en boucle fermée, il faut que la commande augmente en s'éloignant du point de fonctionnement ce qui peut altérer la robustesse de la commande.

En outre malgré qu'on a essayé de varier les paramètres de la GPC, mais on a pas pu diminuer d'avantage le dépassement de la consigne pour avoir une réponse apériodique sans dépassement.

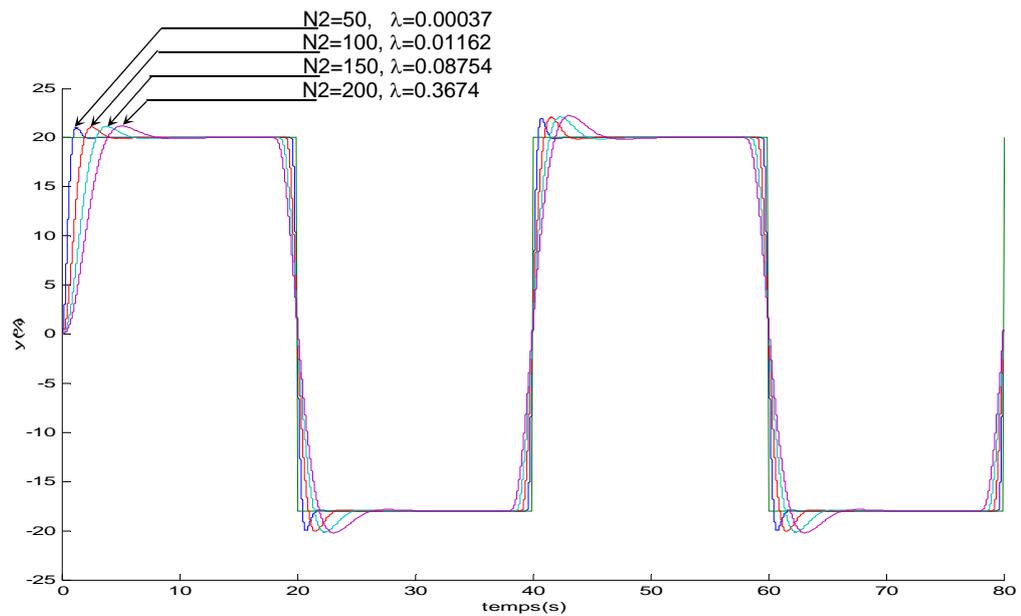


Figure: 4.6: Sortie du PMA pour plusieurs paramètres GPC

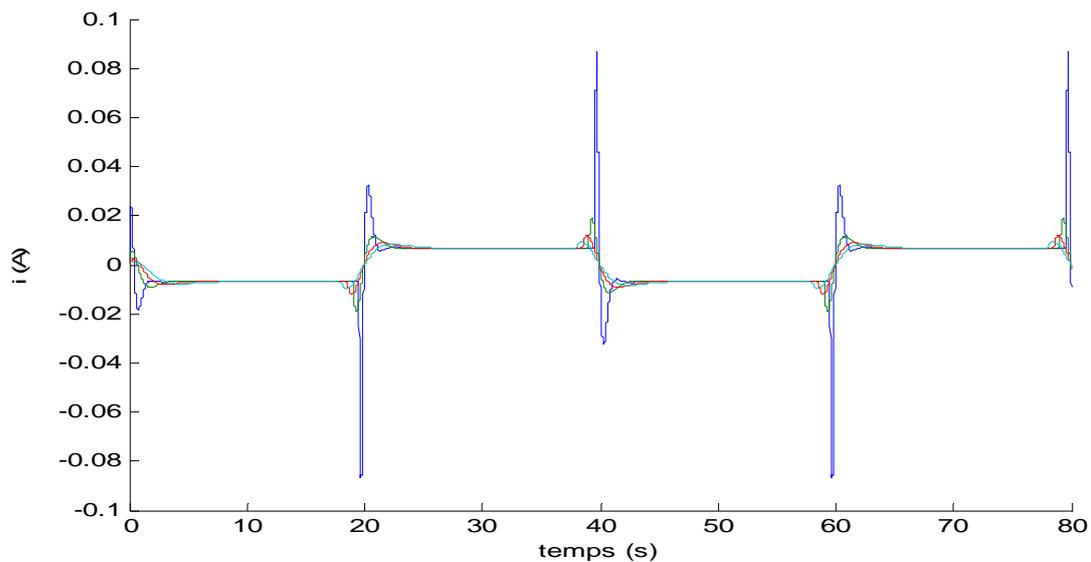


Figure 4.7 La Commande du PMA pour plusieurs paramètres GPC.

4.4.2. Influence de l'augmentation de la consigne

Dans cette simulation nous avons synthétisé la loi de commande GPC de base à partir d'un modèle linéaire et nous avons appliquée cette commande au modèle non linéaire. Cette simulation va nous permettre de voir le degré de robustesse de cette commande. En premier lieu nous allons augmenter l'amplitude de la consigne et voir le comportement de la sortie du modèle non linéaire pour un régulateur GPC avec les paramètres suivants: ($N1=1, N2=200, Nu=1, \lambda=0.3674$), puis on refait la même chose avec GPC($N1=1, N2=50, Nu=1, \lambda=0.00037$) pour voir la différence. Il faut remarquer une chose, c'est que le premier régulateur affère au PMA une dynamique lente, en revanche, le deuxième permet d'avoir une dynamique rapide.

En analysant les résultats de simulation obtenus, représentés par la figure 4.8 et 4.9, nous constatons que la commande est plus robuste dans le cas de dynamique lente, cas de GPC: ($N1=1, N2=200, Nu=1, \lambda=0.3674$) du fait qu'on a pu augmenter la consigne jusqu'à 80% de la plage de l'entrefer sans que le système perd sa stabilité. Par contre dans le cas de la dynamique rapide avec GPC($N1=1, N2=50, Nu=1, \lambda=0.00037$), nous n'avons pas pu dépasser 30% sans que le système diverge. Cet essai nous a montré qu'il y a un compromis qu'il faut établir entre la rapidité et la robustesse de la commande

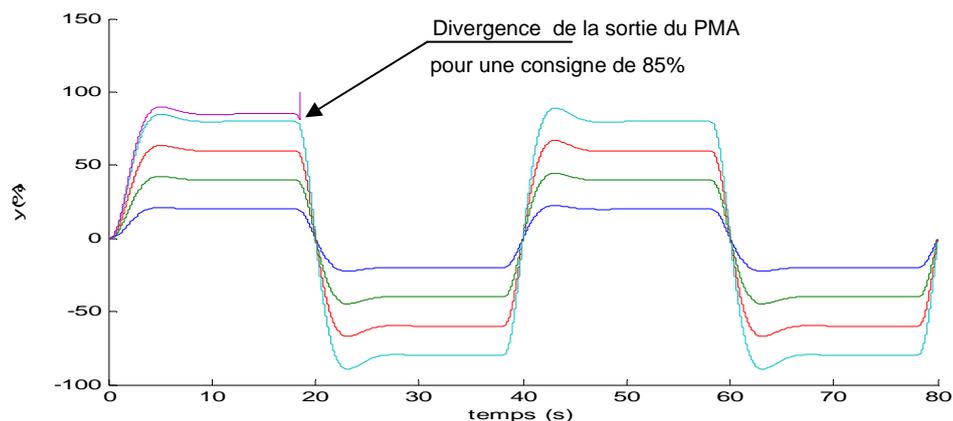


Figure 4.8 Réponse du PMA à plusieurs consignes
Cas dynamique lente avec GPC($N1=1, N2=200, Nu=1, \lambda=0.3674$)

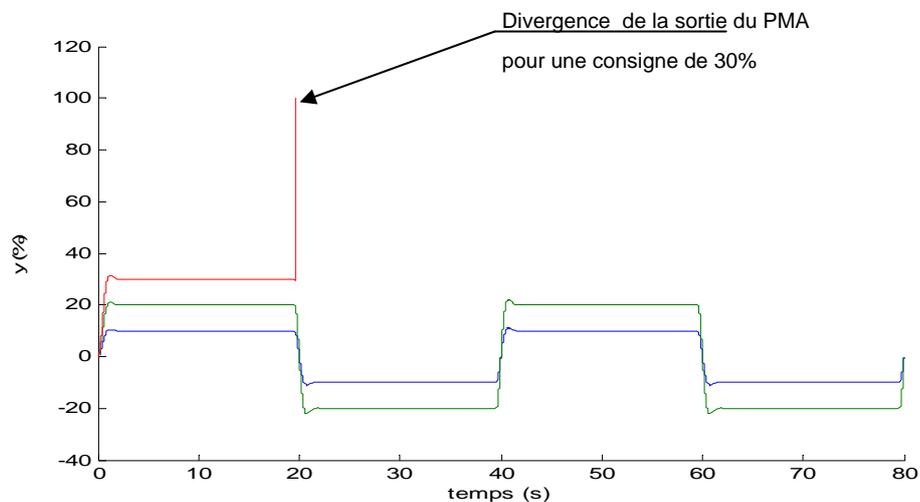


Figure 4.9: Réponse du PMA à plusieurs consignes
cas dynamique rapide avec GPC($N1=1, N2=50, Nu=1, \lambda=0.00037$)

4.5. Application de la GPCDMR au PMA

Dans cette application nous allons voir l'avantage d'utiliser la GPCDMR pour l'amélioration de la réponse de poursuite du modèle. Nous procéderons par comparaison entre la commande GPC et la commande GPCDMR évoquée dans le chapitre I, afin d'illustrer l'apport de cette technique dans l'amélioration des performances du système.

En analysants les résultats de simulation représentés par la figure 4.10 et 4.11, on constat que la GPCDMR a permis d'améliorer la réponse de poursuite du système, en réduisant le dépassement de consigne qui était important avec la GPC. Mais la réponse de régulation due à une perturbation est la même pour le cas des deux régulateurs GPC et GPCDMR. De point de vue commande la GPCDMR a tendance à adoucir la commande lors de la poursuite mais elle n'a aucun effet sur l'allure de la commande de régulation dans le cas d'élimination d'une perturbation.

