

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de L'Ingéniorat
Département : Électromécanique
Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electromécanique
Spécialité : Electromécanique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Commande Prédictive d'un système électromécanique

Présenté par : SLIMI Abdallah

Encadrant : BOUAKKAZ Messaoud

MCB

U.B.M. Annaba

Jury de Soutenance :

BELHAMRA Ali	Professeur	U.B.M. Annaba	Président
BOUAKKAZ Messaoud	MCB	U.B.M. Annaba	Encadreur
BOURAS Hichem	MCB	U.B.M. Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciements

Je remercie Dieu, le tout puissant, pour m'avoir donné la santé, la patience et surtout la volonté pour continuer mes études.

Je remercie mes parents de m'avoir accompagné dans mes études.

Mes vifs et sincères remerciements à Mon directeur de mémoire

Dr. Bouakkaz .M

Aux membres de jury

Vous me faite un grand honneur en acceptant de juger ce modeste travail ; je vous en remercie et vous témoigne ma profonde et respectueuse gratitude.

Je souhaite aussi remercier ici ma famille et mes amis pour leur soutien. J'adresse aussi ma sympathie a tous mes collègues du département d'électromécanique, à tout ceux qui m'ont apporté leur aide, à un moment ou autre

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail A mes chers et tendres
Parents,*

Ma MERE symbole de sacrifice, Douceur et Courage.

Mon PERE symbole de force et de confiance.

A MES cher Frère, Sœur et à toute la famille

*A mes collègues et à tous mes Amis et tous qui me
connait sans exceptions*

Abdallah

Résumé

La commande prédictive est une technique de commande avancée de l'automatique. Elle est née d'un besoin réel dans le monde industriel. Le présent travail porte sur l'étude de commande prédictive et la mise en œuvre d'une loi de commande prédictive pour contrôler la variation de vitesse du moteur à courant continu à excitation séparée par l'utilisation d'un logiciel de simulation MATLAB.

Mots clés :

Commande prédictive, moteur courant continu, MPC, MATLAB MPC toolbox..

Abstract

Predictive control is an advanced control technique of the automatic. It was born of a real need in the industrial world. This work focuses on the study of predictive control and the implementation of a predictive control law to control of the speed variation of the separately excited DC motor using the MATLAB-SIMULINK software

Keywords:

Predictive control, Direct Current motor, MPC, MPC MATLAB Toolbox

Sommaire

Chapitre 01

1. Introduction.....	1
2. Systèmes, théories des systèmes et théorie de contrôle.....	1
3 Différentes commandes avancées.....	3
3.1 Commande adaptative.....	3
3.1 .1 Différents topologies de la commande adaptative	3
3.2. Commande optimale.....	5
3.3. Commande par retour d'état.....	6
3.3.1. Placement de pôles	7
3.4. Commande robuste	7
4. Conclusion.....	7

Chapitre 02

1. Introduction.....	8
2. Historique.....	8
3. Philosophie et la stratégie de la commande prédictive.....	10
3.1 Eléments d'une commande prédictive.....	11
4. Les différents types d'algorithmes prédictifs.....	12
4.1 Commande prédictive PFC (commande prédictive fonctionnelle).....	12
4.2 Commande prédictive DMC (commande par matrice dynamique).....	13
4.3 Commande prédictive généralisé GPC (commande prédictive généralisée).....	13
5. La commande prédictive à base d'un modèle d'état	14
5.1 Calcul des prédictions.....	14
5.1.1 Calcul des prédictions des états et de la sortie.....	15
5.2 Optimisation.....	16
6. Application de la commande prédictive dans l'industrie.....	17

