

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahman Mira – Béjaïa –
Faculté de TECHNOLOGIE



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Automatique et informatique industrielle

Par : Kebbiche M'hand

Sujet

Commande prédictive d'un actionneur électromécanique

Encadré par : Mr K.OUARI

Soutenu devant le jury composé de :

Mr. H.Lehouche

Mr. A.Charikh

Année Universitaire 2017/2018

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma reconnaissance.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma gratitude à Monsieur Ouari Kamel, mon encadreur, pour ses conseils et suggestions avisés qui m'ont aidées à mener à bien ce travail et d'avoir rapporté à ce mémoire ses remarques et conseils.

Je remercie les membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'être examinateurs de mon mémoire. En l'occurrence :

Mr. H.Lehouche

Mr.A.Charikh

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers mes proches et amis qui m'ont apporté leur support moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

SOMMAIRE

Introduction générale	1
-----------------------------	---

CHAPITRE I

ETAT D'ART DE LA COMMANDE AVANCEE

I.1 Introduction	2
I.2 Différentes commandes avancées	2
I.2.1 Commande adaptative	2
I.2.2 Commande optimale	3
I.2.3 Commande neuronale.....	4
I.3 Commande prédictive	6
I.3.1 Principe de la commande prédictive	6
I.3.2 Approches de la commande prédictive	7
I.3.2.1 Commande prédictive PFC (commande prédictive fonctionnelle)	7
I.3.2.2 Commande prédictive DMC (commande par matrice dynamique)	8
I.3.2.3 Commande prédictive généralisé GPC (commande prédictive généralisée)	8
I.3.2.4 EPSAC (Extended Prediction Self-Adapted)	8
I.3.2.5 EHAC (Extended Horizon Adaptive Control).....	9
I.3.3 Essors de la commande prédictive	9
I.3.4 Domaines d'application de la commande prédictive	10
I.3.5 Les avantages de la commande prédictive	10
I.4 Conclusion	11

CHAPITRE II

MODELISATION DU MOTEUR A COURANT CONTINU

II.1 Introduction	12
II.2 Description d'une machine à courant continu	12

II.3 Constituants de la machine à courant continu	12
II.4 Les différents types des moteurs à courant continu	13
II.4.1 Les moteurs à inducteur à aimant permanent	13
II.4.2 Les moteurs à inducteur bobiné	13
II.5 Domaines d'utilisation des moteurs à courant continu	15
II.6 Modélisation	15
II.6.1 Equation différentielle	15
II.6.2 Equation d'état	17
II.6.3 Fonction de transfert d'un MCC	17
II.7 Simulation numérique du MCC	18
II.8 Conclusion	19

CHAPITRE III

COMMANDE PREDICTIVE DU MOTEUR A COURANT CONTINU

III.1 Introduction	20
III.2 Commande prédictive linéaire mono-variable	20
III.2.1 Principe de la régulation prédictive	20
III.3 Régulation prédictive linéaire	23
III.4 Résultats de la simulation	26
III.4.1 Résultats de simulation de la GPC à vide	26
III.4.2 Résultats de simulation de la GPC en charge	28
III.4.3 Résultats de simulation de la GPC sens inverse	29
III.4.4 Résultats de simulation de la GPC pour les variations paramétriques	30
III.5 Conclusion	37
CONCLUSION GENERALE	38
BIBLIOGRAPHIE	39
ANNEXE	41

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Fig. (I.1) : Commande à gain programmé	3
Fig. (I.2) : Un neurone dans la J ème couche	5
Fig. (I.3) : Commande prédictive à base de modèle.....	6
Fig. (I.4) : Stratégie de la commande prédictive.	7

Chapitre II

Fig. (II.1) : Construction d'une machine à courant continu	12
Fig. (II.2) : Schéma électrique de l'excitation shunt	13
Fig. (II.3) : Schéma électrique de l'excitation série	14
Fig. (II.4) : Schéma électrique de l'excitation composée.....	14
Fig. (II.5) : Schéma d'un moteur à courant continu	15
Fig. (II.6) : Schéma fonctionnel du moteur à courant continu	18
Fig. (II.7) : Vitesse de rotation du rotor	18
Fig. (II.8) : Courant.....	19

Chapitre III

Fig. (III.1) : Schéma bloc de la commande prédictive d'un MCC.....	26
Fig. (III.2) : Suivi de consigne à vide pour $T_p=0.001s$	26
Fig. (III.3) : Erreur de vitesse pour $T_p=0.001s$	27
Fig. (III.4) : Erreur de vitesse pour $T_p=0.002s$	27
Fig. (III.5) : Erreur de vitesse pour $T_p=0.003s$	27
Fig. (III.6) : Suivi de consigne en charge pour $T_p=0.001s$	28
Fig. (III.7) : Erreur de vitesse en charge pour $T_p=0.001s$	28
Fig. (III.8) : Erreur de vitesse en charge pour $T_p=0.002s$	28

Fig. (III.9) : Erreur de vitesse en charge pour $T_p=0.003s$	29
Fig. (III.10) : Suivi de consigne inverse pour $T_p=0.001s$	29
Fig. (III.11) : Erreur de vitesse pour $T_p=0.001s$	29
Fig. (III.12) : Erreur de vitesse pour $T_p=0.002s$	30
Fig. (III.13) : Erreur de vitesse pour $T_p=0.003 s$	30
Fig. (III.14) : Schéma bloc des variations paramétriques du MCC.....	31
Fig. (III.15) : Suivi de consigne à vide pour $T_p=0.001s$	31
Fig. (III.16) : Erreur de vitesse à vide pour $T_p=0.001s$	31
Fig. (III.17) : Erreur de vitesse à vide pour $T_p=0.002s$	32
Fig. (III.18) : Erreur de vitesse à vide pour $T_p=0.003s$	32
Fig. (III.19) : Suivi de consigne en charge pour $T_p=0.001s$	32
Fig. (III.20) : Erreur de vitesse en charge pour $T_p=0.001s$	33
Fig. (III.21) : Erreur de vitesse en charge pour $T_p=0.002s$	33
Fig. (III.22) : Erreur de vitesse en charge pour $T_p=0.003s$	33
Fig. (III.23) : suivi de consigne à vide pour $T_p=0.001s$	34
Fig. (III.24) : Erreur de vitesse à vide pour $T_p=0.001s$	34
Fig. (III.25) : Erreurs de vitesse à vide pour $T_p=0.002s$	34
Fig. (III.26) : Erreurs de vitesse à vide pour $T_p=0.003s$	34
Fig. (III.27) : Suivi de consigne en charge pour $T_p=0.001s$	35
Fig. (III.28) : Erreur de vitesse en charge pour $T_p=0.001s$	35
Fig. (III.29) : Erreur de vitesse en charge pour $T_p=0.002s$	35
Fig. (III.30) : Erreurs de vitesse en charge pour $T_p=0.003s$	36

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale :

Le progrès de l'informatique et de l'automatique, ont provoqués des changements importants dans la conception des lois des systèmes de commande/régulation. Ce développement a poussé plusieurs laboratoires de recherche à travailler sur des stratégies de commandes évoluées basées sur les méthodes de l'automatique.

Parmi les différentes possibilités des systèmes à commander, on trouve la machine à courant continu qui a fourni le premier actionneur électrique performant pour la variation de vitesse. Ceci est essentiellement dû à la simplicité des lois de contrôle.

Le but de ce mémoire dans un premier lieu est de présenter une multitude de techniques de commandes, ensuite la mise en œuvre d'une loi de commande prédictive généralisée à temps continu mono-variable au moteur à courant continu avec comme objectif améliorer la poursuite de trajectoire et le rejet de perturbations.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous allons présenter l'état d'art des différentes stratégies de commandes, ensuite nous nous étalerons sur la présentation de la commande prédictive qui est le sujet de notre travail.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons le moteur à courant continu et les différents types de ce dernier, par la suite on établit son modèle mathématique (équation différentielle, modèle d'état, et la fonction de transfert) pour finir avec la simulation du modèle choisi.

Dans le troisième chapitre, à partir du modèle d'état nous développerons mathématiquement la commande prédictive mono variable à temps continu pour synthétiser ensuite la commande adéquate à notre système, au final le schéma bloc établi sera simulé numériquement avec Simulink/Matlab pour différents temps de prédiction et différentes variations des paramètres, afin de visualiser le comportement du système étudié.

Et nous terminerons par une conclusion générale sur le contenu des trois chapitres et les résultats obtenus par la simulation de la loi de commande que nous utiliserons dans le dernier chapitre.

CHAPITRE I
ETAT D'ART DE LA COMMANDE
AVANCEE

I.1 Introduction :

Les grandes avancées technologiques ont conduit au développement et à l'amélioration des capacités de traitement des processeurs permettant l'implémentation d'algorithmes de plus en plus complexes.

Les mettant ainsi en avant de tous les domaines d'activité, leur application dans l'industrie ne se trouve pas exclue, ils sont principalement utilisés comme systèmes de commande chargés de contrôler une séquence d'événements, de maintenir constante une certaine variable ou de suivre un changement donné et cela grâce aux différentes techniques de commande.

Cette disposition de calculateurs puissants et une variété de logiciels facilite la synthèse de lois de commandes avancées et leur exécution sans difficulté en temps réel.

De nos jours, les techniques de commandes avancées deviennent l'un des domaines de recherches les plus actifs, parmi ces différentes commandes on citera (la commande adaptative, la commande optimale, la commande neuronale, la commande prédictive, ...), pour bien appliquer ces techniques une bonne connaissance du modèle physique ou électrique à contrôler est requise.

La commande prédictive qui est le sujet de notre étude est un terme général englobant un ensemble de méthodes (PFC, DMC, GPC, EPSAC, NLPC, ...) , nous nous intéressons à la commande prédictive GPC (commande prédictive généralisée), le principe de cette dernière consiste à prendre en compte, à l'instant présent, le comportement futur, en utilisant explicitement un modèle numérique du système afin de prédire la sortie dans le futur sur un horizon fini, elle est souvent utilisée pour la commande des systèmes complexes ou le régulateur PID connaît ses limites, ces derniers sont généralement caractérisés par des entrées et des sorties multiples, des réponses inverses et de nombreuses perturbations. La commande prédictive a été adoptée dans plusieurs domaines d'application comme : l'industrie pétrolière, l'aéronautique, la robotique et l'industrie automobile.

I.2 Différentes commandes avancées:

I.2.1 Commande adaptative : [15]

La commande adaptative est un ensemble de méthodes permettant un ajustement automatique en temps réel des paramètres des régulateurs mis en œuvre dans une boucle de commande afin de réaliser ou de maintenir un niveau de performance désiré lorsque les paramètres du processus sont inconnus ou varient légèrement dans le temps.

Le problème essentiel d'un schéma de commande adaptative est d'assurer la stabilité du système en boucle fermée. Nous trouvons actuellement dans les littératures différentes types de commandes adaptatives pour différents types de systèmes parmi les quelles on trouve :

- Les systèmes linéaires à déphasage minimal. Ce sont des systèmes dont les zéros sont tous dans la région stable.
- Les systèmes linéaires à déphasage non minimal. Ce sont des systèmes qui peuvent avoir un ou plusieurs zéros dans la région instable.

Une première approche de la commande adaptative existe en boucle ouverte : **la commande à gain programmés** (figure 1). Dans ce type d'adaptation, on suppose qu'il existe une relation entre le point de fonctionnement du système, certaines variables de l'environnement, le temps écoulé et les paramètres du processus. Les valeurs de régulateur sont prédéfinies et ajustées en fonction des valeurs des mesures des différentes variables prises en compte. Ce type d'adaptation s'avère cependant suffisant pour de nombreux processus. Cette méthode suppose que les non linéarités sont connus, car il n'existe pas de correction pour compenser une programmation incorrecte (fonctionnement en boucle ouverte). Elle a cependant l'avantage d'ajuster rapidement les paramètres du régulateur lors de changements rapides de la dynamique du processus.

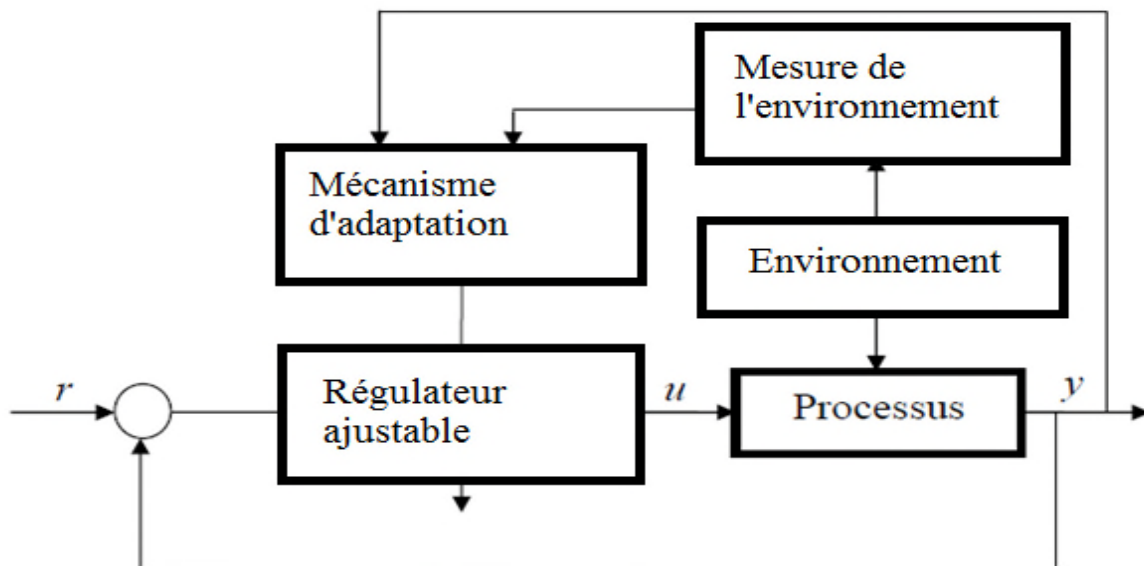


Fig. (I.1) : Commande à gain programmé

I.2.2 Commande optimale : [1]

Un contrôle optimal cherche à maximiser le rendement d'un système pour le coût minimum. En termes généraux, le problème de contrôle optimal est de trouver une commande \mathbf{u} qui s'appliquera au système.

$$\dot{x} = g(x(t), u(t), t) \quad (\text{I.1})$$

Suivre une trajectoire optimale $\mathbf{x}(t)$ qui minimise le critère de performance ou la fonction de coût

$$J = \int_{t_0}^{t_1} h(x(t), u(t), t) dt \quad (I.2)$$

Le problème est celui de la minimisation fonctionnelle contrainte, et a plusieurs approches.

Le calcul variationnel, Dreyfus 1962, peut être employé pour obtenir un ensemble d'équations différentielles avec certaines propriétés de conditions aux limites. Connu sous le nom des équations Euler-Lagrange. Le principe du maximum de Pontryagin 1962 peut aussi être appliqué pour fournir les mêmes conditions aux limites en utilisant une fonction Hamiltonienne.