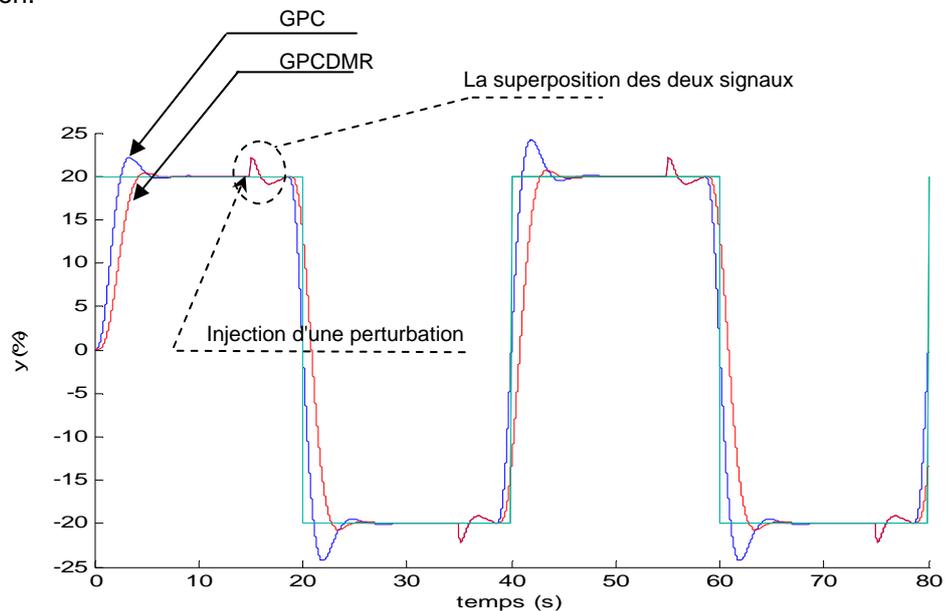


Figure: 4.10: La sortie du PMA
avec $N1=1, N2=150, Nu=1, \lambda=1$ (GPC, GPCDMR)

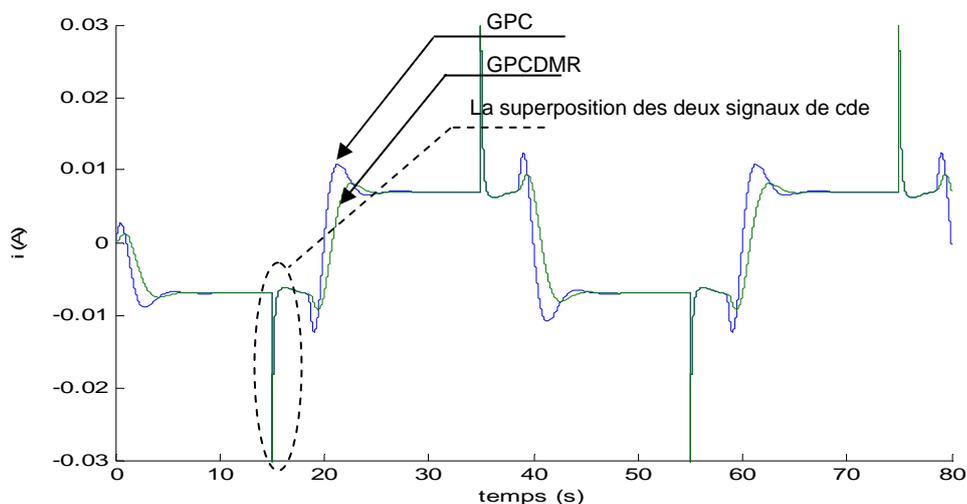
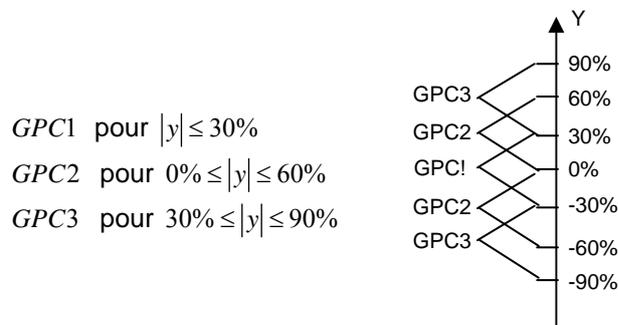


Figure: 4.11 La commande du PMA
pour les deux cas (GPC, GPCDMR)

4.6. Application du Multi-contrôleurs GPC au PMA

Cette approche est basée sur la synthèse de trois contrôleurs locaux GPC1, GPC2 et GPC3 respectivement autour des points de fonctionnement $(i_o, y_o) = (0A, 0\%)$, $(-0.01041A, 30\%)$ et $(-0.02099A, 60\%)$. Ces régulateurs sont sensés donner de bonnes performances localement au niveau de chaque point de fonctionnement. La commande globale est une commutation franche entre ces trois régulateurs selon une loi de supervision bien déterminée. Cette loi de supervision détermine le régulateur adéquat pour chaque contexte.

Les régulateurs utilisés sont en nombre de trois, de type GPC. La supervision est une supervision directe, synthétisée sur la base de la plage d'appartenance de la sortie du système. La commutation est franche, ce qui veut dire qu'il n'y a qu'un seul régulateur qui fonctionne à la fois. La loi de supervision est synthétisée directement sur la sortie du modèle, par franchissement de certains seuils conformément à la fonction suivante:



4.7. Comparaison entre la GPC et MGPC

a) Sans la présence de perturbations.

L'objectif de cette simulation est de voir l'utilité de la commande Multi-contrôleurs GPC. En premier lieu nous allons comparer la réponse du PMA dans les deux cas. Le premier cas avec seulement le régulateur GPC1, on augmente la consigne jusqu'à atteindre la valeur max sans perte de stabilité. Le deuxième cas on refait la même chose avec cette fois-ci la commutation entre les trois régulateurs GPC1, 2 et 3.

Les résultats de simulation sont donnés par les figures 4.12 pour le cas d'un seul régulateur GPC1, et par la figure 4.13 pour le cas MGPC. Nous constatons de ces résultats qu'il n'y a pas de grandes différences entre les deux réponses. Le PMA est stable que ce soit dans le premier ou le deuxième cas. La consigne max qu'on a pu atteindre sans perte de stabilité est 80% pour les deux cas.

Les résultats obtenus montrent jusqu'à maintenant qu'il n'y a pas de grandes différences entre la réponse du modèle régulé par un seul contrôleur GPC1 et le régulateur Multi-contrôleurs GPC, juste une légère différence dans la phase de poursuite. Pour justifier le choix de la solution de la commande Multi-contrôleurs GPC, nous devons voir la réponse du modèle aux perturbations.

b) Avec la présence d'une perturbation échelon

En deuxième lieu nous introduirons (à la sortie du PMA en BO) une perturbation signal carré de période égale à 20s et d'amplitude égale à 1.5% pour les deux cas, le cas de un seul régulateur et le cas de commutation entre les trois régulateurs.

Les courbes représentées par la figure 4.14, illustrent la divergence de la sortie du PMA commandé par le régulateur GPC1, juste au moment de l'injection de la perturbation à l'instant $t=15s$, à savoir que la même perturbation a été injectée au PMA, avec une consigne au voisinage du point de fonctionnement et elle a été rejetée facilement par le régulateur GPC1. Ce qui montre que l'élargissement de l'intervalle de consigne dans le cas du régulateur GPC1 conçu initialement pour satisfaire certaines performances au voisinage du point de fonctionnement $(i_o, y_o)=(0,0)$, n'est pas judicieux, du moment que la stabilité n'est pas garantie. En revanche dans le cas du régulateur MGPC il a réussi à rejeter la perturbation et il a gardé la stabilité du PMA, résultats de simulation consignés dans la figure 4.15.

Un autre essai de simulation a été réalisé, en maintenant la consigne à zéro et en augmentant l'amplitude de la perturbation de type échelon périodique de période 20s jusqu'à atteindre la valeur limite où il diverge le PMA. Alors on a obtenu les résultats représentés par la figure 4.18. La valeur max de l'amplitude de la perturbation qu'on a pu atteindre sans la perte de stabilité est 10.1%.

c) Avec la présence d'une perturbation aléatoire

Une autre expérience a été effectuée en injectant à la place de la perturbation signal carré, un signal aléatoire de moyenne nulle et de variance égale à 0.001. Les résultats de simulation illustrés par la figure 4.16 montrent que en présence d'une perturbation aléatoire la commande Multi-contrôleurs GPC réagit très bien, mais on remarque que la commutation est très sollicitée entre GPC2 et GPC3, notamment en régime établi. Ce ci est du au choix du point de consigne égale au seuil de commutation, en présence d'une perturbation aléatoire la fluctuation de la sortie autour de ce point de consigne se traduit par une commutation entre les régulateurs adjacents.

Dans le cas de présence de perturbations aléatoires et le point de consigne correspond au seuil de commutation alors afin de limiter la commutation répétée entre les deux régulateur adjacents on introduit un filtre au niveau de l'entrée du superviseur. Au lieu de faire la commutation sur la base de la mesure de la sortie on utilise la mesure filtrée ce qui a donné les résultats représentés par la figure 4.17. Cette solution trouve son importance lorsqu'il y a une commutation physique entre plusieurs régulateur GPC conçus de façon indépendants et

standard, mais elle est sans importance si la commutation entre les régulateurs GPC (Les régulateurs GPC ne sont que des blocs de calculs arithmétique) se fait à l'intérieur d'un calculateur numérique.