7 .Avantages de la commande prédictive.....	18
8. Conclusion.....	18

Chapitre 03

1.Introduction.....	19
2.Constituants de la machine à courant continu.....	19
3.Les différents types des moteurs à courant continu.....	20
3.1 Les moteurs à inducteur à aimant permanent.....	20
3.2 Les moteurs à inducteur bobiné.....	20
3.2.1 Excitation série.....	20
3.2.2 Excitation dérivation ou shunt.....	20
3.2.3 Excitation séparée ou indépendante	21
4. Simulation du la machine.....	21
4.1.Simulation d'une machine a courant continu à excitation séparée.....	21
4.1.1. vitesse de rotation.....	22
4.1.2. Couple moteur	23
4.1.3.Couple moteur et couple résistant.....	24
4.1.4. Caractéristique électromécanique.....	25
4.2. Simulation d'une machine a courant continu à excitation shunt.....	25
4.2.1. vitesse de rotation.....	27
4.2.2. Couple moteur.....	28
4.2.3.Couple moteur et couple résistant.....	29
5. Modélisation D'un Moteur A Courant Continu A Excitation Séparée	29
5.1 Hypothèses simplificatrices.....	29
5.2 Equation différentielle.....	30
5.3 Equation d'état.....	32
5.4 Fonction de transfert d'un MCC.....	32
5.5 schéma-bloc du MCC.....	33
6. Conclusion.....	33

Chapitre 04

1. Introduction	34
2. Présentation du logiciel MATLAB	34
3. Le système de commande MPC proposé.....	34
4. Conclusion.....	40

Liste des figures

Chapitre 01

Fig.1.1 : Système de contrôle en boucle ouverte.....	2
Fig 1.2 : Système de contrôle en boucle fermée	3
Fig 1.3 : Structure de commande adaptative avec modèle de référence	4
Fig 1.4 : Commande à gain programmé.....	5
Fig.1.5. Forme standard d'un retour d'état.....	6

Chapitre 02

Fig. 2.1 : Philosophie de la commande prédictive.....	10
Fig. 2.2 : Schéma de principe de la commande prédictive.....	11
Fig. 2.3 : Stratégie de commande prédictive.	12
Fig. 2.4 : Principe de fonctionnement de la commande prédictive généralisée.....	14

Chapitre 03

Fig. 3.1 : Constitution du moteur à courant continu.....	21
Fig. 3.2 : Bloc SIMULINK moteur à excitation séparée.....	21
Fig. 3.3: Allure de la vitesse.	22
Fig. 3.4 : Allure du couple moteur	23
Fig. 3.5 : Allure du couple résistant	24
Fig. 3.6 : Allure de la caractéristique électromécanique	25
Fig. 3.7: Bloc SIMULINK moteur shunt	26
Fig. 3.8: Allure de la vitesse.....	27
Fig. 3.9: Allure du couple moteur.....	28
Fig. 3.10: du couple résistant.....	29

Fig. 3.11 : Schéma d'un moteur à courant continu.....	30
--	----

Chapitre 04

Fig. 4.1 : Modèle du contrôle MPC appliqué à la MCC sous SIMULINK.....	34
Fig. 4.2 : interface MPC design Tools	36
Fig. 4.3 : Configuration des paramètres (système).....	36
Fig. 4.4 : Configuration des paramètres (contraintes).....	37
Fig. 4.5 : Configuration des paramètres (Régulateur).....	37
Fig. 4.6 : Allure de la vitesse face à une variation de consigne 1 ^{er} scénario.....	38
Fig. 4.7 : Evolution de la tension d'induit commandée par MPC.....	38
Fig. 4.8 : Allure de la vitesse face à une variation de consigne à l'instant 1 sec 2 ^{em} scénario....	38
Fig. 4.9 : Evolution de la tension d'induit commandée par MPC 2 ^{em} scénario.....	39
Fig. 4.10 : Allure de la vitesse face à une variation de consigne à l'instant 5 sec 3 ^{em} scénario...39	
Fig. 4.11 : Evolution de la tension d'induit commandée par MPC 3 ^{em} scénario.....	39

Notations et symboles

MCC : Le moteur à courant continu.

MPC : Le contrôle du modèle prédictif (Model Predictive Control).

PFC : La commande prédictive fonctionnelle (Predictive Functional Control).