Une méthode alternative est la méthode de programmation dynamique de Bellman 1957 qui repose sur le principe de l'optimalité et l'approche par intégration. Le principe d'optimalité donne l'équation différentielle partielle de Hamilton Jacobi, dont la solution aboutit à une politique de contrôle optimal. Les équations de Lagrange et de Pontryagin d'Euler sont applicables aux systèmes avec des équations d'état non linéaires et variables dans le temps et des critères de performance non quadratiques et variables dans le temps. L'équation de Hamilton Jacobi est habituellement résolue pour les cas importants et particuliers à temps linéaire invariants avec un critère de performance quadratique (appelé indice de performance), qui prend la forme de l'équation de la matrice Riccati (1724). Cela produit une loi de commande optimale en tant que fonction linéaire des composants du vecteur d'état qui est toujours stable, à condition que le système soit contrôlable.

I.2.3 Commande neuronale : [1]

Le cerveau humain est composé de plusieurs millions d'unités interconnectées, connues individuellement sous le nom de neurones biologiques. Chaque neurone est constitué d'une cellule à laquelle sont attachées plusieurs dendrites (entrées). L'axone se connecte à de nombreux autres neurones via des points de connexion appelés synapses. Une synapse produit une réaction chimique en réponse à une entrée. Le neurone biologique se «déclenche» si la somme des réactions synaptiques est suffisamment grande. Le cerveau est un réseau complexe de neurones sensoriels et moteurs qui donnent à un être humain la capacité de se souvenir, de penser, d'apprendre et de raisonner.

Les réseaux de neurones artificiels tentent d'émuler leurs homologues biologiques. McCulloch et Pitts (1943) ont proposé un modèle simple de neurone, et Hebb (1949) a décrit une technique connue sous le nom d'apprentissage «Hebbien». Rosenblatt (1961), a mis au point une seule couche de neurones, appelée Perceptron, utilisée pour la reconnaissance optique des formes.

Une des premières applications de cette technologie à des fins de contrôle a été réalisée par Widrow et Smith (1964). Ils ont développé un Adaptive LINEar Element (ADLINE) qui a été enseigné pour stabiliser et contrôler un pendule inversé. Kohonen (1988) et Anderson (1972) ont étudié des domaines similaires, se penchant sur la mémoire «associative» et «interactive», ainsi que sur l'«apprentissage compétitif». L'algorithme de formation à la rétro propagation a été étudié par Werbos (1974) et

développé par Rumelhart (1986) et d'autres, ce qui a conduit au concept de Multi-Layer Perceptron (MLP).

Les réseaux neuronaux artificiels présentent les avantages potentiels suivants pour un contrôle intelligent:

- Ils apprennent de l'expérience plutôt que par la programmation
- Ils ont la capacité de généraliser à partir de données d'entraînement données à des données non vues
- Ils sont rapides et peuvent être implémentés en temps réel Ils échouent «gracieusement» plutôt que d'une façon «catastrophique»

Fonctionnement d'un seul neurone artificiel:

Le modèle de base d'un seul neurone artificiel est constitué d'une somme pondérée et d'une fonction d'activation (ou de transfert), comme le montre la figure 2. La figure 2 montre un neurone dans la J ème couche, où

$x_1 \dots x_i$ sont des entrées

$w_{j1} \dots w_{ji}$ sont des poids

b_j est un biais

f_j est la fonction d'activation

y_j est la sortie

La somme pondérée est donc s_j

$$s_j(t) = \sum_{i=1}^N w_{ji} x_i(t) + b_j \quad (\text{I.3})$$

Cette équation peut être écrite sous forme matricielle

$$s_j(t) = W_j x + b_j \quad (\text{I.4})$$

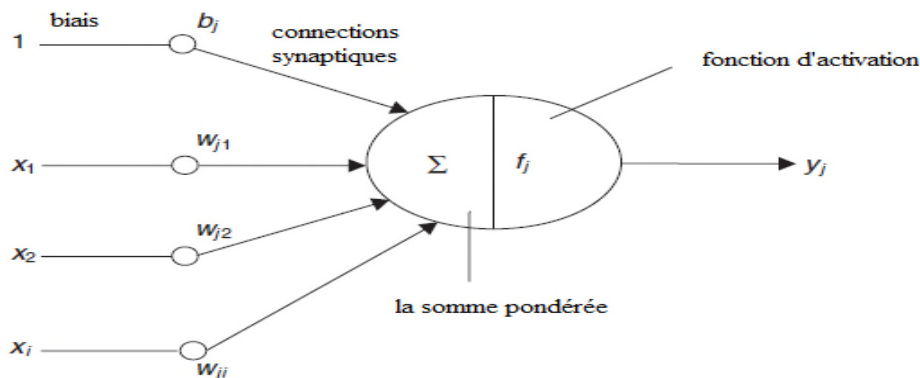


Fig. (I.2) : Un neurone dans la J ème couche

Si $b_j = 0$, le neurone «se déclenche» lorsque $s_j(t)$ passe de négatif à positif.

La fonction d'activation sigmoïde est populaire pour les applications de réseau neuronal car elle est différentiable et monotone, les deux étant une exigence pour l'algorithme de propagation arrière. L'équation pour une fonction sigmoïde est :

$$f(s) = \frac{1}{1+e^{-sj}} \quad (\text{I.5})$$

I.3 Commande prédictive :

Les travaux de D.W.Clarke et de son équipe à Oxford au milieu des années 80 ont fait en sorte de remettre au goût du jour une méthode récente qui est celle de la commande prédictive.

Toutefois cette technique de commande que l'on peut rattacher à la famille des commandes prédictives par modèle (Model Predictive Control) suscite un intérêt dans le domaine industriel depuis la fin des années 70.

En 1978, J.Richalet et al publient les premiers résultats obtenus dans des applications industrielles, en 1979 des ingénieurs de Shell, C.R Cutler et DM Prett font part de leur expérience sur un craqueur catalytique. En 1982 ; R.M.C De Keyser, puis en 1984 B.R. Ydstie proposent leur approche et leur apport à ce type de technique. Ce n'est qu'en 1985 que D.W. Clarke et al présente la première version de commande prédictive généralisée (GPC). Il faut attendre 1987, pour voir publier les premiers résultats obtenus par J.Richalet et al sur des systèmes électromécaniques rapides [5].

I.3.1 Principe de la commande prédictive :

Parmi les multiples techniques de commande avancées, il y'a la commande prédictive, elle est principalement utilisée pour la commande de processus industriels complexes. Son principe est intuitif et simple, l'objectif consiste à anticiper le comportement futur d'un procédé en utilisant un modèle dynamique à l'intérieur d'un contrôleur.

Dans la figure 1 nous avons un schéma-bloc d'une commande prédictive à base de modèle.

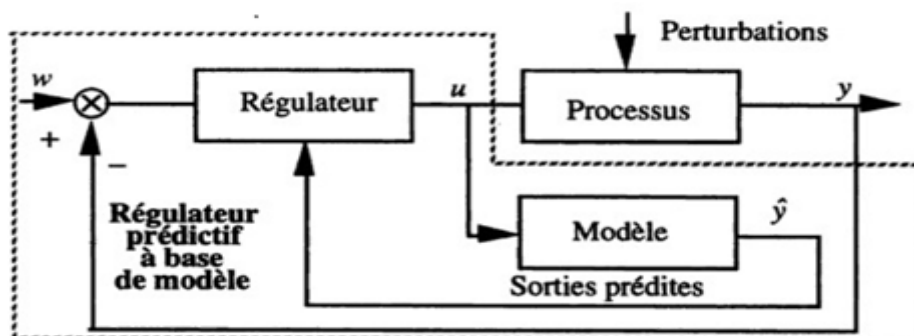


Fig. (I.3) : Commande prédictive à base de modèle

Les tâches typiques de la commande prédictive sont :

- A l'aide d'un modèle d'un système, il faut prédire à chaque instant la sortie sur un horizon fini.
- Elaboration d'une trajectoire de référence à suivre.
- Une séquence de commandes futures est élaborée afin de minimiser les erreurs futures entre la sortie et la consigne ou entre la sortie et la trajectoire de référence.
- Seul le premier élément de la loi de commande calculée est appliqué sur le système au coup d'horloge suivant. Toutes ces étapes se répéteront ensuite, c'est le principe de l'horizon fuyant [5] [6].

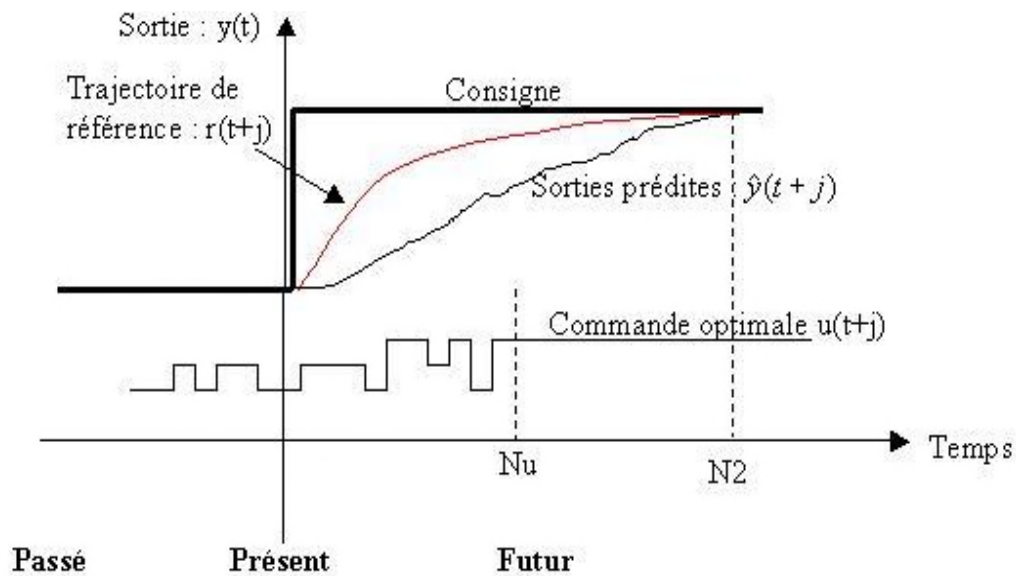


Fig. (I.4) : Stratégie de la commande prédictive.

I.3.2 Approches de la commande prédictive :

Toutes les approches de la commande prédictive utilisent au mieux l'apport de la modélisation du processus à piloter et la puissance des organes de traitement de l'information, parmi ces dernières on citera :

I.3.2.1 Commande prédictive PFC (commande prédictive fonctionnelle) :

Les principes du contrôle fonctionnel prédictif (PFC) ont été établis en 1968 et les premières applications ont eu lieu au début des années 70.

Richalet chez ADERSA Company l'a développé à la fin des années 80 pour l'application à des processus rapides. PFC peut utiliser n'importe quel modèle, mais en raison

de ses caractéristiques de robustesse, les modèles dans l'espace d'état sont souvent utilisés [9] et permet de linéariser des modèles non linéaires instables.

Cependant, l'utilisation de la méthode de l'espace d'état ne peut pas répondre à l'exigence de la pratique des problèmes de contrôle. L'obtention d'un modèle mathématique précis est très difficile, surtout pour processus non linéaires «incertains» de temporisation et de variation dans le temps.

PFC traite les problèmes de contrôle de suivi rapide et une méthode de contrôle efficace pour les processus rapides [10]. La flexibilité et l'efficacité sont appréciées en raison du principe de décomposition. L'algorithme PFC nécessite une méthode d'optimisation en ligne. L'indice de performance quadratique (QP) peut être adopté dans PFC.

Les points de coïncidence et la fonction de base sont les deux caractéristiques de PFC [4]. Le point de coïncidence est utilisé pour simplifier le calcul en ne considérant qu'un sous-ensemble de points dans l'horizon de prédiction. Les résultats futurs souhaités et prévus sont requis pour coïncider seulement au sous-ensemble de points dans l'horizon de prédiction et non dans l'ensemble de l'horizon de prédiction.

La sélection des fonctions de base dépend des caractéristiques du processus et du point de consigne désiré. Ceci spécifie le profil d'entrée sur un horizon long en utilisant un petit nombre des paramètres.

I.3.2.2 Commande prédictive DMC (commande par matrice dynamique) :

En 1979, Cutler et Ramaker de Shell Oil Co. ont présenté les détails d'un algorithme de contrôle multi variable sans contraintes, qu'ils ont appelé Dynamic Matrix Control (DMC) [7]. Il est issu d'une technique de représentation de la dynamique des processus avec un ensemble de coefficients [8]. La matrice dynamique est utilisée pour projeter les futures sorties. C'est approprié pour le processus stable linéaire à boucle ouverte. La technique DMC est basée sur une étape modèle de réponse du processus.

L'objectif du contrôleur DMC est de piloter la sortie pour suivre le point de consigne dans le sens des moindres carrés incluant un terme de pénalité sur les mouvements d'entrée. Cela résulte en plus petit mouvements d'entrées calculées et une réponse de sortie moins agressive [7].

I.3.2.3 Commande prédictive généralisé GPC (commande prédictive généralisée) :

C'est le sujet de notre étude, l'appellation GPC est une dénomination d'une classe de méthodes de contrôle prédictif à caractères adaptatifs.

I.3.2.4 EPSAC (Extended Prediction Self-Adapted):

De Keyser et Van Cauwenberghe ont développé un contrôle auto-adaptatif à prédiction étendue (EPSAC) en 1985 [3]. Il utilise une fonction de transfert discrète (transformée en z)

pour modéliser le processus et propose un signal de contrôle constant à partir du moment présent tout en utilisant un prédicteur sous-optimal au lieu de résoudre une équation diophantienne [4], [11], [12].

I.3.2.5 EHAC (Extended Horizon Adaptive Control):

B. E. Ydstie a développé le contrôle adaptatif de l'horizon étendu (EHAC) en 1984. Il utilise un modèle de processus paramétrique. Cette approche est appelée EHAC car elle permet un temps plus long pour conduire la sortie du processus à sa valeur désirée au lieu d'utiliser un temps de retard fixe et intervalle court [4], [13]. EHAC conduit à une politique en plusieurs étapes puisque le résultat final dépend sur les intrants actuels ainsi que sur les intrants qui seront mis en œuvre à l'avenir.

I.3.3 Essors de la commande prédictive: [2]

A la fin des années 1960, les véritables besoins de l'industrie ont changés surtout l'industrie pétrolière qui opérait avec des marges très faibles. L'investissement dans les calculateurs étant fait tandis que sa sous utilisation faisait scandale et portait un très grand préjudice à l'industrie de l'époque. Un grand pétrolier américain décida alors de faire recours aux services d'un groupe d'automaticiens au chômage venant du domaine de l'espace en investissant de grandes somme d'argents, à cette époque-là un ensemble de technique ont donnés des résultats très concluants dans le pilotage des missiles (Filtre de Kalman, commande LQG).

La difficulté de modélisation des processus industriels pétroliers sera un handicap pour ces derniers qui étaient habitués à la modélisation d'engins.

La commande LQG se révéla très tôt inadéquate dès le départ : type de modèle inadapté, niveau de bruit, non-stationnarité du processus, objectifs de régulation, prise en compte d'objectifs de production variés etc. Le respect des contraintes sur les grandeurs de commande lors de la commande et aussi le respect des grandeurs internes du système.