4.8. Réaction de la MGPC aux variations paramétriques

L'objectif de ces essais de simulation est de voir la robustesse de la commande MGPC face aux perturbations paramétriques. Dans la pratique les paramètres d'un PMA peuvent changer, citant l'exemple de l'augmentation de la masse du rotor suite aux dépôts de crasses qui s'entassent petit à petit au fil du temps, ou la diminution de la masse suite à l'érosion, aussi le cas d'un mauvais réglage du courant de pré-magnétisation. Il y en a d'autres exemples de variation paramétriques mais on va se contenter de ces exemples afin de tester la robustesse de la commande MGPC.

Les résultats de simulation illustrés par la figure 4.19 et 4.20 montrent le comportement de la commande MGPC face à cette perturbation paramétrique. En observant ces résultats de simulation du PMA nous remarquons que à l'instant de la variation de la masse rien ne s'est produit, que ce soit au niveau de la sortie ou de la commande, la réaction ne s'est produite que lorsqu'il y a eu une variation de la consigne la dynamique a changée et le PMA a divergé dans le cas de la figure 4.19, par contre il est resté stable dans le cas de diminution de la masse. En observant les équations dynamiques du PMA, ce résultat est logique puisque la masse n'intervient que lorsqu'il y a une variation de la sortie du PMA en l'occurrence la position.

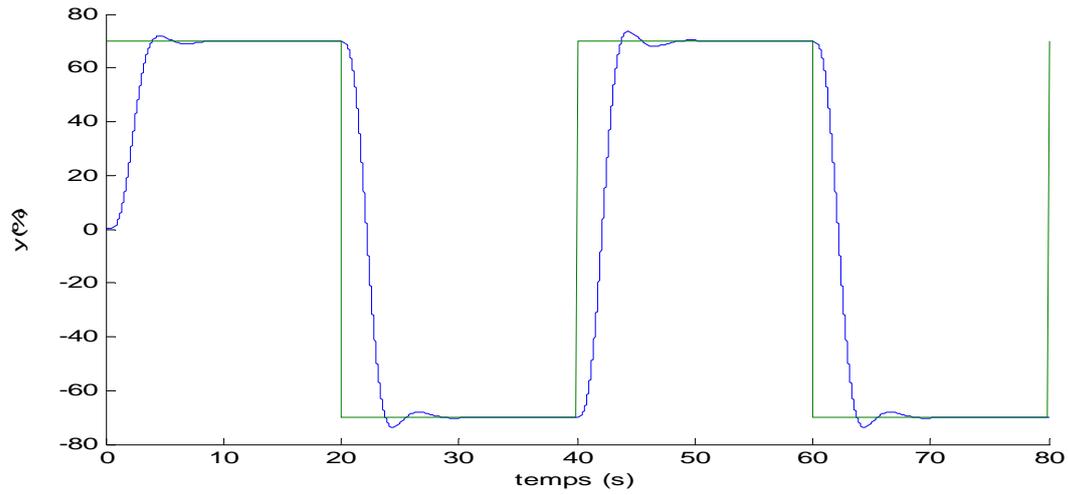
La variation du courant de pré-magnétisation influe directement sur la réponse du PMA et par conséquent sur la commande et la commutation. Ce qui est démontré par les résultats de simulation représentés par la figure 4.21. On voit clairement que au moment de la variation paramétrique du courant de pré-magnétisation d'une augmentation de 10mA qui est une valeur limite de stabilité, la sortie du PMA a enregistré une fluctuation. Cette fois-ci la réaction est différente à celle de la variation de la masse ce qui est aussi logique puisque le courant de pré-magnétisation intervient au niveau du gain de la fonction de transfert du PMA Ce qui nous avons déjà précisé au chapitre III, lorsqu'on a insisté sur la stabilisation parfaite de ce paramètre parce qu'il joue un rôle très important dans la stabilité du PMA.

4.9. Conclusion

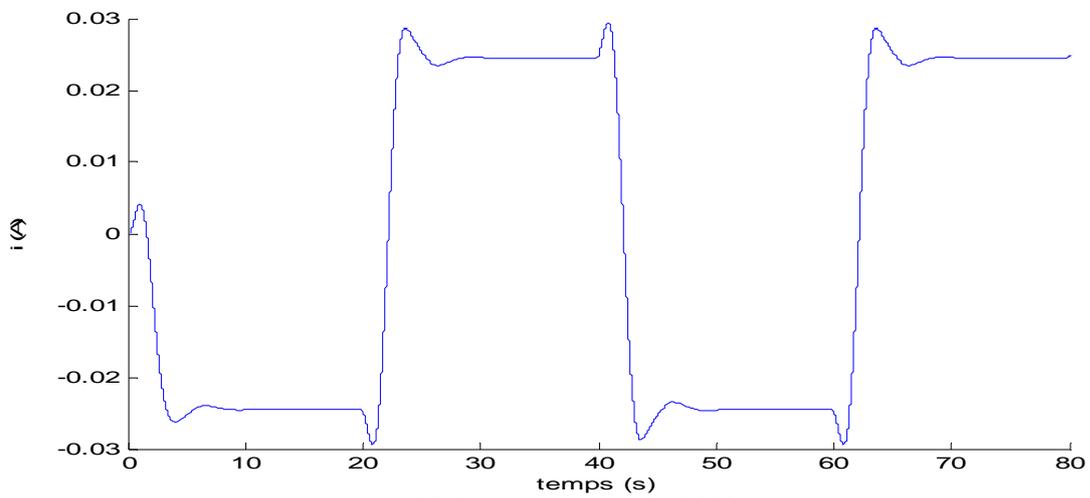
L'utilisation de la commande prédictive GPC a prouvé qu'elle donne de bons résultats au voisinage du point de fonctionnement autour duquel nous avons fait la linéarisation, mais elle

est insuffisante lorsqu'on conduit le système à des consignes lointaines du point de fonctionnement autour duquel nous avons conçu le régulateur GPC. En revanche la commande Multi-contrôleur GPC se comporte très bien et donne des résultats satisfaisants et couvre une bonne partie de l'intervalle d'appartenance de la consigne.

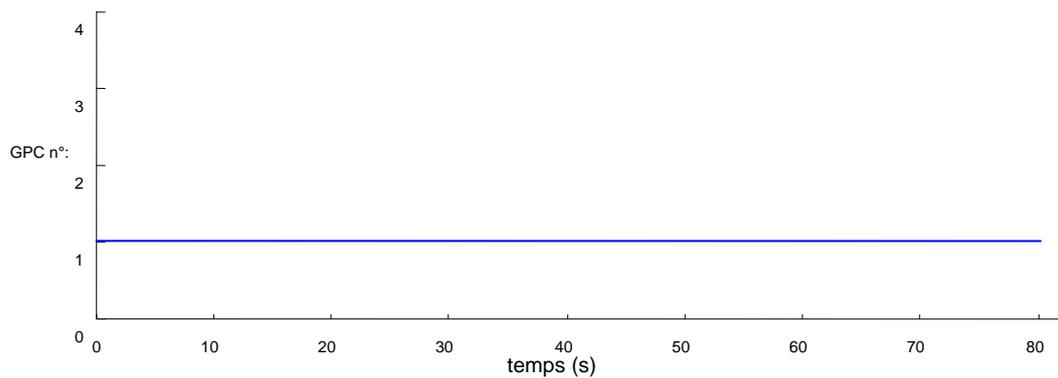
La commutation entre les régulateurs GPC locaux agit d'une manière à choisir le régulateur approprié pour chaque contexte. Ce qui augmente la fiabilité et la robustesse de cette technique de commande par rapport à la commande GPC de base et par rapport aux régulateurs conventionnels et classiques.