DMC : La commande par matrice dynamique (Dynamic Matrix Control).

GPC : La commande prédictive généralisée (Generalised Predictive Control).

R_a : Résistance aux bornes de l'induit. [Ω]

L : inductance d'induit [mH]

K_e : Constante de f.e.m.

K_c : Constante de couple

J : Moment d'inertie [kg m²]

f : Coefficient de frottement [N.m/rad/s]

INTRODUCTION GENERALE

Etant donné un système, défini comme un ensemble physique, l'objectif de l'automatique est de l'analyser et de le commander. La synthèse de la loi de commande, effectuée à l'aide d'un modèle, aboutit à la conception d'un bloc de commande appelé régulateur. Un ensemble de techniques, appelé commande prédictive, permet l'ajustement automatique, en ligne et en temps réel, des paramètres des régulateurs.

La commande prédictive se différencie des autres techniques de commande par le fait qu'elle doit être résolue en ligne. Elle consiste à optimiser, à partir des entrées/sorties d'un système, le comportement futur prédit du système considéré. La prédiction est faite à partir d'un modèle interne du système sur un intervalle de temps fini appelé horizon de prédiction. La solution du problème d'optimisation est un vecteur de commande dont la première entrée de la séquence optimale est injectée au système. Le problème est à nouveau résolu sur l'intervalle de temps suivant en utilisant les données du système mises à jour.

La commande prédictive (ou compensation ou correction anticipatrice) a pour objectif de commander des systèmes industriels complexes. Le principe de cette technique est d'utiliser un modèle dynamique du processus à l'intérieur du contrôleur en temps réel afin d'anticiper le futur comportement du procédé.

Les stratégies résultantes conduisent aux deux grandes techniques prédictives à mettre en œuvre et largement utilisées à ce jour en pratique. L'une s'appelle la commande prédictive à base de modèle MPC (Model predictive control).

Dans ce mémoire, nous allons nous intéresser à la commande prédictive à base de modèle à modèle (MPC) se basant sur la minimisation d'un indice de performances,

Ce mémoire comporte quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons les notions de base de la théorie de contrôle et la commande avancée. Dans le deuxième chapitre nous détaillons la méthode de la commande prédictive et en particulier la commande prédictive à base modèle (MPC).

Le troisième chapitre est consacré à l'étude et à la modélisation du moteur à courant continu.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons les résultats de simulation de l'application de l'algorithme MPC pour commander la vitesse de rotation du moteur.

Chapitre I

Etat d'art de la commande avenacée

1. Introduction:

La théorie des systèmes a connu des progrès importants à travers les années. La plupart des techniques d'analyse et de synthèse sont basées sur des modèles linéaires des procédés commandés, la nature non linéaire des systèmes physiques et en raison des performances de plus en plus croissantes exigées dans les applications industrielles, alors l'usage des techniques de commande avancée (commande adaptative, commande optimale, commande prédictive,...) devient indispensable.

De nos jours, les techniques de commande avancée deviennent l'un des domaines de recherche les plus actifs. En parallèle, on dispose de calculateurs puissants et une variété d'outils logiciels. Ce qui facilite la synthèse de lois de commande avancées et leur exécution, sans difficultés en temps réel. [23]

2. Systèmes, théories des systèmes et théorie de contrôle :

2.1. Système:

Un système est ensemble des choses combinées par sa nature d'existence ou par l'homme pour former un tout complet et complexe.

2.2. Théorie des systèmes:

C'est l'étude des interactions et comportements de cet assemblage des "choses" quand ils sont contraints à certaines conditions ou a des entrées. La nature abstraite de la théorie des systèmes est reliée étroitement en faite aux propriétés mathématiques que sur les formes physiques des constituants.