Désormais il est important de prédire, poussé par la nécessité économique, l'industrie réalisa alors qu'il fallait en passer par la et changer complètement d'approche.

La commande prédictive fut développée par des militaires dans le contexte de la guerre froide, et cela afin que les systèmes d'armes puissent poursuivre des trajectoires sans erreur de trainage.

Le précurseur de la commande prédictive était le régulateur de Smith, la première commande à base de modèle qui compense les temps de retard. Mais il ne réalise pas une véritable prédiction puisque entre l'instant t et $t+r$, si r est le retard pur, le futur est parfaitement connu, il ne dépend que du passé et l'on pilote toujours le point suivant.

Et c'est ainsi que la commande à vue le jour dans un contexte de guerre pour qu'elle finisse actuellement par être utilisée dans la plus grande majorité des secteurs de l'industrie.

I.3.4 Domaines d'application de la commande prédictive :

Depuis le milieu des années 80 la commande prédictive a connu un réel essor, cependant ses champs d'application ne cessent de s'élargir, pour cela on citera :

- Commande des actionneurs électromécaniques.
- Commande des systèmes de chauffage des bâtiments.
- Commande de la poursuite de trajectoire des systèmes de navigation aérienne et navale.

I.3.5 Les avantages de la commande prédictive :

Lorsqu'on est confronté au control de systèmes ou les régulateurs classiques sont insuffisants, la commande prédictive devient un bon recours à fin d'y remédier à ce problème, car ces systèmes peuvent avoir des retards importants, des réponses inverses et de nombreuses perturbations.

L'usage de la commande prédictive est avantageux, parmi ces derniers on citera :

- Le concept de la commande est facile à comprendre car il est intuitif.
- Offre la possibilité de prendre en considération les contraintes sur les variables contrôlées.
- La faculté d'adaptation du système aux perturbations mesurées.
- La douceur de la commande, par une variation non excessive sur les variables manipulées.
- Un réel gain financier par une meilleure utilisation des actionneurs, chose qui entraîne le prolongement de leur durée de vie.

Les multiples méthodes relevant de la commande prédictive s'appuient sur une philosophie et un principe qui leurs sont communs.

I.4 Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté plusieurs lois de commande avancées, leur élaboration a été motivée par le développement des performances des organes de traitement qui deviennent de plus en plus performants.

Différentes techniques existent, elles sont adaptées à des contextes et à des besoins précis.

CHAPITRE II

MODELISATION DU MOTEUR A

COURANT CONTINU

II.1 Introduction :

La modélisation est une étape très importante dans l'étude du comportement et la synthèse de la commande des machines électriques.

Dans ce chapitre nous allons détailler la modélisation du moteur à courant continu à partir de ses équations mécaniques et électriques en vue de la commande prédictive.

II.2 Description d'une machine à courant continu :

Une machine à courant continu, est un dispositif électromagnétique qui convertit une énergie électrique en une énergie mécanique, dans ce cas on dit qu'il fonctionne en mode moteur. Soit il convertit l'énergie mécanique reçue en énergie électrique lorsqu'il subit l'action d'une charge entrainante. On dit alors qu'elle a un fonctionnement en génératrice.

Dans le cas moteur, l'énergie électrique est apportée par un convertisseur de puissance qui alimente le bobinage disposé sur l'induit mobile (rotor). Ce bobinage est placé dans un champ magnétique, permanent ou non produit par l'inducteur. Le courant circulant dans les spires de l'induit du moteur, des forces électriques lui sont appliquées et, grâce à un dispositif adapté (balais et collecteur), les forces s'additionnent pour participer à la rotation. On peut ainsi considérer le moteur comme un système dont l'entrée est la tension d'induit et la sortie une grandeur liée à la position angulaire du rotor et la vitesse de rotation du rotor comme grandeur de sortie.

II.3 Constituants de la machine à courant continu :

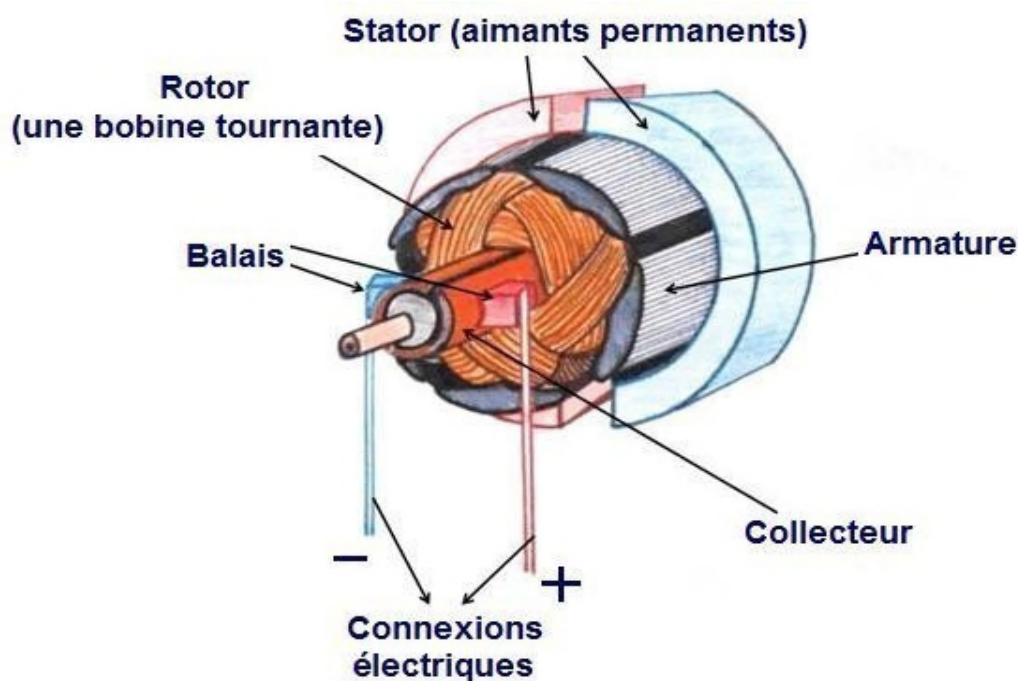


Fig. (II.1) : Constituants d'une machine à courant continu

La machine à courant continu est constituée de trois parties essentielles qui sont :

- **L'inducteur** : c'est la partie fixe du moteur. Il est constitué d'un aimant permanent ou d'un électroaimant alimenté par un courant.
- **Le rotor** : le rotor est constitué d'encoches dans les quelles est enroulé un bobinage de (N) conducteurs alimentés en courant continu (I) via le collecteur.
- **Le collecteur** : est un ensemble de lames de cuivre ou sont reliées les extrémités du bobinage de l'induit [6]. Les balais (charbons) sont situés au stator et frottent sur le collecteur en rotation.

II.4 Les différents types des moteurs à courant continu :

On distingue deux types de moteurs à courant continu :

II.4.1 Les moteurs à inducteur à aimant permanent :

Le flux inducteur produit par l'aimant permanent n'est pas alimenté par un courant. Tous les moteurs à courant continu de faible puissance et les micromoteurs sont des moteurs à aimants permanent. Ils représentent maintenant la majorité des moteurs à courant continu [3].

II.4.2 Les moteurs à inducteur bobiné :

On peut classer aussi les moteurs selon le type d'excitation employée, qui sont :

En dérivation (shunt) :

L'enroulement d'excitation est connecté en parallèle sur l'alimentation du moteur, il possède les mêmes propriétés que le moteur à excitation séparée du fait que, dans les deux cas, l'inducteur constitue un circuit extérieur à celui de l'induit, il comporte beaucoup de spires de faibles sections. Le circuit électrique est représenté par la figure suivante :

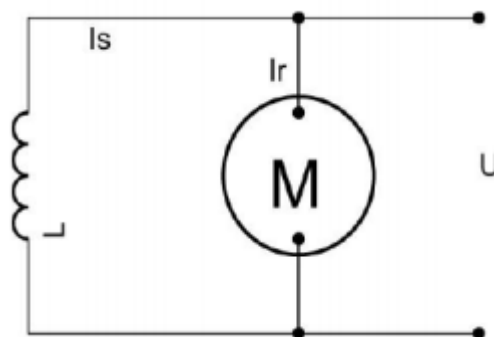


Fig. (II.2) : Schéma électrique de l'excitation shunt

En série :

Le circuit d'excitation est placé avec l'induit du moteur. Sa particularité est d'avoir un inducteur qui est traversé par le même courant, l'inducteur possède donc une résistance plus faible que celle des autres types de machines. L'inducteur est en série avec l'induit : une seule source d'alimentation suffit. On change le sens de rotation en permutant les connexions de l'induit et de l'inducteur, il comporte peut de spires de grosses sections. Le circuit électrique est présenté par la figure suivante :

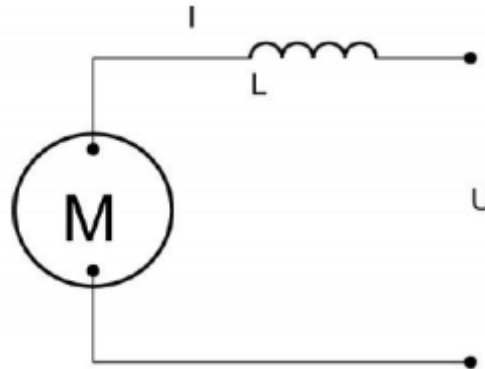


Fig. (II.3) : Schéma électrique de l'excitation série

Composé :

On trouve une partie des enroulements inducteurs en série et une partie en parallèle. On distingue deux types de branchements, en courte dérivation (l'enroulement parallèle est aux bornes du moteur), en longues dérivation (l'enroulement parallèle est aux bornes de la source d'alimentation).

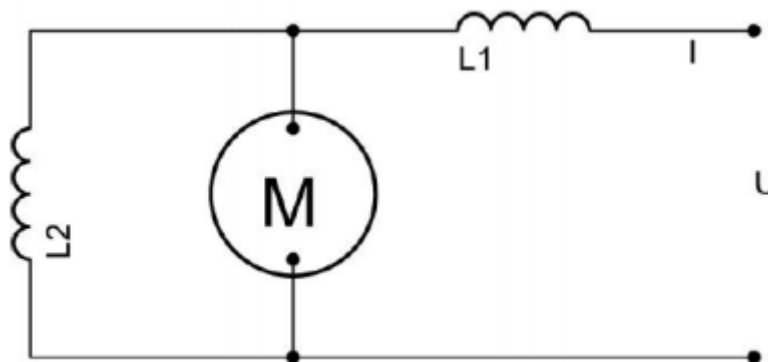


Fig. (II.4) : Schéma électrique de l'excitation composée

II.5 Domaines d'utilisation des moteurs à courant continu :

- Moteur de traction (locomotive métro).
- Ventilateur, pompes centrifuges, compresseurs, pompes à piston.
- Démarreur (automobile...).
- Appareil de levage.

II.6 Modélisation :

II.6.1 Equation différentielle:

Le MCC étant un système électromécanique, les équations dynamiques résultent de la combinaison des modélisations mécanique et électrique du moteur, schématiquement décrites à la figure suivante.

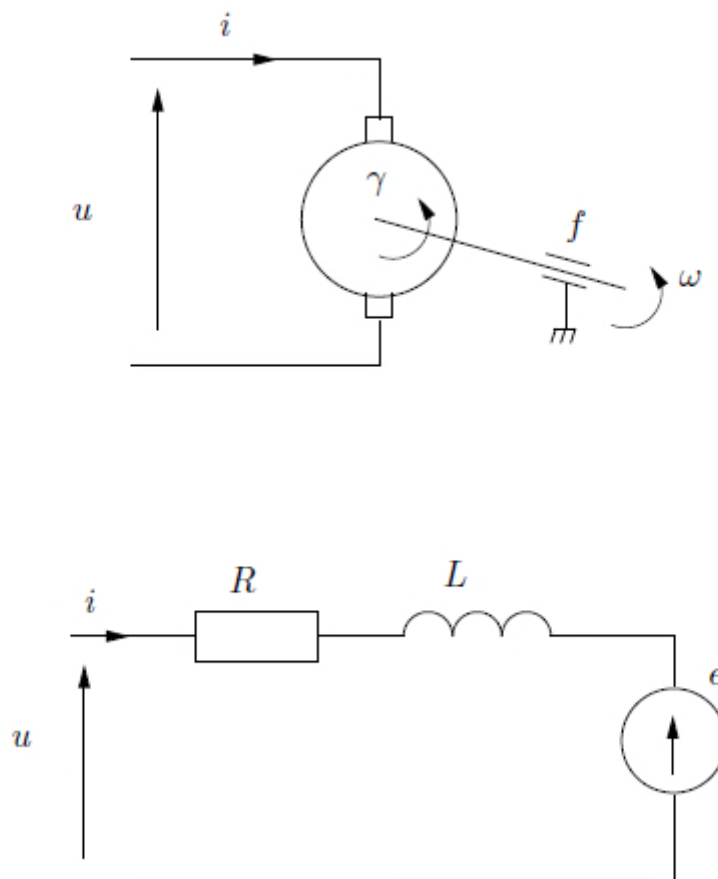


Fig. (II.5) : Schéma d'un moteur à courant continu

Pour la partie électrique, on calcule la tension aux bornes de l'induit. L'équation électrique, liant la tension $u(t)$ aux bornes de l'induit et le courant d'induit $i(t)$ s'écrit :

$$u(t) = Ri(t) + \frac{Ldi(t)}{dt} + e(t) \quad (\text{II.1})$$

Où R est la résistance de l'induit du moteur, L son inductance et $e(t)$ la force électromotrice, qui est proportionnelle à la vitesse de rotation du rotor :

$$e(t) = K_e \Omega(t) \quad (\text{II.2})$$

Pour la partie mécanique, on applique le principe fondamental de la dynamique autour de l'axe de rotation. L'équation mécanique rendant compte des couples agissant sur le rotor s'écrit :

$$\gamma(t) - C_r(t) - f\Omega(t) = J \frac{d\Omega(t)}{dt} \quad (\text{II.3})$$

Où $\gamma(t)$ est le couple moteur et $C_r(t)$ le couple résistant, f le coefficient de frottement visqueux et J le moment d'inertie du rotor. Par construction, le couple est proportionnel au courant d'induit $i(t)$:

$$\gamma(t) = K_m i(t) \quad (\text{II.4})$$

En règle générale les coefficients K_e et K_m sont si proches qu'il est raisonnable de les considérer égaux, négligeant alors les pertes durant la conversion électromécanique de puissance. En posant $K_m = K_e = K$ les équations (II.3) et (II.4) donnent :

$$Ki(t) - C_r(t) = f\Omega(t) + J \frac{d\Omega(t)}{dt} \quad (\text{II.5})$$

En dérivant (II.5), il devient :

$$K \frac{di(t)}{dt} = f \frac{d\Omega(t)}{dt} + J \frac{d^2\Omega(t)}{dt^2} \quad (\text{II.6})$$

En combinant (II.5) et (II.6) avec (II.1) et (II.2) :

$$\frac{R}{K} \left(f\Omega(t) + J \frac{d\Omega(t)}{dt} \right) + \frac{L}{K} \left(f \frac{d\Omega(t)}{dt} + J \frac{d^2\Omega(t)}{dt^2} \right) + K\Omega(t) = u(t) \quad (\text{II.7})$$

Finalement, en ordonnant (II.7) de façon à avoir un coefficient de un devant le degré de dérivation le plus élevé, il vient :

$$\frac{d^2\Omega(t)}{dt^2} + \frac{RJ+Lf}{LJ} \frac{d\Omega(t)}{dt} + \frac{Rf+K^2}{LJ} \Omega(t) = \frac{K}{LJ} u(t) \quad (\text{II.8})$$

Remarque : Cette équation différentielle relie $\Omega(t)$ et $u(t)$ par l'intermédiaire de paramètres constants dans le temps. Il s'agit d'une équation différentielle linéaire à coefficients constants d'ordre 2.