a) La sortie du PMA

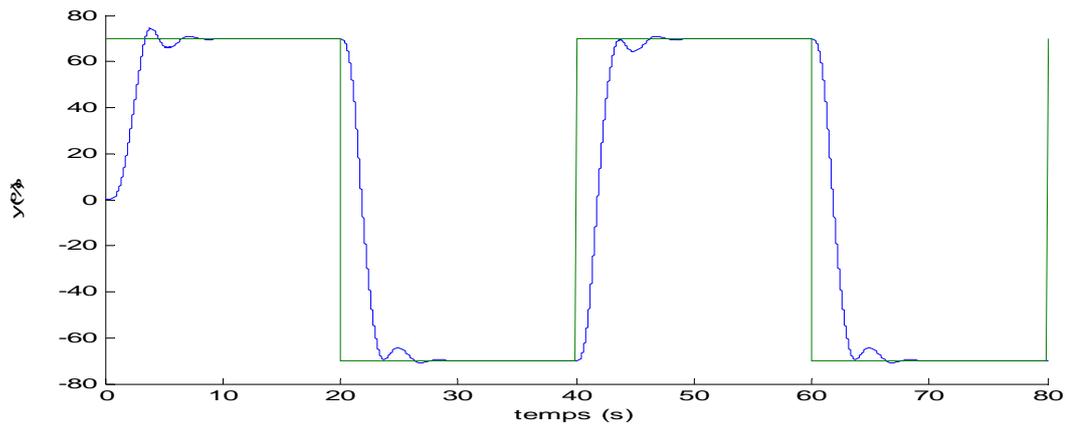


b) La commande du PMA

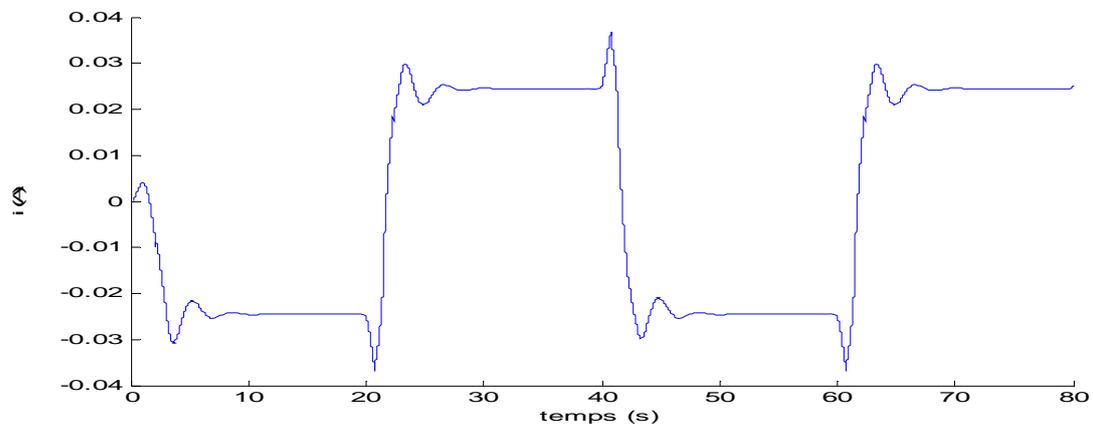


c) Régulateur actif GPC1

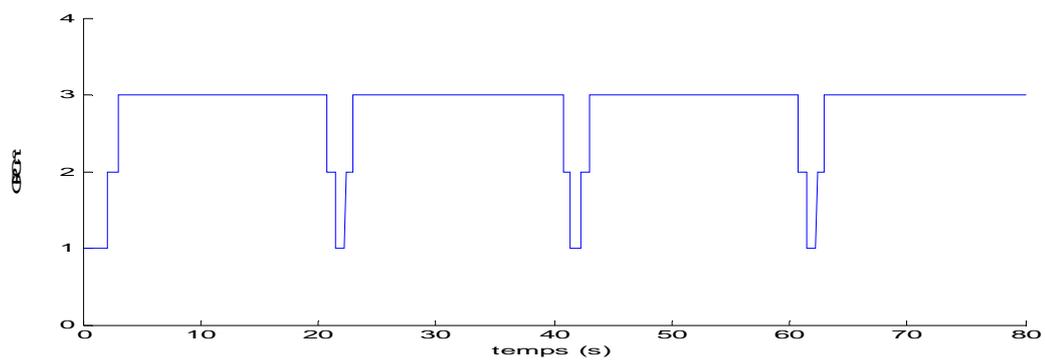
Figure 4.12 Application de GPC au PMA (sans présence de perturbations)
(cas avec un seul régulateur GPC1)



a) La sortie du PMA

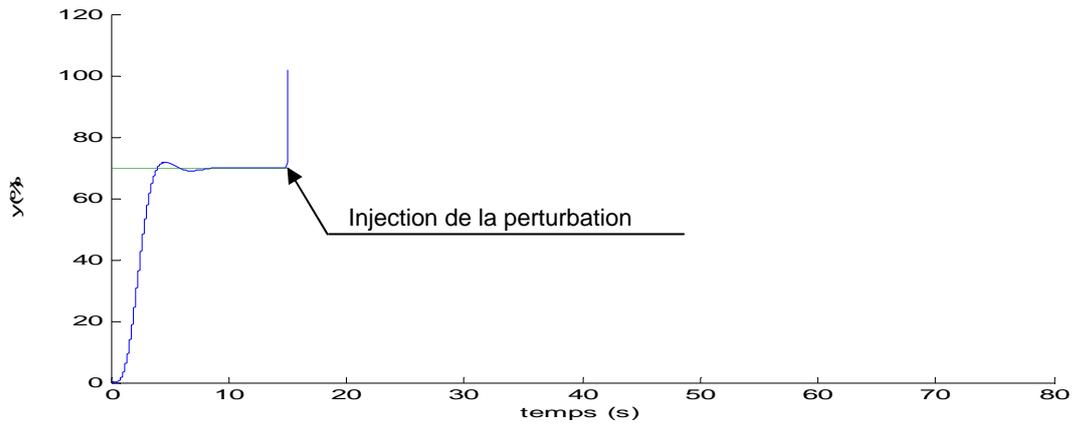


b) La commande du PMA

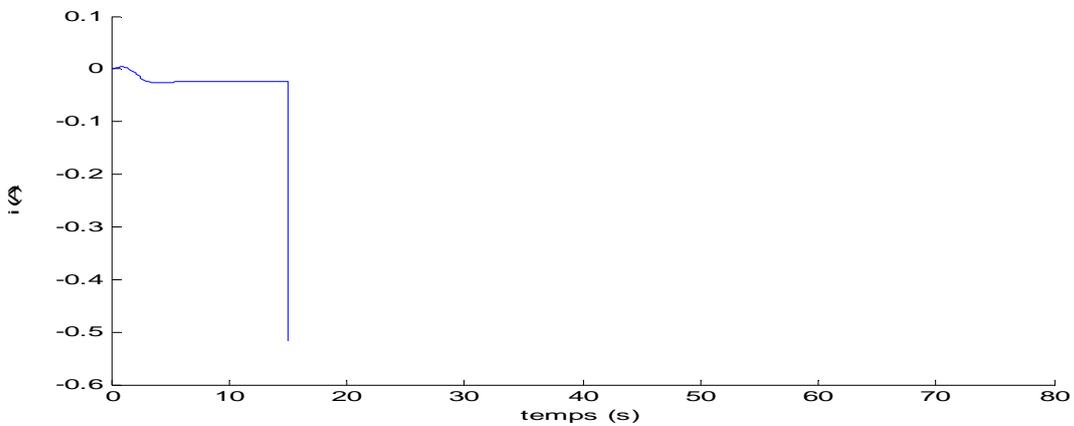


c) La commutation entre les trois régulateurs GPC.

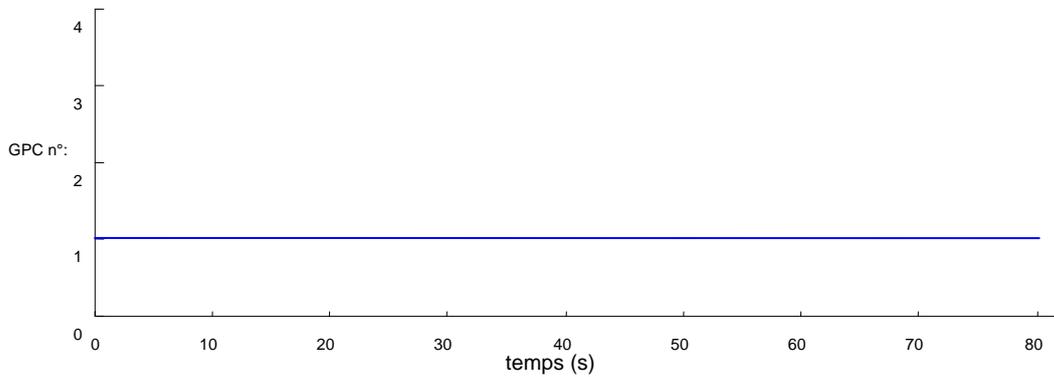
Figure 4.13 Application de MGPC au PMA (sans présence de perturbations)
 (cas avec un régulateur Multi-contrôleurs GPC)



a) La sortie du PMA



b) La commande du PMA



c) Régulateur actif GPC1

Figure 4.14 Application de la GPC au PMA (avec présence d'une perturbation échelon)
 (cas d'un seul régulateur, GPC1)

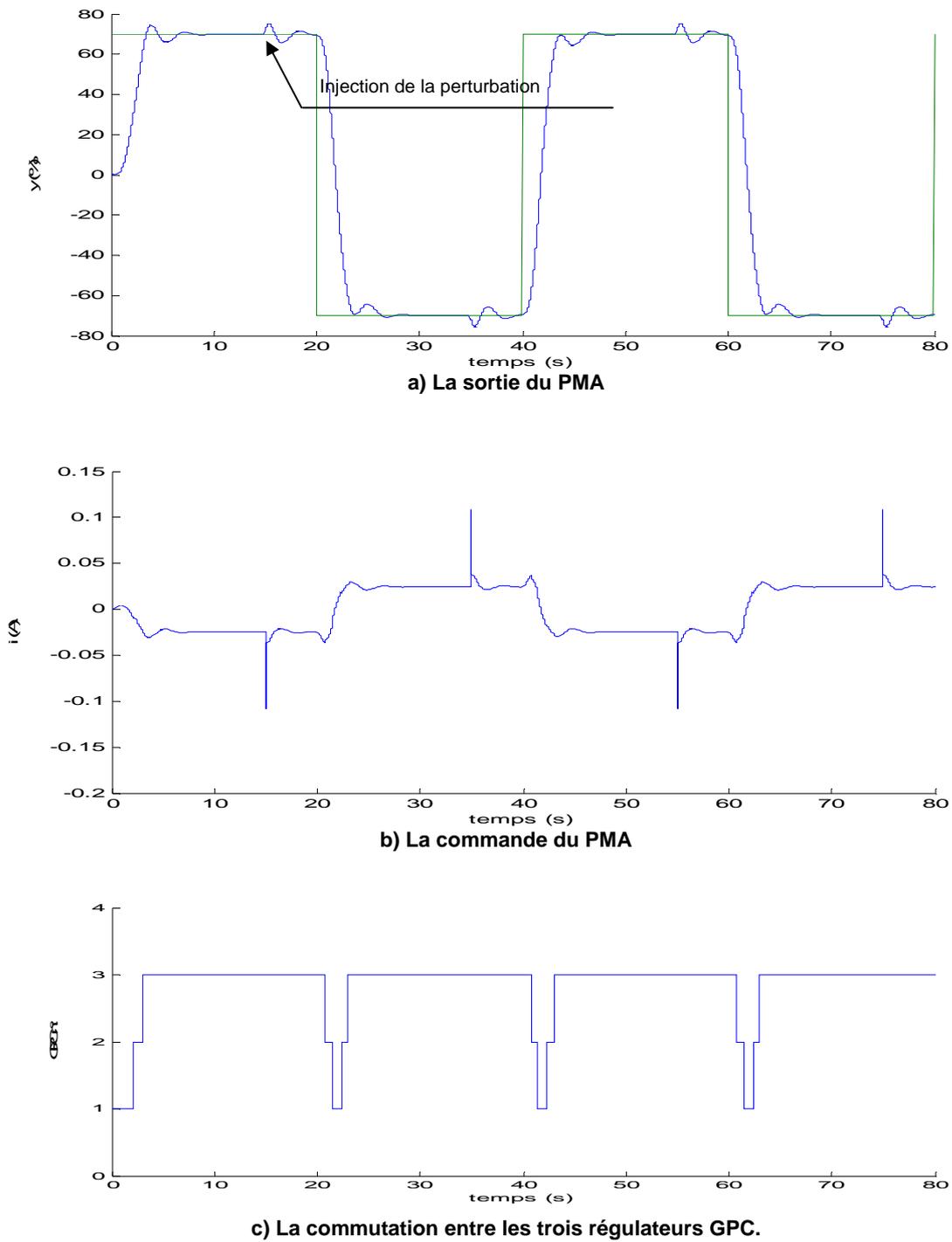


Figure 4.15 Application de MGPC au PMA (avec présence d'une perturbation échelon)
(cas du régulateur multicontrolleur GPC).