2.3. Théorie de contrôle:

Elle est souvent concernée pour des applications physiques. Un système de contrôle est considéré quel que soit le système existant dont le but est de réguler ou contrôler l'échange d'énergie, l'information ou autres quantités selon une manière désirée. En terme général, un système de contrôle est l'interconnections d'un ensemble des composants ou des unités fonctionnelles de telle manière pour produire des résultats désirés dans ce texte, la théorie de contrôle, couvre toutes les questions attachées à l'analyse et la conception des systèmes de contrôle. Dans la figure. 1.1, c'est la représentation générale d'un système de contrôle en boucle ouverte. L'entrée on la commande $uc(t)$ est choisie en se basant sur les objectifs et toutes les connaissances à priori valables du système. L'entrée n'est pas influencée par la sortie (pas de répercussions) qui est représentée par $y(t)$. Si une perturbation $p(t)$ agit sur le système en boucle ouverte (b.0), ou son comportement et sa nature ne sont pas entièrement

compris, donc la sortie $y(t)$ ne se comporte pas dynamiquement ou statiquement comme il est prévu (désirée).

Une autre classe plus générale des systèmes de contrôle est les systèmes de contrôle en boucle fermée (**b.f**) qui sont illustrés dans la figure.2.2. En boucle fermée, la commande $y(t)$ est modifiée et agit sur le système d'une manière qu'une information sur le comportement de la sortie $y(t)$ est exigée. Une chaîne de retour qui est souvent préférée à pour but est de faire pour suivre les comportements désirés au système au la présence des perturbations (entrées auxiliaires) et les changements imprévisibles internes (caractéristiques des paramètres). De même, ce n'est pas vrai qu'un système en boucle fermée est toujours supérieur à un système boucle ouverte. Quand les mesures des sorties sont entachées à des erreurs de mesure remarquables et quand les perturbations ne sont pas relativement importantes, les systèmes en boucle fermée peut avoir une performance qui est inférieures à celui des systèmes de contrôle en boucle ouverte.

En résumé, les systèmes de contrôle en boucle fermée réduisent considérablement les effets de la perturbation et rendent le système robuste.

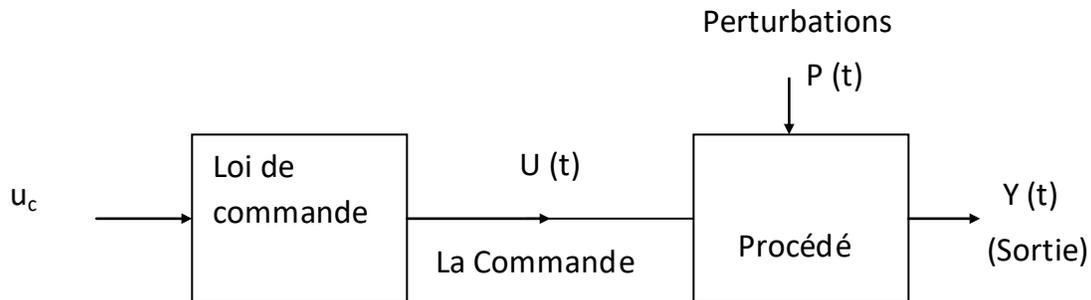


Figure 1.1: Système de contrôle en boucle ouverte.