II.6.2 Equation d'état :

On peut facilement déterminer un modèle d'état du MCC. On considère que l'entrée du système est sa tension d'induit $u(t)$ alors que sa sortie est représentée par la vitesse de rotation $\Omega(t)$ du rotor. On choisit deux variables indépendantes du système : la vitesse de rotation $x_1 = \Omega(t)$ et le courant d'induit $x_2 = i(t)$. L'équation électrique (II.1) s'écrit alors :

$$u(t) = Rx_2 + \frac{Ldx_2}{dt} + Kx_1$$

Alors que l'équation mécanique (II.3) donne :

$$Kx_2 - fx_1 = J \frac{dx_1}{dt}$$

En en déduit l'équation d'état du MCC :

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{f}{J} & \frac{K}{J} \\ -\frac{K}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{pmatrix} u(t),$$

$$y = (1 \quad 0) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad (\text{II.9})$$

II.6.3 Fonction de transfert d'un MCC :

La transformé de Laplace de l'équation (II.1) :

$$(R + Ls)I(s) = U(s) - E(s) \quad (\text{II.10})$$

La transformé de Laplace de l'équation (II.2) :

$$E(s) = K\Omega(s) \quad (\text{II.11})$$

La transformée de Laplace de l'équation (II.3) :

$$\gamma(s) - C_r(s) = (f + Js)\Omega(s) \quad (\text{II.12})$$

La transformée de Laplace de l'équation (II.3) :

$$\gamma(s) = KI(s) \quad (\text{II.13})$$

Ces équations de transfert nous amènent au schéma fonctionnel ci-dessous :

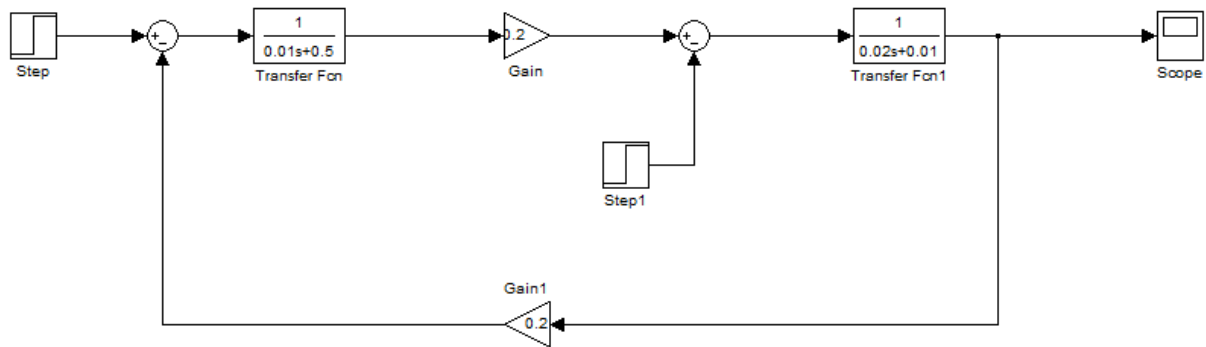


Fig. (II.6) : Schéma fonctionnel du moteur à courant continu

II.7 Simulation numérique du MCC :

Maintenant on passe à la simulation numérique de la vitesse de sortie de notre modèle qui a les paramètres suivants :

$$\begin{aligned} R &= 0.5 \, \Omega & L &= 10 \, mH \\ K_a &= 0.1 & K_b &= 0.1 \\ B_m &= 0.01 \, N.m.s & J &= 0.02 \, Kg.m^2 \end{aligned}$$

Sous l'effet d'une entrée $U=24 \, V$ et une charge $Cr = 5 \, N.m$ à partir de 10s, on obtient les allures de vitesse et de courant suivantes.

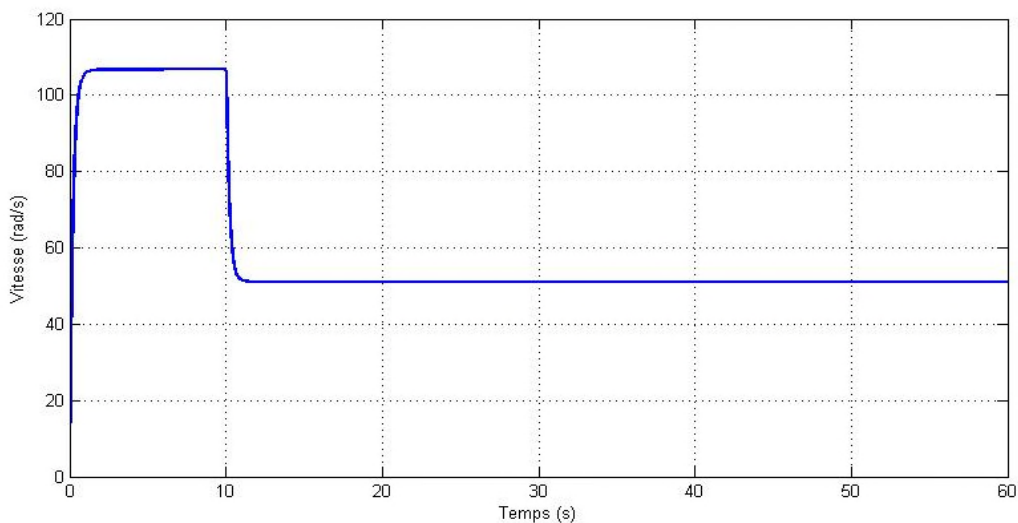


Fig. (II.7) : Vitesse de rotation du rotor

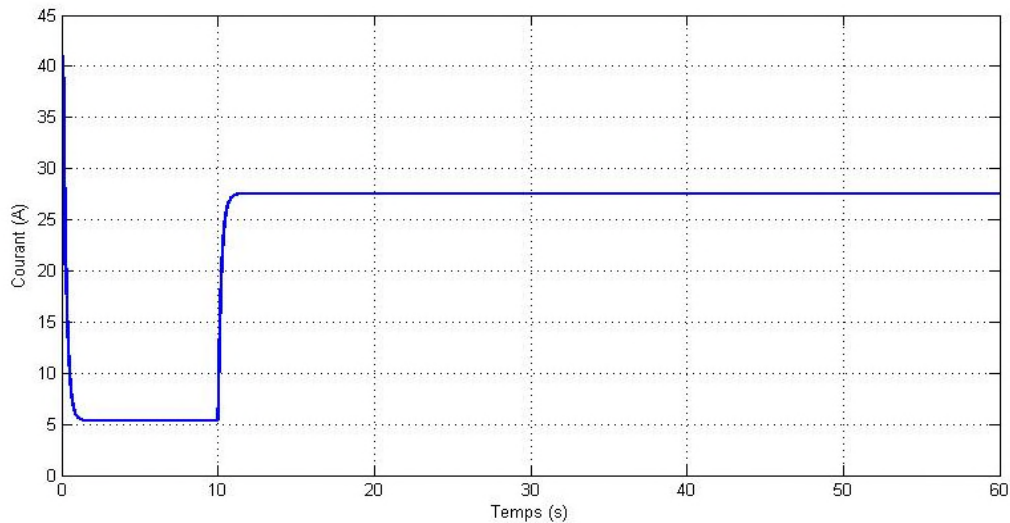


Fig. (II.8) : Courant

Interprétation des résultats :

Suite à l'application de l'entrée citée au dessus, on remarque que la vitesse de rotation du rotor augmente pour se stabiliser à une vitesse de 105 rad/s, ensuite à l'instant $t=10s$ l'application du couple résistant a causé une perte de vitesse pour se stabiliser à 47 rad/s le long de la simulation.

II.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté de façon détaillée la modélisation du moteur à courant continu. A partir des lois mécaniques et électriques du moteur à courant continu, on a établi son équation différentielle. En suite on a établi l'équation d'état de ce dernier, le modèle obtenu est facile à exploiter pour la réalisation des lois de commande avancées. Dans ce qui suit, on utilisera ce modèle pour étudier l'application de la commande prédictive sur le moteur à courant continu.

CHAPITRE III

**COMMANDE PREDICTIVE DU MOTEUR A
COURANT CONTINU**

III.1 Introduction :

La mise en œuvre de la commande prédictive est présentée dans ce chapitre pour résoudre le problème de poursuite de trajectoire. Une loi de commande prédictive à temps continu est appliquée au moteur à courant continu afin de ramener la vitesse du rotor à suivre la vitesse de consigne. La conception du modèle de prédiction est réalisée à partir d'un développement mathématique sur modèle de la machine, ensuite on passe à la simulation en temps réel de notre modèle, premièrement on fait des testes à vide et en charge dans le sens direct pour tester la capacité du modèle à rejeter des perturbations, ensuite on fait des testes en inversant le sens de rotation de la machine, finalement les derniers essais se feront en exerçant des variations des paramètres électriques et mécaniques du modèle étudié.

III.2 Commande prédictive linéaire mono-variable :

III.2.1 Principe de la régulation prédictive :

On rappelle le principe du régulateur prédictif qui est résumé dans les points suivants:

- **Une trajectoire de référence dans le futur :** La trajectoire de référence représente le comportement désiré du procédé.
- **Un modèle du système à commander:** Il représente le comportement dynamique du procédé. Il assure la prédiction des sorties au futur sur l'horizon de prédiction.
- **Un critère d'optimisation dans le futur:** Le critère d'optimisation appelé aussi critère de performance ou fonction coût, est la traduction mathématique des objectifs de contrôle du procédé sous les contraintes de fonctionnement. En général, ce critère est quadratique, il est composé de deux termes. Le premier est en fonction de la commande.
- **La méthode de résolution :** C'est un algorithme qui calcule la séquence de commande optimale qui assure la poursuite de la trajectoire de référence sur un horizon de prédiction.

Le modèle d'état d'un système linéaire est :

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

Avec :

x : le vecteur d'état

u : le vecteur entrée (commande)

$y(t)$: la sortie à contrôler

$y_{\text{ref}}(t)$: la référence

Le but du régulateur prédictif est de calculer la commande optimale au futur $u(t+\tau)$ de telle manière la sortie au futur $y(t+\tau)$ suit sa référence $y_r(t+\tau)$. La fonction du coût à minimiser est: [14].

$$\mathfrak{J} = \frac{1}{2} \int_0^{T_p} [y_{ref}(t+\tau) - y(t+\tau)]^T [y_{ref}(t+\tau) - y(t+\tau)] d\tau \quad (\text{III.2})$$

La prédiction des sorties est calculée à partir de l'expansion en série de Taylor, qui est exprimée par les dérivées de Lie [15]. La différentiation de la sortie par rapport au temps est répétée r fois, pour aboutir à l'expression suivante:

$$y(t+\tau) = h(x) + \sum_{k=1}^{\rho} \frac{\tau^k}{k!} L_f^k h(x) + \frac{\tau^k}{k!} L_{gu} L_f^{(\rho_i-1)} h(x) u(t) \quad (\text{III.3})$$

ρ , est le degré relatif de la sortie, qui est par définition le nombre de fois de différentiation de la sortie jusqu'à l'apparition de commande.

Degré relatif de la sortie $y(t)$:

$$\begin{cases} h(x) = y \\ L_f h(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} A x(t) \\ L_f^k h(x) = L_f (L_f^{(k-1)} h(x)) \\ L_{gu} h(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} B u(t) \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

La prédiction des sorties est calculée comme suit :

$$y(t+\tau) = T(\tau) Y(t) \quad (\text{III.5})$$

Avec :

$$T(\tau) = \left[1 \quad \tau \quad \frac{\tau^2}{2} \quad \dots \quad \frac{\tau^\rho}{\rho!} \right]$$

$$Y(t) = \begin{bmatrix} h(x) \\ L_f h(x) \\ L_f^2 h(x) \\ \vdots \\ L_f^\rho h(x) \end{bmatrix} + G(x) u(t)$$

$$G(x) = L_{gu} L_f^{(\rho-1)} h(x)$$

De même pour la référence :

$$y_{ref}(t+\tau) = T(\tau) Y_{ref}(t) \quad (\text{III.6})$$

Avec :

$$T(\tau) = \begin{bmatrix} 1 & \tau & \frac{\tau^2}{2} & \dots & \frac{\tau^\rho}{\rho!} \end{bmatrix}$$

$$Y_{ref}(t) = \begin{bmatrix} y_{ref}(t) \\ \dot{y}_{ref}(t) \\ \ddot{y}_{ref}(t) \end{bmatrix}$$

On remplace dans la fonction de cout et on aura une autre forme de fonction de cout :

$$\begin{aligned} \mathfrak{J} &= \frac{1}{2} \int_0^{T_p} [T(\tau)Y_{ref}(t) - T(\tau)Y(t)]^T [T(\tau)Y_{ref}(t) - T(\tau)Y(t)] d\tau \\ \mathfrak{J} &= \frac{1}{2} \int_0^{T_p} [Y_{ref}(t) - Y(t)]^T T(\tau)^T T(\tau) [Y_{ref}(t) - Y(t)] d\tau \\ \mathfrak{J} &= \frac{1}{2} [Y_{ref}(t) - Y(t)]^T \int_0^{T_p} T(\tau)^T T(\tau) d\tau [Y_{ref}(t) - Y(t)] \\ &\quad \bar{\Pi} = \int_0^{T_p} T(\tau)^T T(\tau) d\tau \\ \mathfrak{J} &= \frac{1}{2} [Y_{ref}(t) - Y(t)]^T \bar{\Pi} [Y_{ref}(t) - Y(t)] \end{aligned} \quad (\text{III.7})$$

Avec :

$$Y_{ref}(t) - Y(t) = \begin{bmatrix} y_{ref}(t) \\ \dot{y}_{ref}(t) \\ \ddot{y}_{ref}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} h(x) \\ L_f h(x) \\ L_f^2 h(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ G_u(x)u(t) \end{bmatrix} = M + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ G_u(x)u(t) \end{bmatrix}$$

Donc (III.7) deviendra :

$$\mathfrak{J} = \frac{1}{2} [M + G(x)u(t)]^T \bar{\Pi} [M + G(x)u(t)]$$

$$\bar{\Pi}(\tau) = \int_0^{T_p} T(\tau)^T T(\tau) d\tau = \int_0^{T_p} \begin{bmatrix} 1 \\ \tau \\ \frac{\tau^2}{2} \\ \vdots \\ \frac{\tau^\rho}{\rho!} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \tau & \frac{\tau^2}{2} & \dots & \frac{\tau^\rho}{\rho!} \end{bmatrix} d\tau$$

La condition nécessaire à satisfaire pour trouver la commande optimale est la suivante :

$$\frac{\partial \mathfrak{J}}{\partial u} = 0 \quad (\text{III.8})$$

III.3 Régulation prédictive linéaire :

Dans ce qui suit, l'objectif est de contrôler la commande d'entrée du système (MCC).