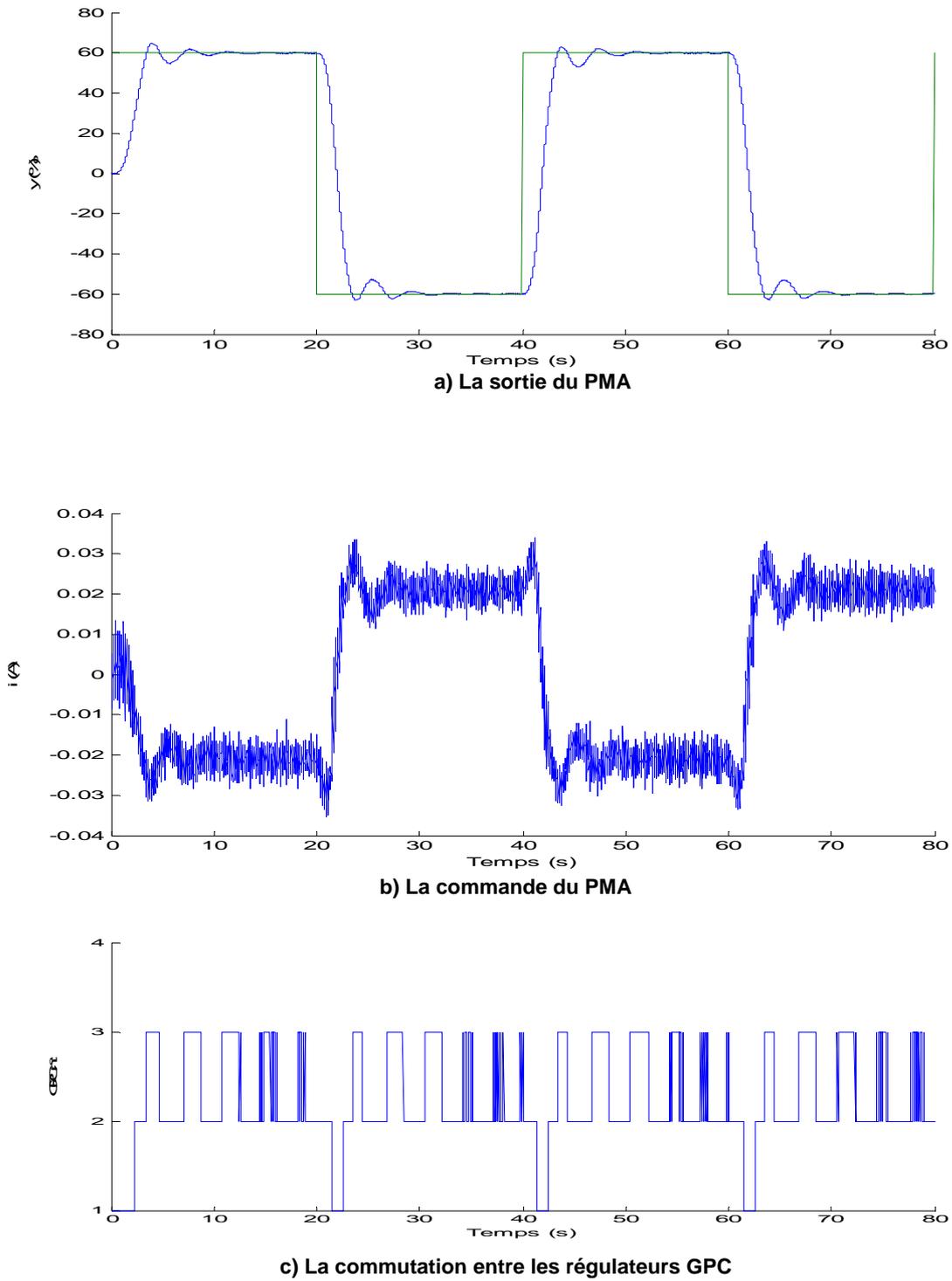
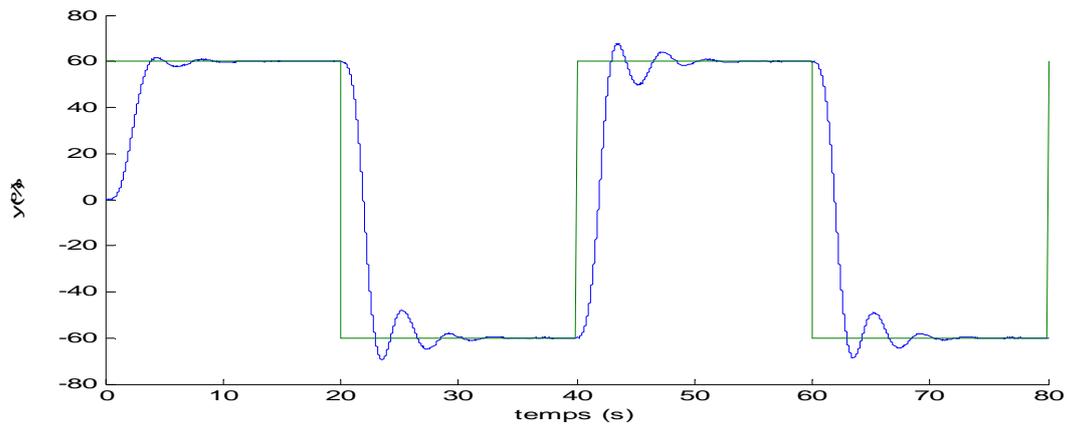
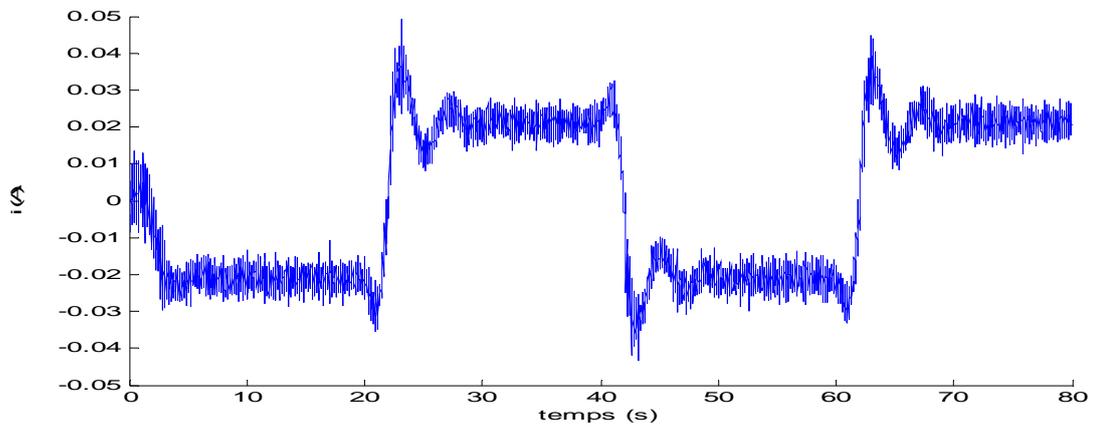


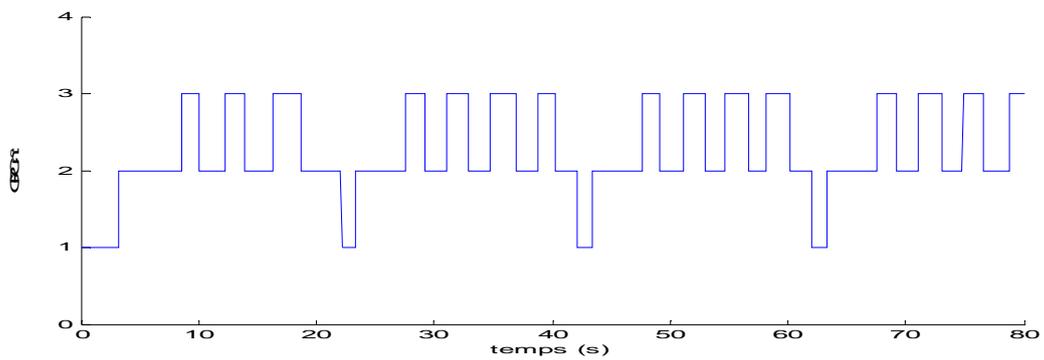
Figure: 4.16: Application de MGPC au PMA (avec présence d'une perturbation aléatoire)



a) La sortie du PMA

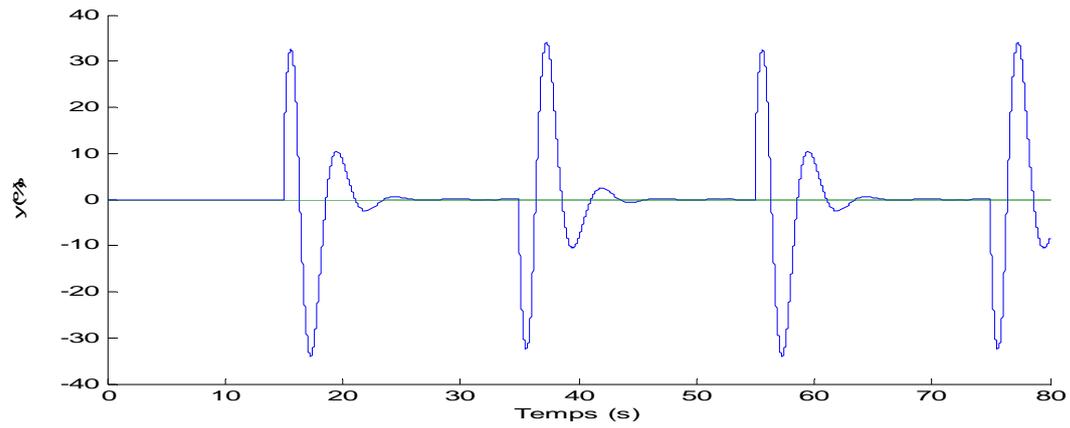


b) La commande du PMA

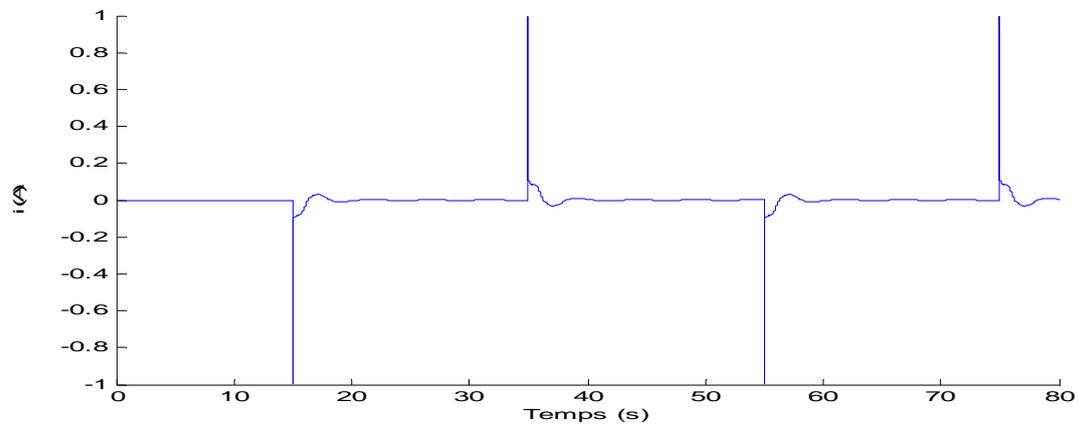


c) La commutation entre les régulateurs GPC

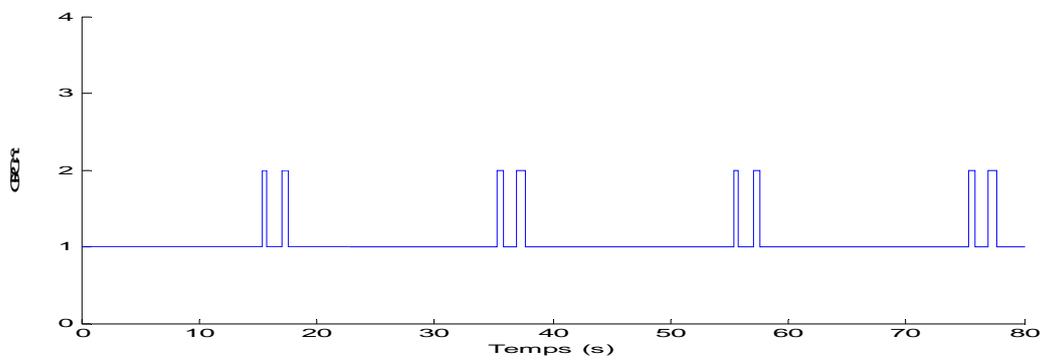
Figure: 4.17: Application de MGPC au PMA (avec présence d'une perturbation aléatoire)
.(cas de placement d'un filtre à l'entrée du superviseur)



a) La sortie du PMA



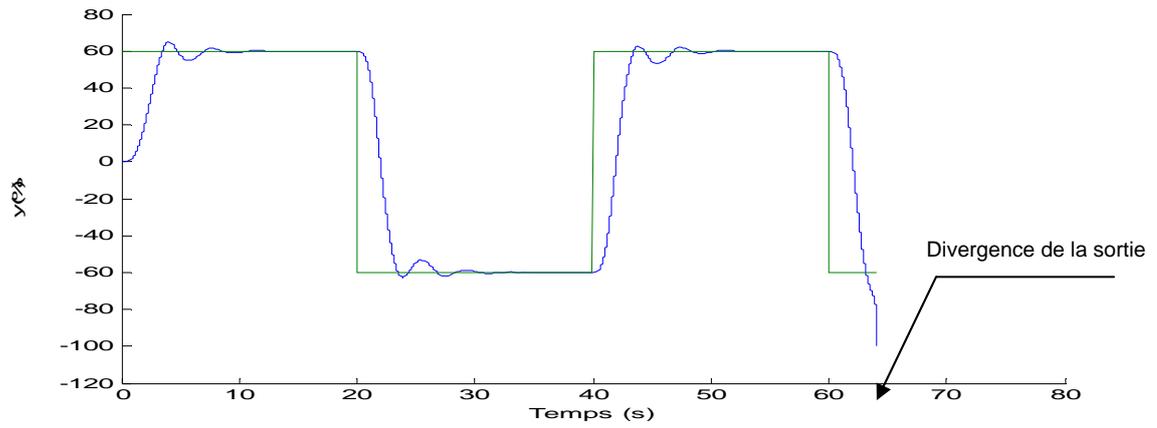
b) La commande du PMA



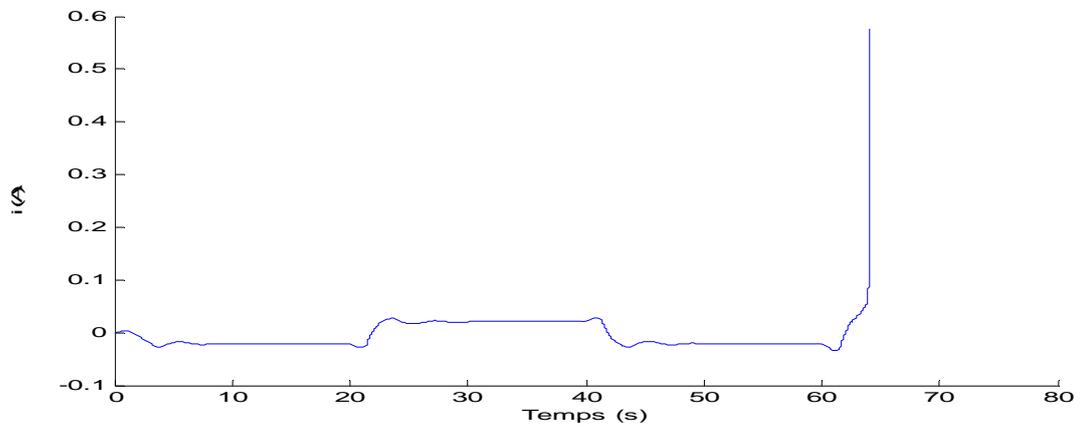
c) La commutation entre les régulateurs GPC