La conception d'un tel contrôleur doit assurer la poursuite de la trajectoire de référence au futur qui est une vitesse de rotation.

On a une seule sortie $y(t)$ à contrôler qui est la vitesse de rotation du rotor du MCC qui est un système linéaire mono variable dont le modèle d'état est :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

Donc :

$$y(t) = \Omega(t) \quad (\text{III.10})$$

Le vecteur d'état $x(t)$ est composé de la vitesse de rotation et du courant du rotor.

$$x = \begin{bmatrix} \Omega \\ i \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

Le vecteur commande $u(t)$ est composé de de la tension dans les bobines du rotor

La matrice d'évolution ou encore (matrice d'état) est défini comme suit :

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{f}{J} & \frac{K}{J} \\ -\frac{K}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \quad (\text{III.12})$$

La matrice de commande B est définie comme suit :

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ L \end{bmatrix} \quad (\text{III.13})$$

La matrice d'observation C est définie comme suit :

$$C = [1 \quad 0] \quad (\text{III.14})$$

Le degré relatif de la sortie $y(t)$ (vitesse de rotation du rotor) est :

$$\left\{ \begin{array}{l} y = h(x) = \Omega \quad x = (\Omega \quad i)^T \\ L_f h(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} A x(t) = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} -f & K \\ J & J \\ -K & -R \\ L & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega \\ i \end{bmatrix} = \frac{-f}{J} \Omega + \frac{K}{J} i \\ L_{g_u} h(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} B u(t) = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ L \end{bmatrix} = 0 \\ L^2_f h(x) = L_f (L_f h(x)) = \begin{bmatrix} -f & K \\ J & J \\ -K & -R \\ L & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega \\ i \end{bmatrix} = \left(\frac{f^2}{J^2} + \frac{fK}{J^2} \right) \Omega + \left(\frac{-K^2}{JL} - \frac{KR}{JL} \right) i \\ L_{g_u} L_f h(x) = \begin{bmatrix} -f & K \\ J & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ L \end{bmatrix} = \frac{K}{JL} \end{array} \right. \quad (\text{III.15})$$

Le degré relatif de la sortie y est $\rho = 2$.

La sortie au futur $y(t + \tau)$ est exprimée par :

$$y(t + \tau) = T(\tau) Y(t) \quad (\text{III.16})$$

Avec :

$$T(\tau) = \begin{bmatrix} 1 & \tau & \frac{\tau^2}{2} \end{bmatrix}$$

$$Y(t) = \begin{bmatrix} y(t) \\ \dot{y}(t) \\ \ddot{y}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h(x) \\ L_f h(x) \\ L^2_f h(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ G_u(x)u(t) \end{bmatrix}$$

Si la référence au futur $y_{ref}(t + \tau)$ n'est pas prédéfinie, un calcul similaire est utilisé pour trouver la prédiction approximativement.

$$y_{ref}(t + \tau) = T(\tau) Y_{ref}(t) \quad (\text{III.17})$$

Avec :

$$y_{ref}(t) = \Omega_{ref}(t)$$

$$T(\tau) = \begin{bmatrix} 1 & \tau & \frac{\tau^2}{2} \end{bmatrix}$$

$$Y_{ref}(t) = \begin{bmatrix} y_{ref}(t) \\ \dot{y}_{ref}(t) \\ \ddot{y}_{ref}(t) \end{bmatrix}$$

La fonction de cout à minimiser afin d'obtenir la commande optimale est la suivante :

$$\mathfrak{J} = \frac{1}{2} [M + G(x)u(t)]^T \bar{\Pi} [M + G(x)u(t)] \quad (\text{III.18})$$

$$\bar{\Pi}(\tau) = \int_0^{T_p} T(\tau)^T T(\tau) d\tau = \begin{bmatrix} T_p & \frac{T_p^2}{2} & \frac{T_p^3}{6} \\ \frac{T_p^2}{2} & \frac{T_p^3}{3} & \frac{T_p^4}{8} \\ \frac{T_p^3}{6} & \frac{T_p^4}{8} & \frac{T_p^5}{20} \end{bmatrix}$$

Ainsi la commande optimale est comme suit :

$$u(t) = -G(x)^{-1} \left[k_0 \left(h(x) - y_{ref}(t) \right) + k_1 \left(L_f h(x) - \dot{y}_{ref}(t) \right) + k_2 \left(L_f^2 h(x) - \ddot{y}_{ref}(t) \right) \right]$$

Avec :

$$k_0 = \frac{10}{3T_p^2}$$

$$k_1 = \frac{5}{2T_p}$$

$$k_2 = 1$$

III.4 Résultats de la simulation :

La Figure (III.1) représente le schéma bloc d'une régulation de vitesse du moteur à courant continu par un régulateur prédictif à temps continu.

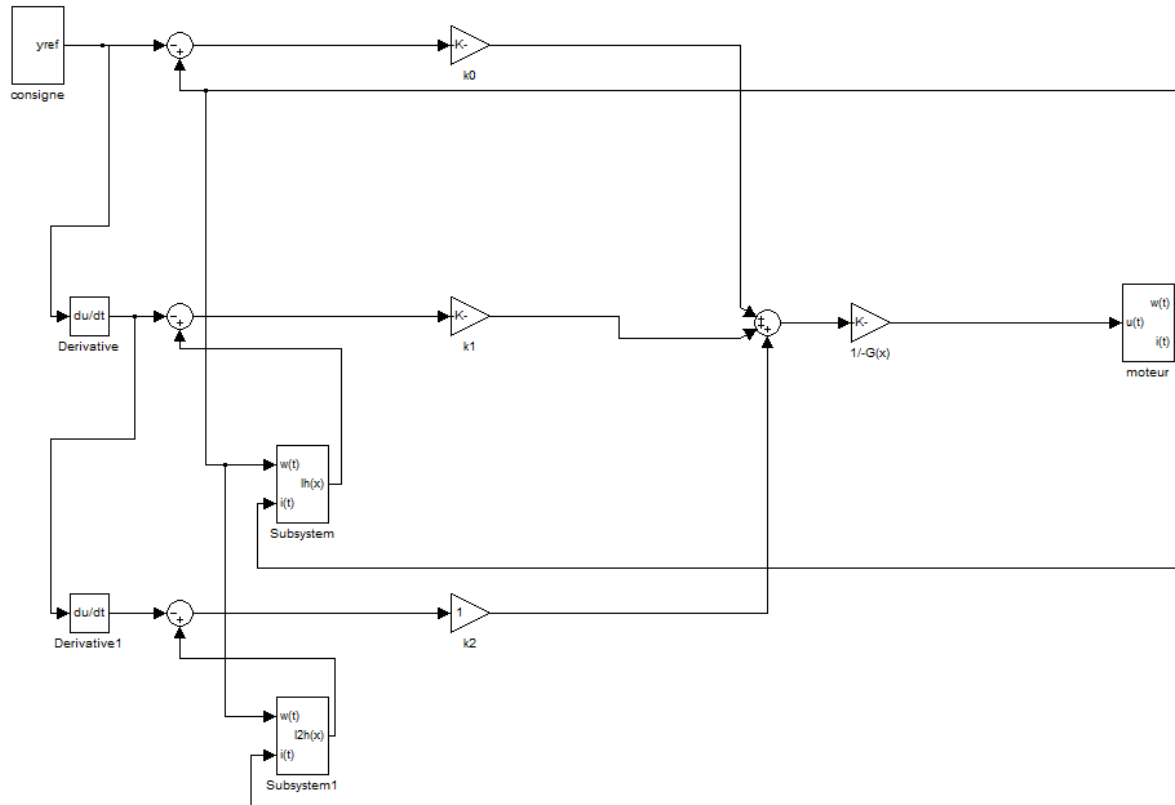


Fig. (III.1) : Schéma bloc de la commande prédictive d'un MCC

La loi de commande proposée dans ce chapitre, représenté graphiquement sur la figure (III.1), a été implantée numériquement sur Simulink/Matlab. Les détails sur les sous-systèmes de la figure (III.1) se trouvent dans l'annexe.

III.4.1 Résultats de simulation de la GPC à vide :

Les figures (III.2), (III.3), (III.4), (III.5) représentent les résultats de simulation pour la poursuite de la vitesse de référence et l'erreur de vitesse du MCC à vide pour des temps de prédictions différents qui sont : $T_p=0.001s$, $T_p=0.002s$, $T_p=0.003s$.

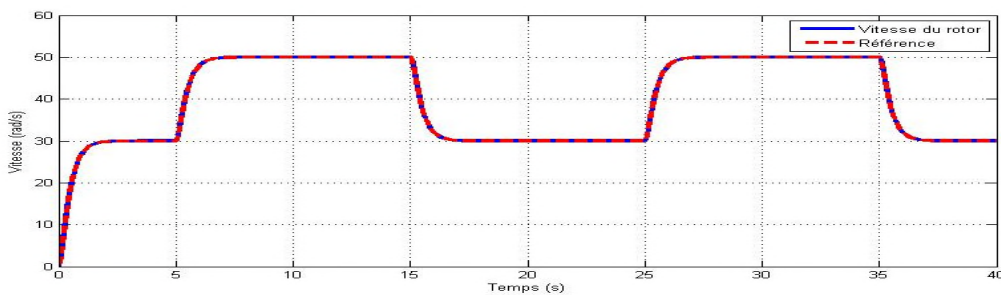


Fig. (III.2) : Suivi de consigne à vide pour $T_p=0.001s$

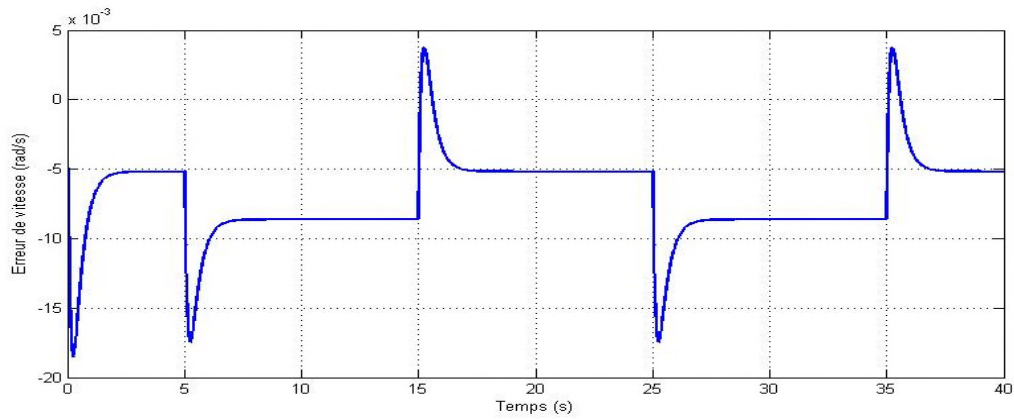


Fig. (III.3) : Erreur de vitesse pour $T_p=0.001s$

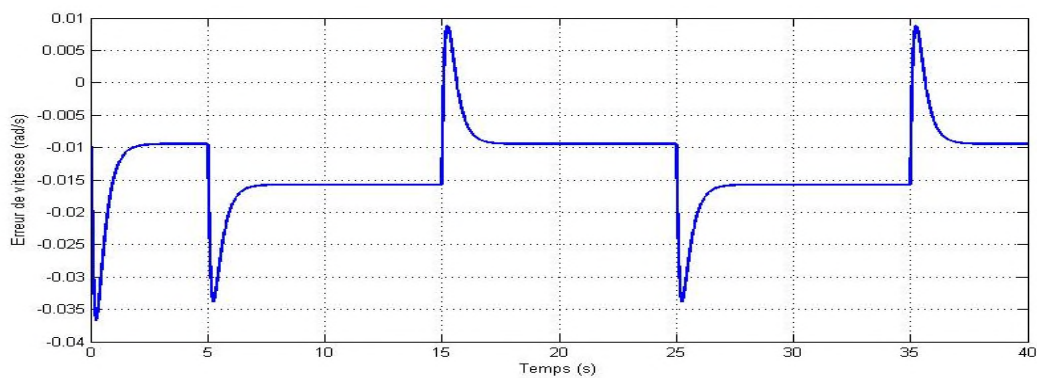


Fig. (III.4) : Erreur de vitesse pour $T_p=0.002s$

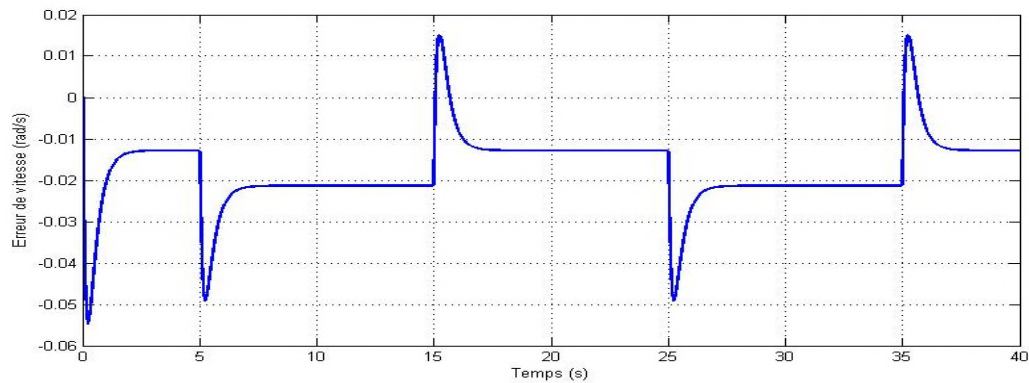


Fig. (III.5) : Erreur de vitesse pour $T_p=0.003s$

Les figures (III.3), (III.4), (III.5) montrent que l'erreur de vitesse diminue en diminuant les temps de prédictions, pour $T_p=0.003s$ l'erreur est de 0.015 rad/s, pour $T_p=0.002s$ l'erreur devient 0.008 rad/s et pour $T_p=0.001s$ elle diminue pour devenir 0.003 rad/s.

III.4.2 Résultats de simulation de la GPC en charge :

Les figures (III.6), (III.7), (III.8), (III.9) représentent les résultats de simulation pour la poursuite de la vitesse de référence et l'erreur de vitesse du MCC en appliquant une charge équivalente à $C_r=5\text{N.m}$ à un instant $t=10\text{s}$ pour des temps de prédictions différents qui sont : $T_p=0.001\text{s}$, $T_p=0.002\text{s}$, $T_p = 0.003\text{s}$.