Figure 4.18 Réaction du régulateur MGPC aux perturbations échelon

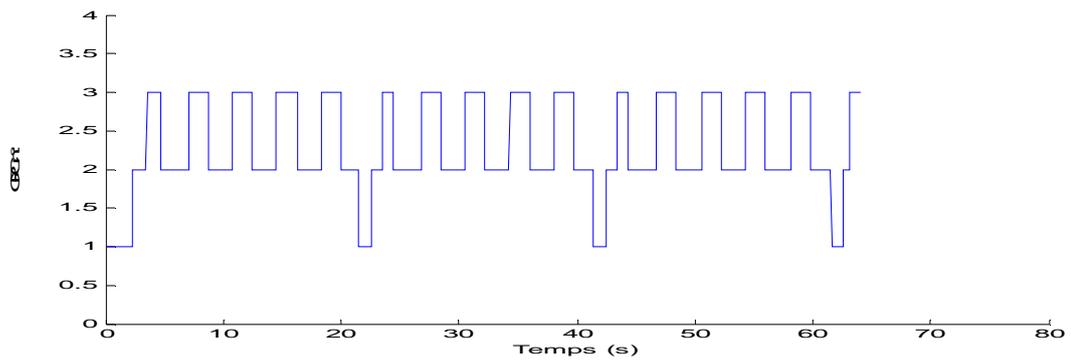
avec une consigne $w=0$



a) La sortie du PMA

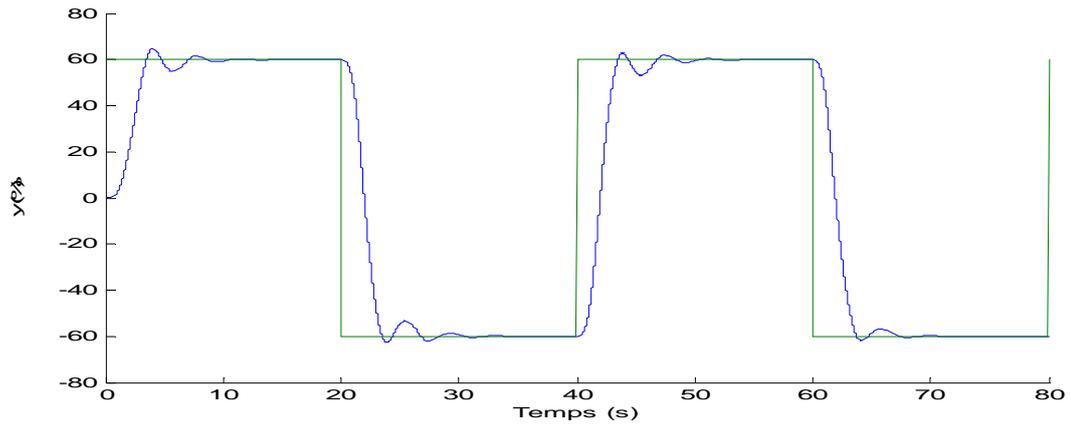


b) La commande du PMA

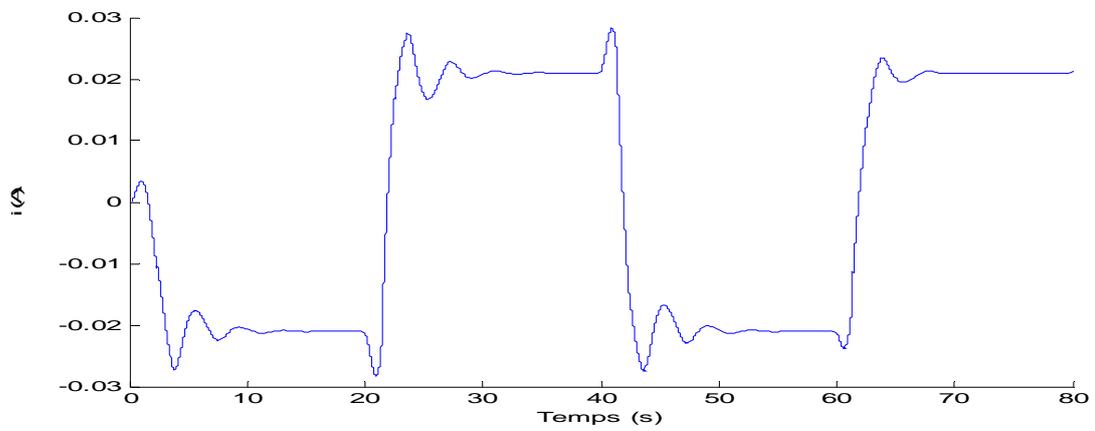


c) La commutation entre les régulateurs GPC

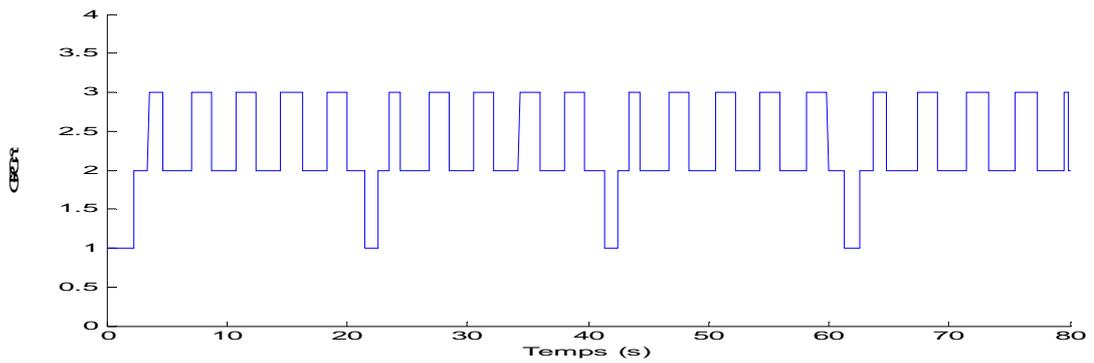
Figure 4.19 Réaction du régulateur MGPC à l'augmentation de la masse
 (augmentation de la masse de +4kg équivalent à 47.06% de la masse à l'instant $t=55s$)



a) La sortie du PMA

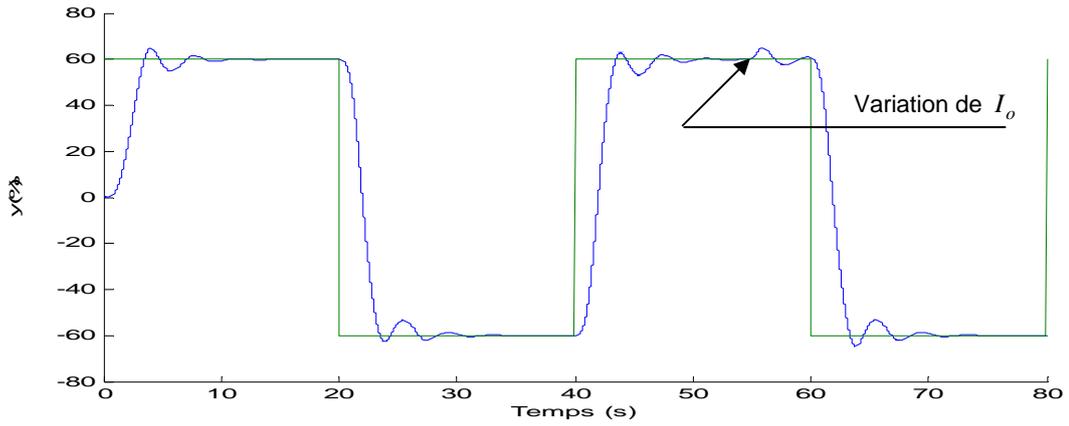


b) La commande du PMA

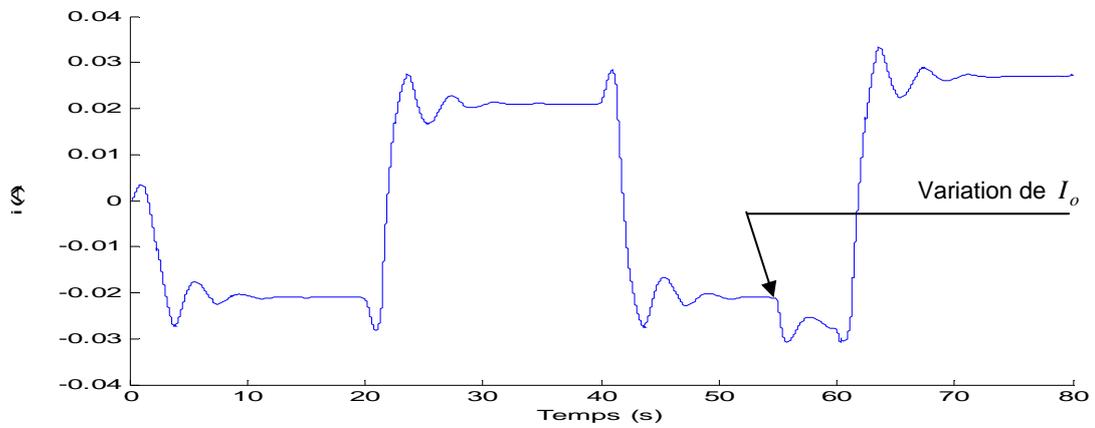


c) La commutation entre les régulateurs GPC

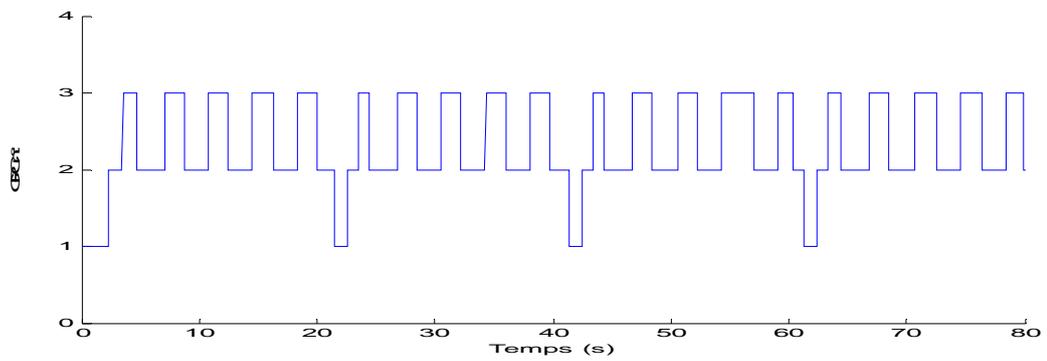
Figure 4.20 Réaction du régulateur MGPC à l'augmentation de la masse
(diminution de la masse de -4kg équivalent à 47.06% de la masse à l'instant $t=55s$)



a) La sortie du PMA



b) La commande du PMA



c) La commutation entre les régulateurs GPC

Figure 4.21 Réaction du régulateur MGPC à l'augmentation de la masse

(augmentation du courant de pré-magnétisation de +10mA équivalent à 28.6% de I_o à l'instant $t=55$ s)

Conclusion générale

Conclusion

Dans ce mémoire, nous avons développé plusieurs régulateurs prédictifs basés sur la commande prédictive généralisée GPC afin d'asservir les paliers magnétiques actifs. Nous avons montré la faisabilité et l'intérêt qu'apporte la commande prédictive dans la commande des paliers magnétiques actifs.

Après avoir constaté l'insuffisance de la commande GPC de base à garantir la stabilité du palier magnétique pour des consignes lointaines de point de fonctionnement, il est devenu impératif de consolider cette commande par la technique de commande Multi-contrôleurs. Le passage à la commande Multi-contrôleurs GPC est justifié, car elle a permis d'avoir de bons résultats même en s'écartant d'une manière importante du point de fonctionnement. Cette technique de commande Multi-contrôleurs a contribué d'une façon générale à l'élargissement de champs d'application des techniques de commande linéaire à des systèmes non linéaires. Nous avons démontré moyennant la simulation comment la commande Multi-contrôleurs GPC est efficace dans l'asservissement du PMA.

Le système à PMA est un système fortement non linéaire et la présence d'une limitation physique de la grandeur de sortie a compliqué d'avantage la maîtrise de ce système. Par conséquent l'asservissement de ce système nécessite l'emploi d'une technique de commande à la fois puissante et facile à implémenter. La commande GPC a permis la commande des systèmes à PMA. Elle a pu stabiliser le système qui était initialement instable en boucle ouverte et d'avoir de bonnes performances quant au temps de réponse et au rejet des perturbations à condition de ne pas s'écarter beaucoup du point de fonctionnement autour duquel on a synthétisé cette commande GPC.

L'introduction de commande Multi-contrôleurs GPC a permis de commander le système pour des consignes lointaines du point zéro et de balayer pratiquement une bonne partie de la plage de la sortie du système. Cette approche a apporté une solution efficace qui a aplanit les difficultés liées intimement à la commande des systèmes non linéaires. À l'aide de cette technique de Multi-contrôleurs GPC nous avons pu élargir d'avantage le champ d'application de la GPC à des systèmes fortement non linéaire avec limitation de grandeur de sortie.

Du moment que nous avons vu l'efficacité de cette commande dans l'asservissement des paliers magnétiques, ça serait très important d'appliquer cette fois-ci ces techniques dans la commande des rotors suspendus par des paliers magnétiques. Le modèle d'état de ces systèmes est de l'ordre douze états [FER].

La chose la plus intéressante à faire est d'asservir les rotors lévités sur des PMA afin de diminuer les vibrations mécaniques. Cette opportunité qu'offre le PMA, celle de faire l'équilibrage actif des rotors est très intéressante, et sujet d'actualité dans les recherches.

Bibliographie

- [CAM-05] Joaquin Campos, Mark Crawford, Raul Longoria, "**Rotor Dynamic Modeling Using Bond Graphs: Modeling the Jeffcott rotor**", IEEE, Transactions on magnetics, vol. 41, N°1 January 2005 PP.274-280.
- [LAN-05] Alexander Lanzon, Panagiotis Tsiotras, "**A Combined Application of H_∞ Loop-Shaping and μ -Synthesis to Control High Speed Flyweels**", vol. 13 N°5, PP.766-777, 2005.
- [DEB-04] Debin Li, Shuqin Liu, Wentao Yu, Jiasheng Guo, "**The Simulation of the Active Magnetic Bearing-Rotor system Based on nonlinear Model**", Proceedings of the 5th world congress on intelligent control and Automation, June 15-19, 2004 Hangzhou, P.R. China, PP.3339-3343 IEEE.
- [HU-02] Tingshu Hu, Zongli Lin, Wei Jiang, Paul E. Allaire, "**Constrained Control Design for Magnetic Bearing Systems**", PP.26.
- [PAG-01] Olivier Pages: "**Etude et comparaison de différentes structures de commande Multi-contrôleurs. Application à un axe robotisé**", Université de Savoie, Thèse de Doctorat, 2001, 245p.
- [KEV-99] Kevin R. Kefauver, Gregory C. Walsh, Louis P. Hremada, Jr. James A. Kirk, Ronald B. Zmood, "**A 50wh Oper Core High-speed Flywheel**", 1999 Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, P.6.
- [STE-99] Norbet Steinschaden, Helmut Springer, "**Some Nonlinear Effects of Magnetic Bearings**", Proceeding of the 1999 ASME Design Engineering Technical Conferences, September 12-15, 1999, Las Vegas, Nevada, USA. P9.
- [NA-97] H.S.NA, Y. Park, "**An Adaptive Feedforward Controller for Rejection of Périodic Disturbances**", Journal of sound and vibration 1997, 201(4), PP.427-435.
- [QUE-97] M.S. de Queiroz, D.M. Dawson, and A. Suri, "**Nonlinear Control of a Large Gap 2-DOF Magnetic Bearing System Based on a Coupled Force Model**", Proceedings of the American Control Conference, June 1997 AACC, 2165-2169
- [BOU-96] Boucher P., Dumur D. "**La Commande Prédictive**", Méthodes et pratiques de l'ingénieur, 1996, 165p.

- [BIT-96] R. Bitmead R., Gevers M., Wertz V. "**Adaptive Optimal Control, The Thinking Man's GPC**", Prentice Hall International Series in systems and Control Engineering, 1990, 244p.
- [PON-96] Jean-Christophe Ponsart, "**Asservissements Numériques de Paliers Magnétique Application aux Pompes à vide**", Université de Savoie, Thèse de doctorat, 1996, 137p.
- [RUN-96] Ann E. Rundell, V. Drakunov, Raymond A. DeCarlo, "**A Sliding Mode Observer and Controller for Stabilisation of Rotational Motion of a Vertical Shaft Magnetic Bearing**", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 4, N°5, September1996, PP.598-608.
- [LUM-96] Kai-Yew Lum, Vincent T. Coppola, Dennis S. Bersntein, "**Adaptive Autocentring Control for an Active Magnetic Bearing Supporting a Rotor with Unknown Mass Imbalance**", IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol.4, N°5, September1996, PP.587-597.
- [BAL-96] Bali N. "**Etude de la commande prédictive généralisée application aux bras manipulateur PUMA et SCARA**" Thèse de Magister, 1996, 159 p.
- [RUS-95] Russell D. Smith and William F. Weldon, "**Nonlinear Control of a Rigid Rotor Magnétic bearing system: Modeling and simulation with full state feedback**", IEEE Transactions on magnetics, vol. 31,N°2 March1995. PP.973-980
- [SHA-94] B. Shafai, S. Beale, P. LaRocca, E. Cusson, "**Magnetic Bearing Control Systems and Adaptive forced Balancing**", IEEE Control Systems, April1994, P.4-13.
- [BEA-92] S. Beal, B. Shafai, P. LaRocca, E. Cusson, "**Adaptive Forced Balancing for Magnetic Bearing Control Systems**", Proceedings of the 31st conference on Decision and Control Tuson, Arizona. December1992, IEEE PP.3535-3539.
- [BOR-90] Joël Bordeneuve-Guibe : "**Commande Prédictive Adaptative Application à des Procédés Thermiques**", Université Paul Sabatier, Thèse de Doctorat, année 1990, 133p.
- [LAR-90] P. LaRocca, D. Fermental, E. Cusson, "**Performance Comparaison between Centralized and Decentralized Control of the Jeffcott Rotor**", The Charles Stark Draper Laboratory, Inc.555 Technology Square, Combridge, MA.02139, PP.193-198.
- [SCH] Schweitzer G., "**Active Magnétic Bearings –Chances and limitations**", International center of magnetic bearings, ETH Zurich, CH-8092 Zurich, 14P.

- [FER] Denis Fermental, Peter LaRocca, Edward Cusson, "**A Decomposition of the Jeffcott Rotor**", The Charles Stark Draper Laboratory, Inc.555 Technology Square, Cambridge, MA.02139, PP.187-192.
- [LÖW] J. Von Löwis, J. Rudolph, F. Woittennek, "**Discrete-Time Flatness-Based Control of an Electromagnetically Levitated Rotating Shaft**", Institut für Regelungs-und Steuerungstheorie Technische Universität Dresden, Mommsenstr. 13 D-01062 Dresden, Germany. PP.8.
- [HAB] Helmut HABERMANN, "**Paliers magnétiques**", Techniques de l'ingénieur, B5345, 20p.

ملخص

هذا العمل يقدم مساهمة التحكم التنبؤي المعمم في التحكم في الأنظمة ذات المحمل المغناطيسي الفعال سنقدم بشكل أساسي تقنيتين تعتمدان على التحكم التنبؤي المعمم. الأولى تعتمد على تطبيق التحكم التنبؤي المعمم على النمط اللاخطي للنظام ودراسة مدى استطاعته التغلب على الاضطرابات وتوسيع مجال الجوارى لنقطة الاشتغال. الثانية تعتمد على استعمال عدة منظمات ذات التحكم التنبؤي المعمم التي جهزت خصيصا لمجال الاشتغال محدد والقيام بالتناوب على هذه المنظمات بشكل يضمن التحكم بطريقة تلبى دفتر الشروط وفي الأخير قمنا بدراسة مقارنة بالاستعمال المحاكاة لنرى مدى فعالية كل تقنية.

كلمات مفتاحية : التحكم التنبؤي المعمم, التحكم متعدد المنظمات, المحمل المغناطيسي الفعال, الرفع المغناطيسي.

Résumé

Ce mémoire présente une contribution de la commande prédictive généralisée (GPC) dans l'asservissement des systèmes à palier magnétique actif (PMA). On présente deux techniques basées sur la GPC. La première approche consiste à appliquer la GPC sur le modèle non linéaire du système et étudier sa robustesse à l'encontre de l'élargissement de la plage de voisinage du point de fonctionnement et aux perturbations. La deuxième est fondée sur la synthèse de plusieurs contrôleurs GPC locaux et commuter entre ces derniers d'une façon adéquate afin d'avoir une commande globale qui satisfait les performances exigées dans le cahier des charges. En dernier lieu on établit une étude comparative moyennant la simulation pour voir l'efficacité de chaque technique. L'étude est ouverte pour le cas de SISO comme pour le cas d'un MIMO.

Mot clé : Commande GPC, Commande Multi-contrôleurs, Palier Magnétique Actif, Lévitacion magnétique,

Abstract

These theses present a contribution of generalized predictive control (GPC) in control of plants with active magnetic bearing (AMB). We present essentially two techniques based on GPC. The first approach consists to apply the GPC to nonlinear model of the plant, and to study its robustness in case of large intervals of operating point neighborhood and in presence of disturbances. The second one, on designing of many local GPC controllers, and to commute between them to get a global command, which satisfies the specification performances. Finally, we make a comparative study to see the efficiency of each technique. The study is carried out for SISO case as well as for MIMO case.

Key word: Control GPC, Multi Controllers, Active Magnetic Bearing, Magnetic levitation