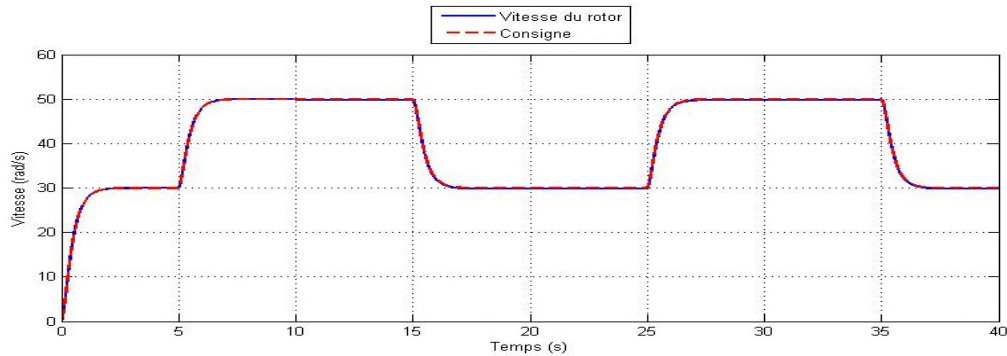


Fig. (III.6) : Suivi de consigne en charge pour $T_p=0.001\text{s}$

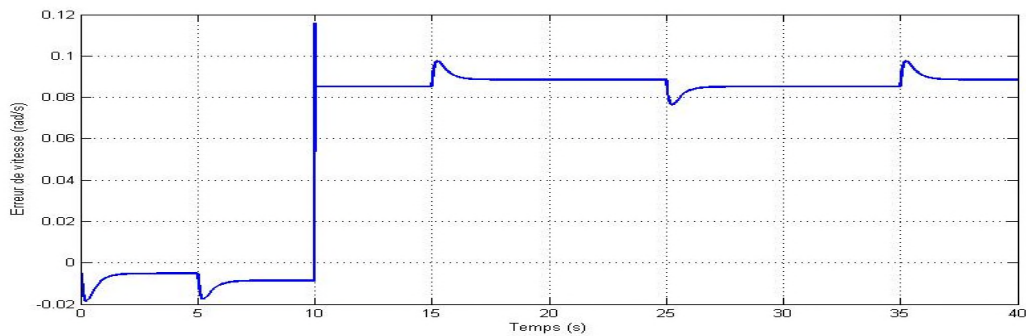


Fig. (III.7) : Erreur de vitesse en charge pour $T_p=0.001\text{s}$

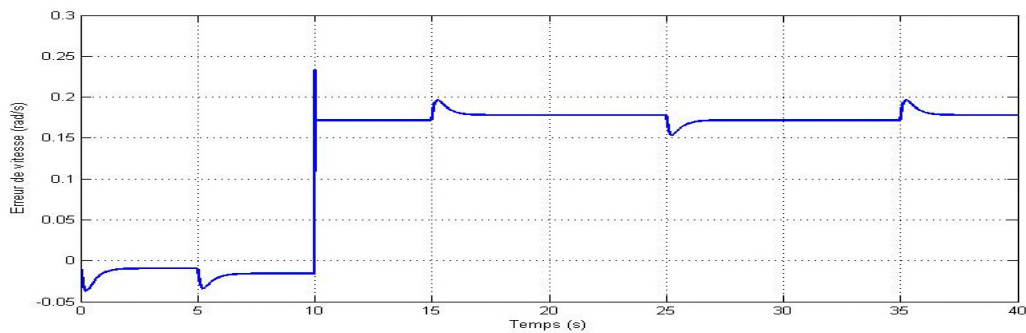


Fig. (III.8) : Erreur de vitesse en charge pour $T_p=0.002\text{s}$

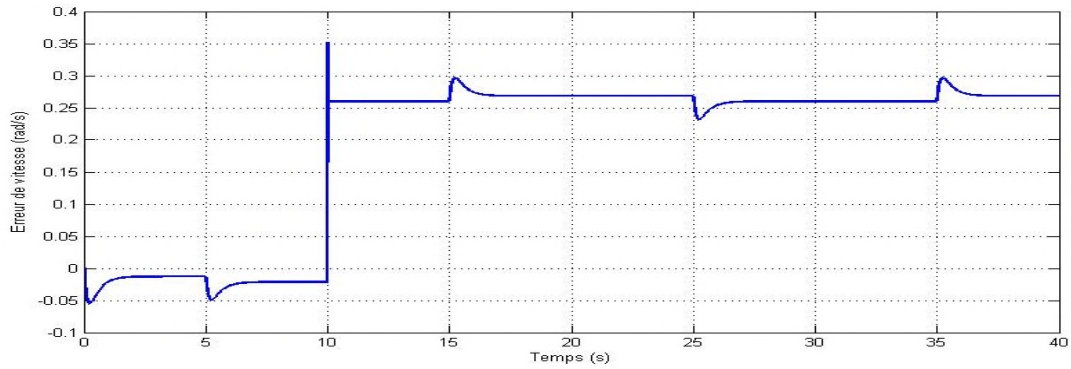


Fig. (III.9) : Erreur de vitesse en charge pour $T_p=0.003s$

Contrairement aux résultats de simulation à vide, on remarque qu'à partir de l'application de la charge à l'instant $t=10s$ l'erreur augmente considérablement pour atteindre les valeurs suivantes : pour $T_p=0.003s$ l'erreur est 0.35rad/s pour $T_p=0.002s$ l'erreur est 0.23 rad/s et pour $T_p=0.001s$ l'erreur devient 0.116 rad/s , donc les temps de prédiction jouent un rôle dans la minimisation de l'erreur qui est due à la charge sans la pallier définitivement.

III.4.3 Résultats de simulation de la GPC sens inverse :

Les figures (III.10), (III.11), (III.12), (III.13) représentent les résultats de simulation pour la poursuite de la vitesse de référence et l'erreur de vitesse du MCC en inversant le sens de rotation pour des temps de prédictions différents qui sont : $T_p=0.001s$, $T_p=0.002s$, $T_p=0.003s$.

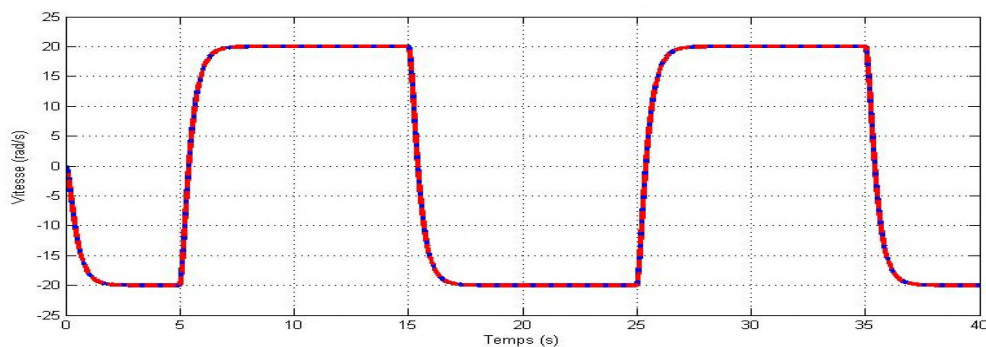


Fig. (III.10) : Suivi de consigne inverse $T_p=0.001s$

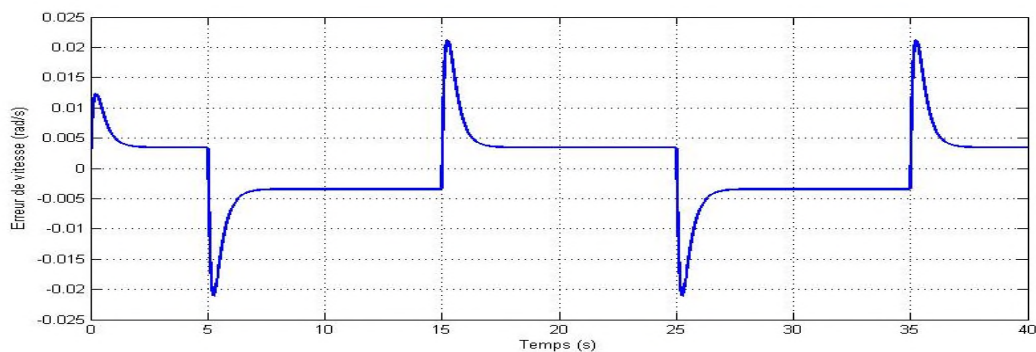


Fig. (III.11) : Erreur de vitesse pour $T_p=0.001s$

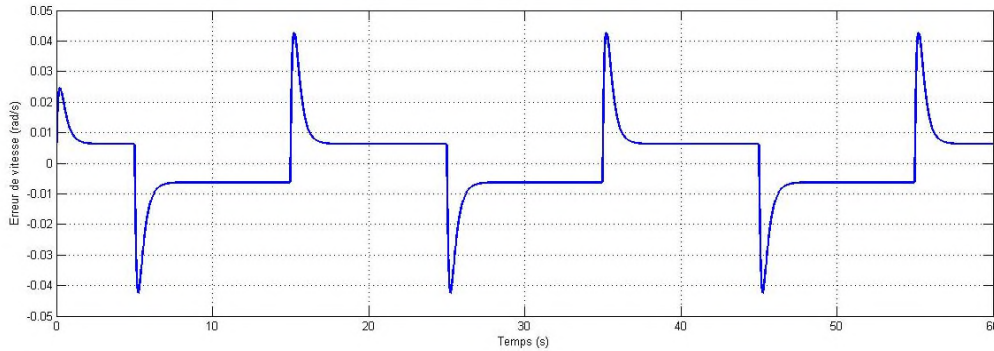


Fig. (III.12) : Erreur de vitesse pour $T_p=0.002s$

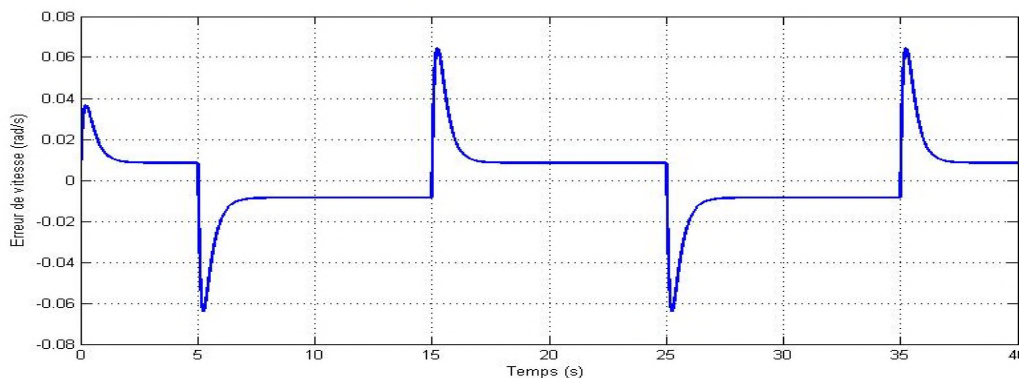


Fig. (III.13) : Erreur de vitesse pour $T_p=0.003s$

Les figures (III.11), (III.12), (III.13) montrent clairement la diminution de l'erreur de vitesse suivant la diminution des temps de prédictions T_p . On remarque que pour $T_p=0.003s$ l'erreur est de 0.06 rad/s et pour $T_p=0.002s$ l'erreur devient 0.04 rad/s , finalement pour $T_p=0.001$ elle diminue pour devenir 0.02 rad/s .

III.4.4 Résultats de simulation de la GPC pour les variations paramétriques :

Les figures suivantes illustrent l'influence des variations paramétriques (mécaniques et électriques) sur le comportement du MCC à la commande prédictive pour des temps de prédictions différents qui sont : $T_p=0.001s$, $T_p=0.002s$, $T_p=0.003s$. A l'instant $t=25s$ on fait varier la résistance pour $R=3*0.5\Omega$ pour des testes à vide, ensuite à l'instant $t=20s$ on applique une charge $C_r=5N.m$ pour un second teste. Pour les mêmes temps de prédictions on effectue une autre série de testes à vide et en charge $C_r=5N.m$ à l'instant $t=20s$ avec une variation mécanique du coefficient du frottement $f=1.1*0.01 \text{ N.m}$ à l'instant $t=25s$.

La figure ci-dessous montre bien les variations paramétriques du système étudié :

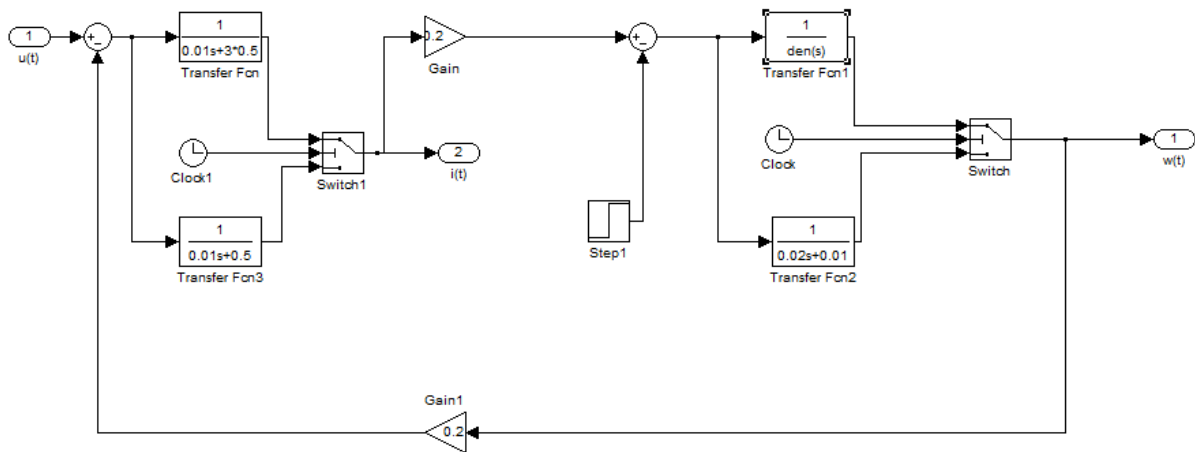


Fig. (III.14) : Schéma bloc des variations paramétriques du MCC

Variation des paramètres électriques à vide :

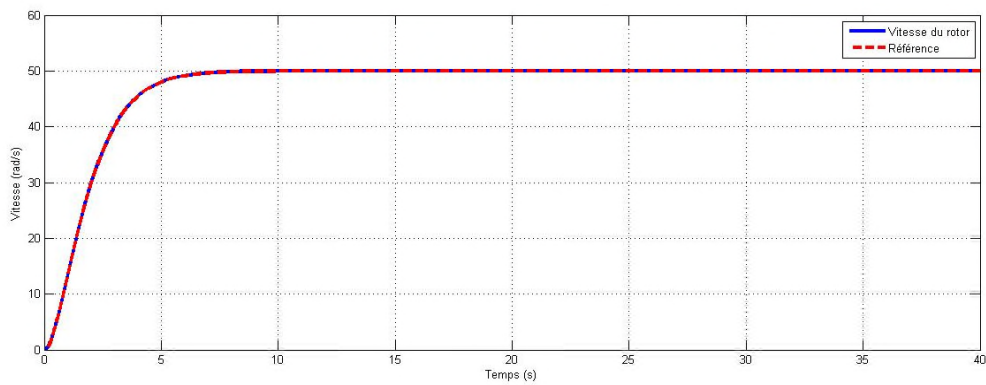


Fig. (III.15) : Suivi de consigne à vide pour $T_p=0.001s$

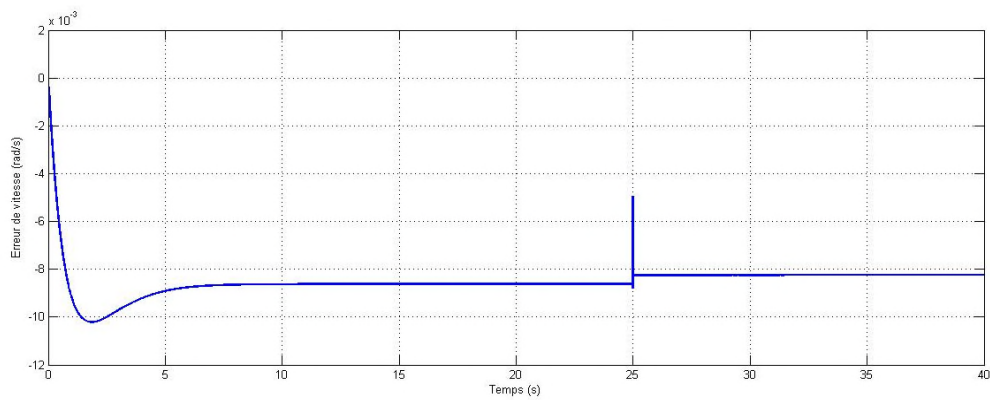


Fig. (III.16) : Erreur de vitesse à vide pour $T_p=0.001s$

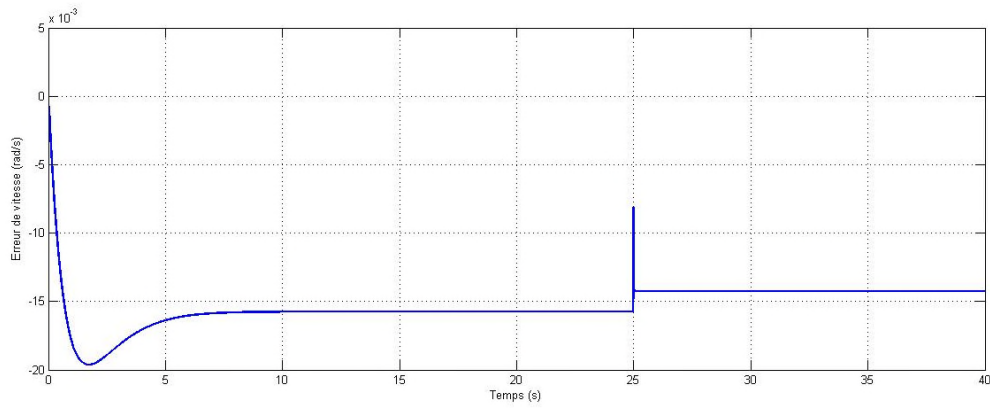


Fig. (III.17) : Erreur de vitesse à vide pour $T_p=0.002s$

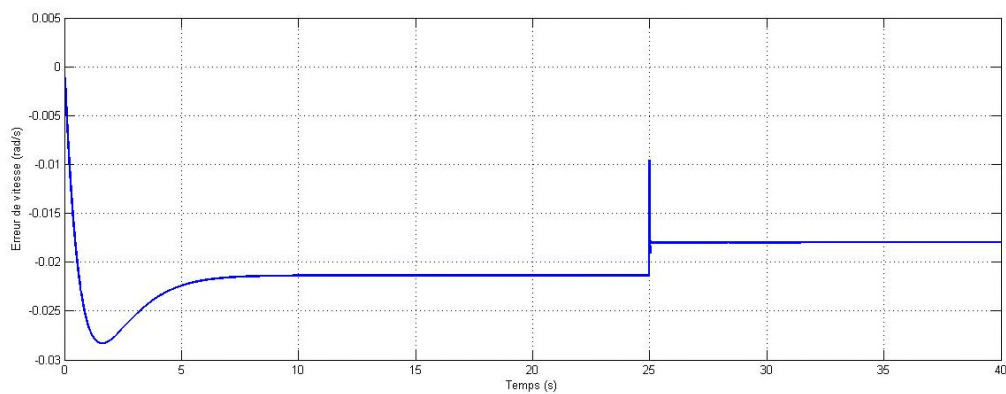


Fig. (III.18) : Erreur de vitesse à vide pour $T_p=0.003s$

Les figures précédentes (III.16), (III.17), (III.18) montrent clairement l'apparition d'une erreur de vitesse due à la variation électrique à l'instant $t=25s$, cette dernière est compensée par la diminution des temps de prédiction.

Variation des paramètres électriques en charge :

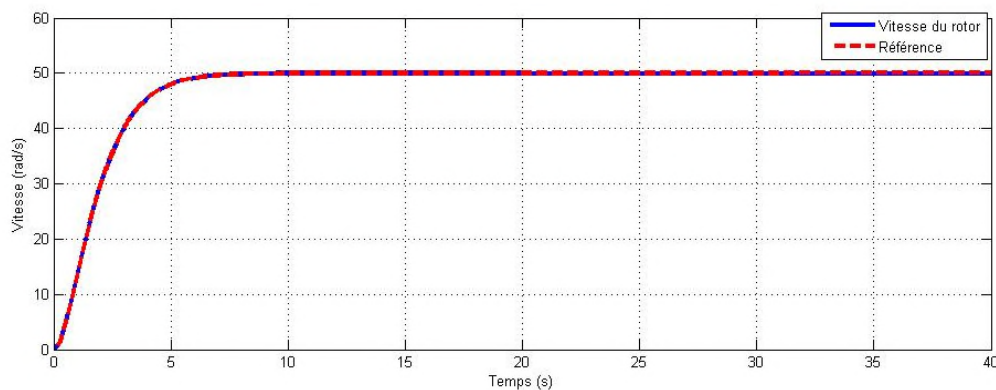


Fig. (III.19) : Suivi de consigne en charge pour $T_p=0.001s$

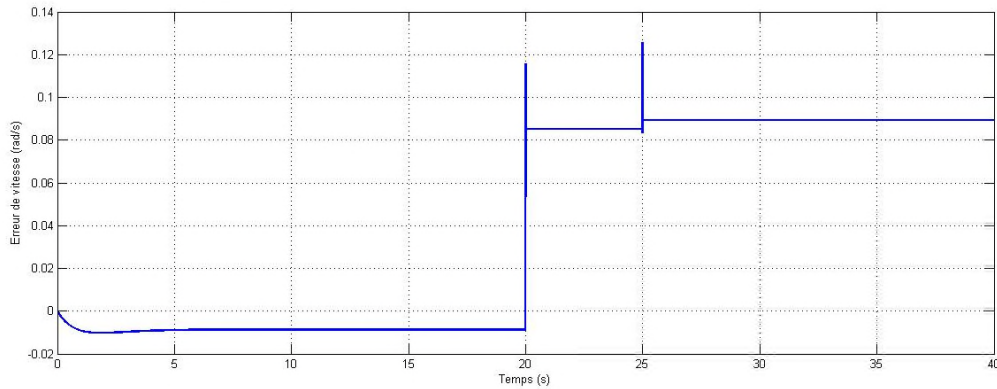


Fig. (III.20) : Erreur de vitesse en charge pour $T_p=0.001s$

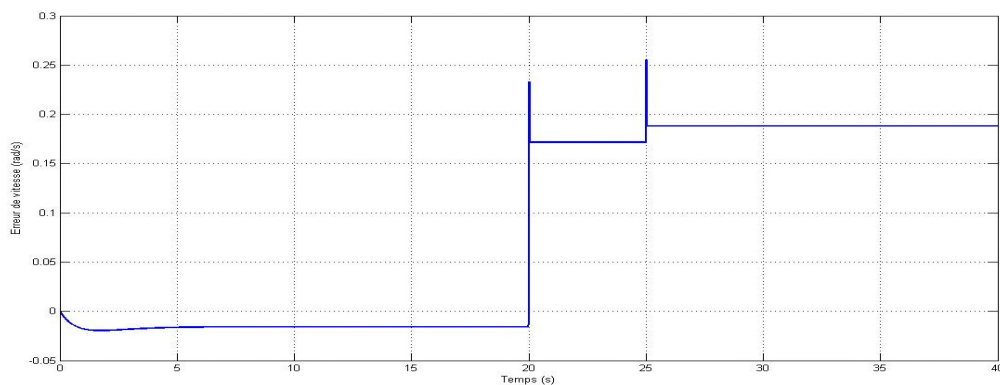


Fig. (III.21) : Erreur de vitesse en charge pour $T_p=0.002s$

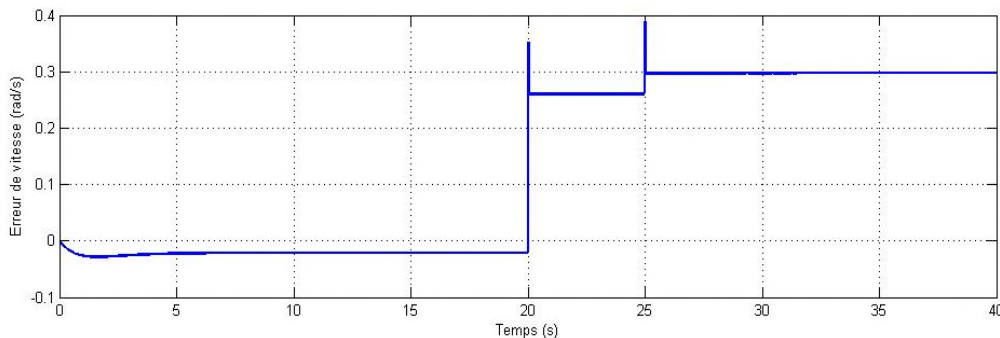


Fig. (III.22) : Erreur de vitesse en charge pour $T_p=0.003s$

Les résultats de simulations en charge avec les variations des paramètres électriques illustrés dans les figures (III.20), (III.21), (III.22) pour les différents temps de prédictions montrent une erreur de vitesse due à la charge à l'instant $t=20s$, ensuite plus loin à l'instant $t=25s$ on remarque une autre erreur de vitesse causée par la variation du paramètre électrique. Elles se traduisent par une décélération de la vitesse de sortie du MCC qui se compense très vite grâce au couple moteur, la diminution des temps de prédictions permettent de meilleures performances de la commande prédictive en réponse aux perturbations.

Variations des paramètres mécaniques à vide :

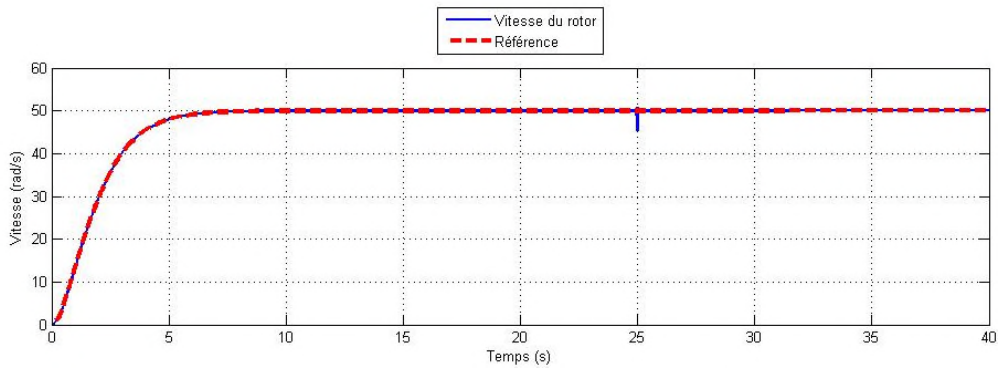


Fig. (III.23) : suivi de consigne à vide pour $T_p=0.001s$

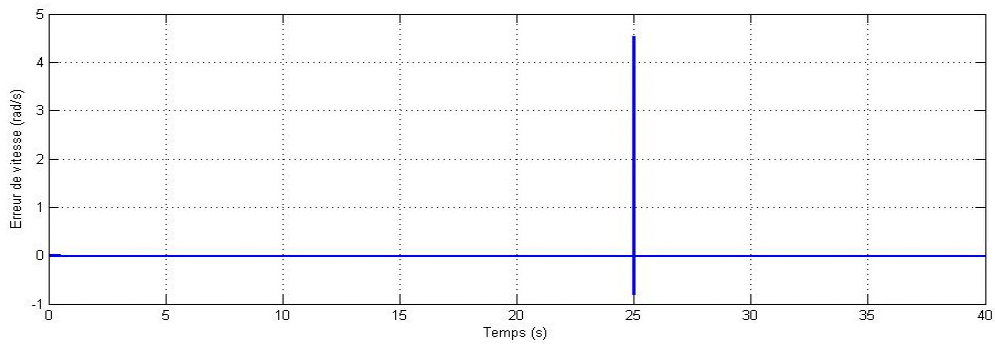


Fig. (III.24) : Erreurs de vitesse à vide pour $T_p=0.001s$

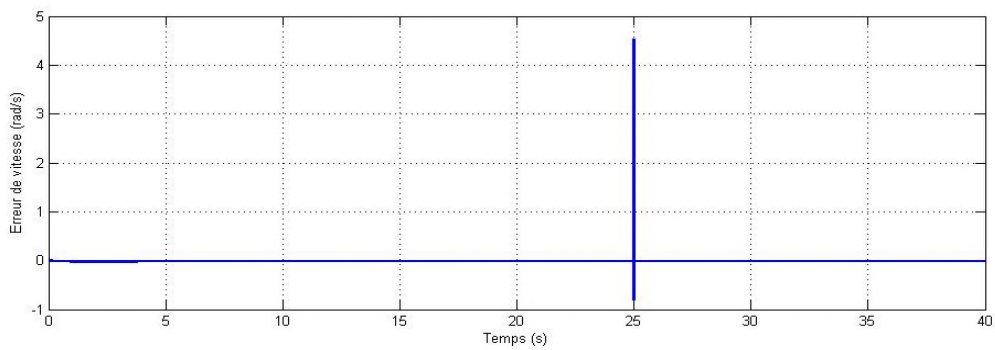


Fig. (III.25) : Erreurs de vitesse à vide pour $T_p=0.002s$

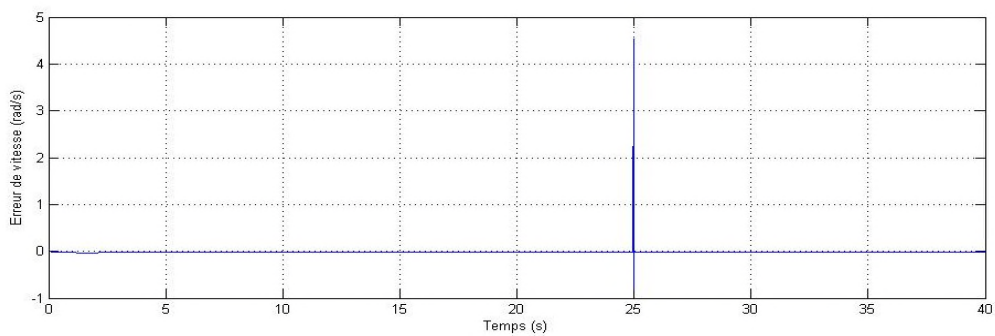


Fig. (III.26) : Erreurs de vitesse à vide pour $T_p=0.003s$

La variation du coefficient de frottement à vide à l'instant $t=25s$ donne les figures précédentes qui sont (III.23), (III.24), (III.25), (III.26) on constate qu'à cet instant apparaît une erreur de vitesse qui cause la diminution de la vitesse du MCC qui regagne très vite la référence grâce au régulateur prédictif.

Variation des paramètres mécaniques en charge :

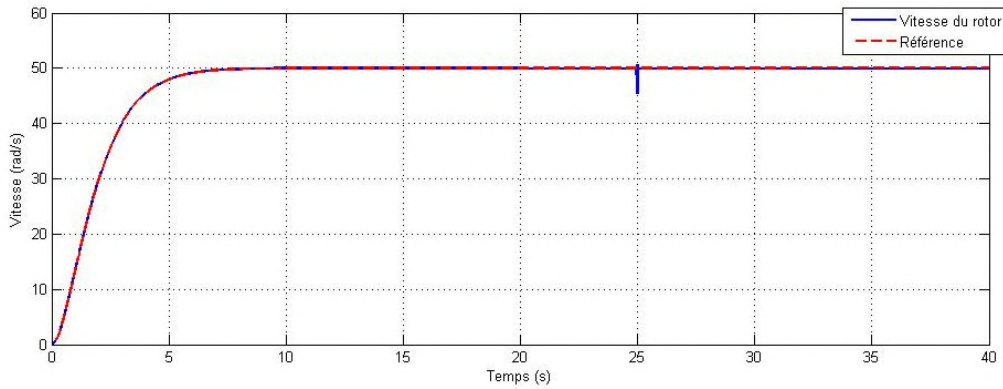


Fig. (III.27) : Suivi de consigne en charge pour $T_p=0.001s$

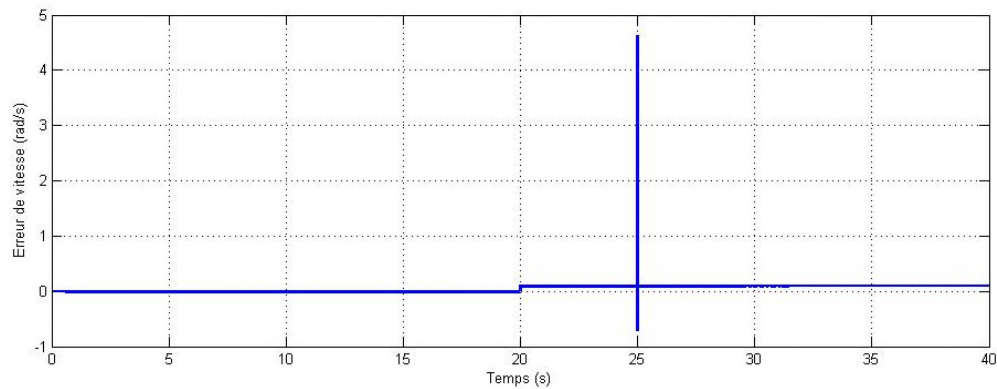


Fig. (III.28) : Erreur de vitesse en charge pour $T_p=0.001s$

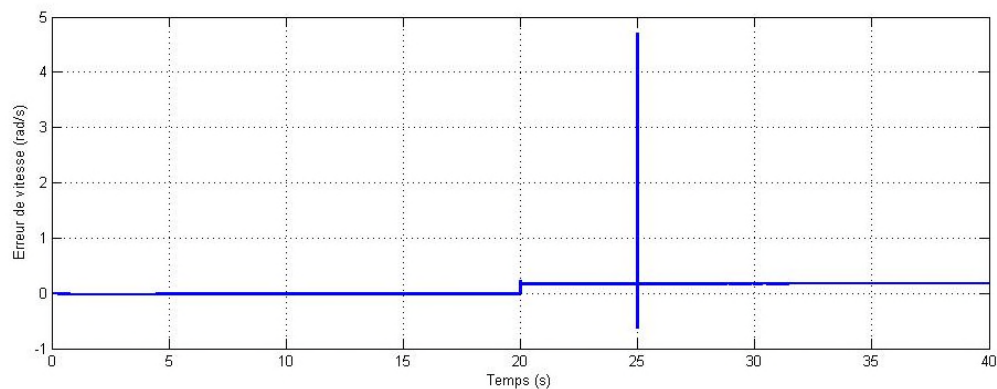


Fig. (III.29) : Erreur de vitesse en charge pour $T_p=0.002s$

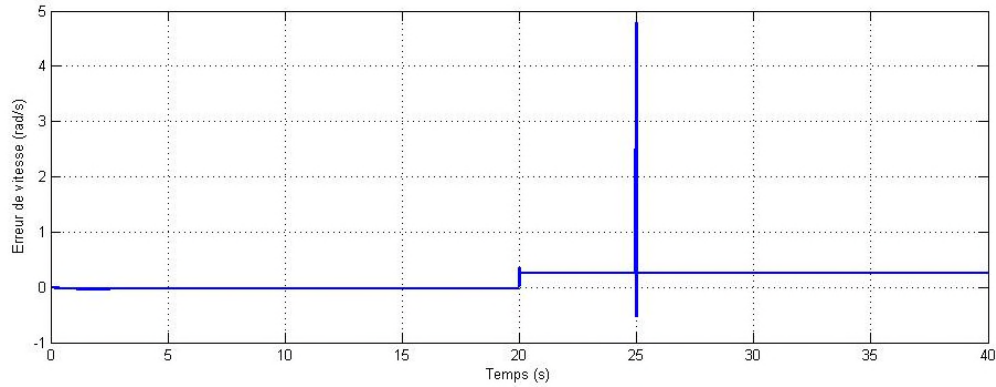


Fig. (III.30) : Erreurs de vitesse en charge pour $T_p=0.003$ s

Les figures (III.27), (III.28), (III.29), (III.30) montrent l'apparition de 2 erreurs de vitesse, la première est due à l'application de la charge à l'instant $t=20$ s, cette dernière est gérée avec la diminution des temps de prédictions qui permettent de la minimiser, par contre l'erreur de vitesse causée par la variation mécanique reste fixe aux variations des temps de prédiction.

III.5 Conclusion :

On a étudié et synthétisé la commande prédictive généralisée à temps continu qui est une combinaison de la prédiction des sorties futures du système (MCC) avec le calcul de la commande optimale assurant la minimisation de la fonction du cout sur un horizon fuyant.

Les résultats obtenus montrent bien que la commande prédictive donne des résultats très satisfaisants en réponse aux rejets des perturbations, la poursuite de trajectoire et la robustesse aux variations des paramètres électriques et mécaniques.

On constate aussi que la poursuite optimale de la trajectoire de référence nécessite d'agencer certains paramètres du régulateur prédictif en fonction de la nature du système à commander qui sont les temps de prédictions car ils ont une grande influence sur le comportement de ce dernier.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale :

Dans ce mémoire on a étudié une technique de la commande prédictive appliquée à une machine à courant continu.

Premièrement, on a cité différentes stratégies de commandes et leurs principes de fonctionnement (la commande adaptative, la commande optimale et la commande neuronale), ensuite nous nous sommes intéressés à la commande prédictive et ses différentes variantes, leurs principes de fonctionnement et les domaines d'usages.

Deuxièmement, on a modélisé le MCC par plusieurs méthodes, mais on a retenu la représentation interne du système (modèle d'état) pour la suite de notre travail.

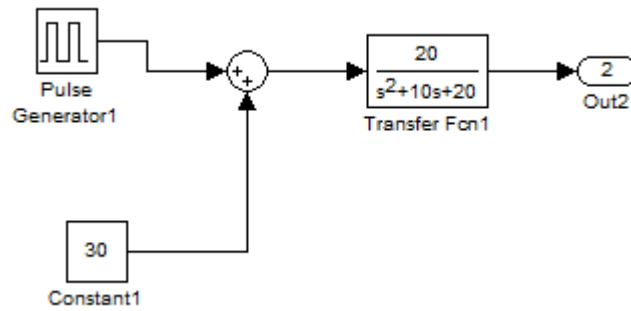
Ensuite on a constaté que les résultats de simulation indiquent de bonnes performances de poursuite de trajectoire, le rejet de perturbations et la robustesse aux changements paramétriques. , On a montré qu'on peut améliorer les performances de sortie du processus commandé en agissant sur les paramètres du régulateur (Temps de prédiction) qui ont une influence directe sur la commande générée par le régulateur prédictif.

L'importance du travail réalisé au niveau industriel nous conduit vers plusieurs perspectives qui sont :

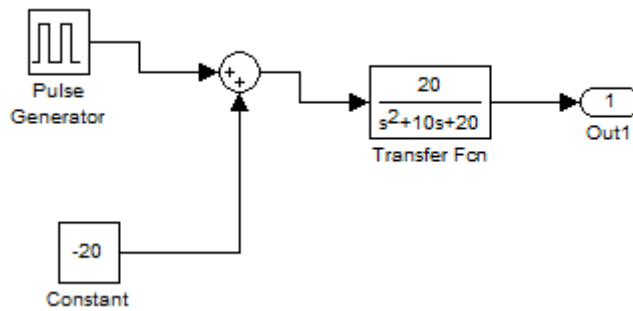
- Utilisation d'un algorithme génétique pour optimiser les paramètres de réglages.
- Elargir l'application de la commande GPC aux différents types de moteurs.
- La réalisation d'essais expérimentaux.

Annexe

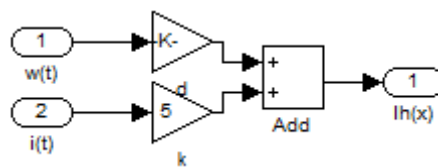
Les constituants des sous-systèmes de la figure (III.1) sont :



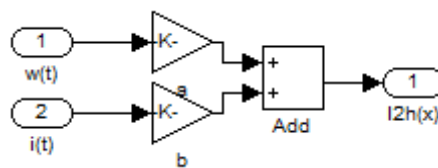
Vitesse de consigne pour les essais à vide et en charge



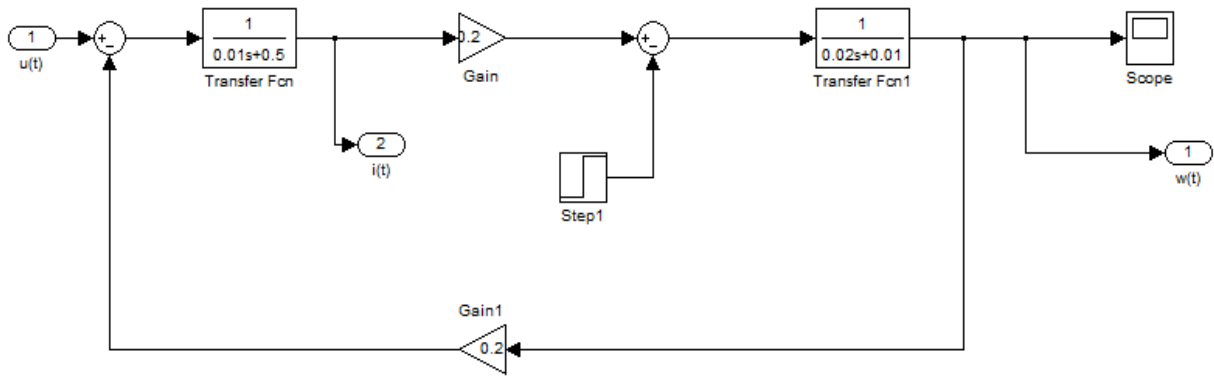
Vitesse de consigne en sens inverse



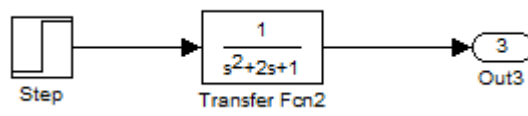
Première dérivée de Lie



Deuxième dérivée de Lie



Modèle du moteur choisi



Vitesse de consigne pour les essais avec des variations paramétriques

Bibliographie

- [1] Roland S. Burns, “Advanced Control Engineering“, Butterworth-Heinemann, 2001.
- [2] Patrick Boucher, Didier Dumur, “La commande prédictive avancées et perspectives“, Lavoisier, 2006.
- [3] Fabrice DESCHAMP, « Cours BAC S SI – Convertir L’énergie – Machine à Courant Continu » Sciences de L’ingénieur, LYCEE JACQUES PREVERT
- [4] Eduardo F. Camacho, Carlos Bordons, Model Predictive Control, Springer publication, London, 2007.
- [5] Patrick Boucher, Didier Dumur, “Commande prédictive“, Editions Technip, 1996.
- [6] Luc Lasne, Notions de base et machine électrique, Dunod, Pairs, 2005.
- [7] S. Joe Qin, Thomas A. Badgwell, “A survey of industrial model predictive control technology”, Control Engineering Practice, Vol. 11, 2003, pp. 733–764.
- [8] Cutler C R, Ramaker B, “Dynamic Matrix Control - A computer control Algorithm”, Proceedings of the 1980 Joint Automatic Control Conference, San Francisco: American Automatic Control Council, Vol. WP5- 13, 1980.
- [9] J. Richalet, J. L. Estival, Ph. Fiani, “Industrial applications of Predictive Functional Control to metallurgical Industries”, IEEE, 1995, pp. 934-942.
- [10] Aline I. Maalouf, “Improving the Robustness of a Parallel Robot Using Predictive Functional Control (PFC) Tools”, Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision & Control, Manchester, Grand Hyatt Hotel, San Diego, CA, USA, December 13-15, 2006, pp. 6468-6473.
- [11] R.M.C.De Keyser, PH.G.A.Van De Velde and F.A.G.Dumortier, “A comparative Study of Self-adaptive Long range Predictive Control Methods”, Automatica, Vol. 24 (Issue 2), 1988, pp. 149-163.
- [12] R.M.C. De Keyser, A. Van Cauwenberghe, “Towards Robust Adaptive Control with Extended Predictive Control”, IEEE, Proceedings of 25th Conference on Decision & Control, Athens, Greece, December, 1986, pp. 1548-1549.
- [13] B. E.Ydstie, “Extended Horizon Adaptive Control”, 9th IFAC world congress, Budapest, Hungary, 1984.
- [14] W.-H. Chen, D.J. Balance, P.J. Gawthrop, J.J. Gribble et J. O’Reilly, Nonlinear PID predictive controller, IEE Proceedings, Control theory and application, vol. 146, no. 6, November 1999, 603-611.
- [15] A.Merabet, M. Ouhrouche, R.T. Bui et J.S. Thongam, Commande non linéaire à modèle prédictif pour une machine asynchrone, PhD thesis, Université du québec à Chicoutimi, 2007.

Bibliographie

- [16] H.Lehouche, « Cours automatique et informatique industrielle Master 1, commandes avancées » Génie électrique, université de Béjaia.