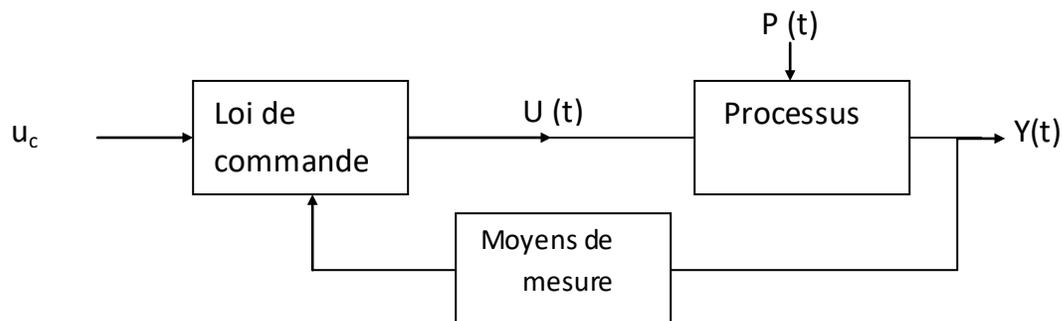


Figure 1.2: Système de contrôle en boucle fermée

3. Différentes commandes avancées:

Dans ses débuts, la théorie du contrôle était basée sur la transformation intégrale linéaire, laquelle facilite l'analyse et la synthèse des systèmes dans le domaine fréquentiel, (approches développées par Nyquist, Bode, Nichols, etc.....). Malheureusement, ces techniques sont limitées aux systèmes (SISO). Vu la nature non linéaire des systèmes et l'accroissement de leurs dimensions, les chercheurs ont envisagé des théories modernes de contrôle ou beaucoup d'analyse et de synthèse des systèmes peuvent être accomplies dans le domaine temporel. Ces techniques sont basées sur :

- l'assignement des pôles.
- Commande optimale.
- commande adaptative
- Commande par retour d'état
- Commande prédictive.
- Commande neuronale.
- Commande par logique floue.

3.1. Commande adaptative : [24]

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 différents 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.

3.1.1. Différents topologies de la commande adaptative :[25]

La commande adaptative est un ensemble de techniques destinées à ajuster automatiquement les paramètres du correcteur des systèmes de commande lorsque les caractéristiques du processus et les perturbations sont inconnues ou varient dans le temps, le mécanisme d'adaptation (algorithme

d'adaptation) modifie les paramètres du correcteur ajustable afin de maintenir l'indice de performance à la valeur désirée.

- **Commande adaptative avec modèle de référence**

La structure de commande adaptative avec modèle de référence est montrée par la figure (1.3), la différence entre la sortie du procédé et la sortie du modèle de référence est une mesure de la différence entre la performance réelle et la performance désirée. Cette information est utilisée par d'autres variables telles que le vecteur de commande et la sortie réelle du système.

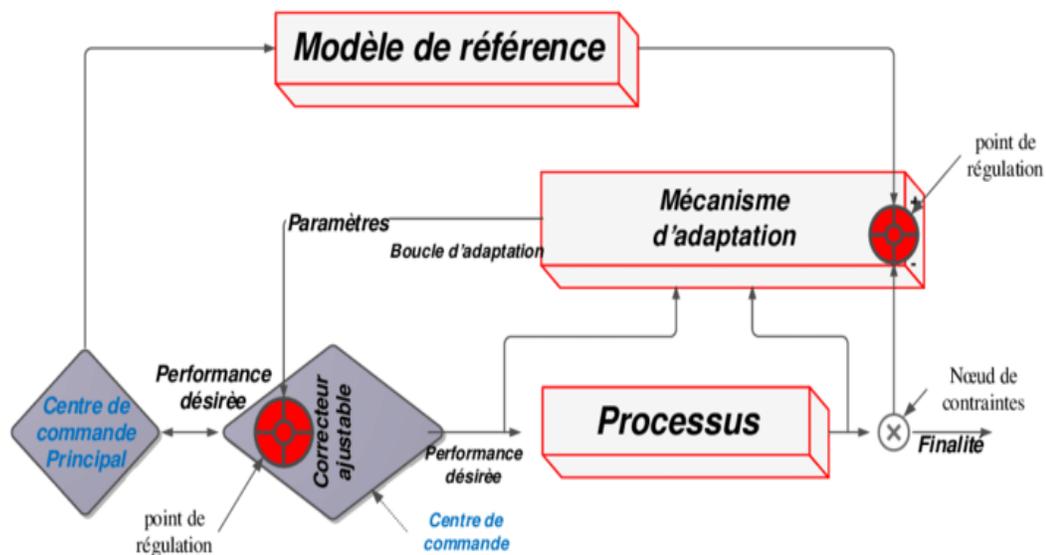


Figure 1.3: Structure de commande adaptative avec modèle de référence.

- **Commande adaptative à gain programme**

Dans ce type d'adaptation figure (1.4), 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. [25]

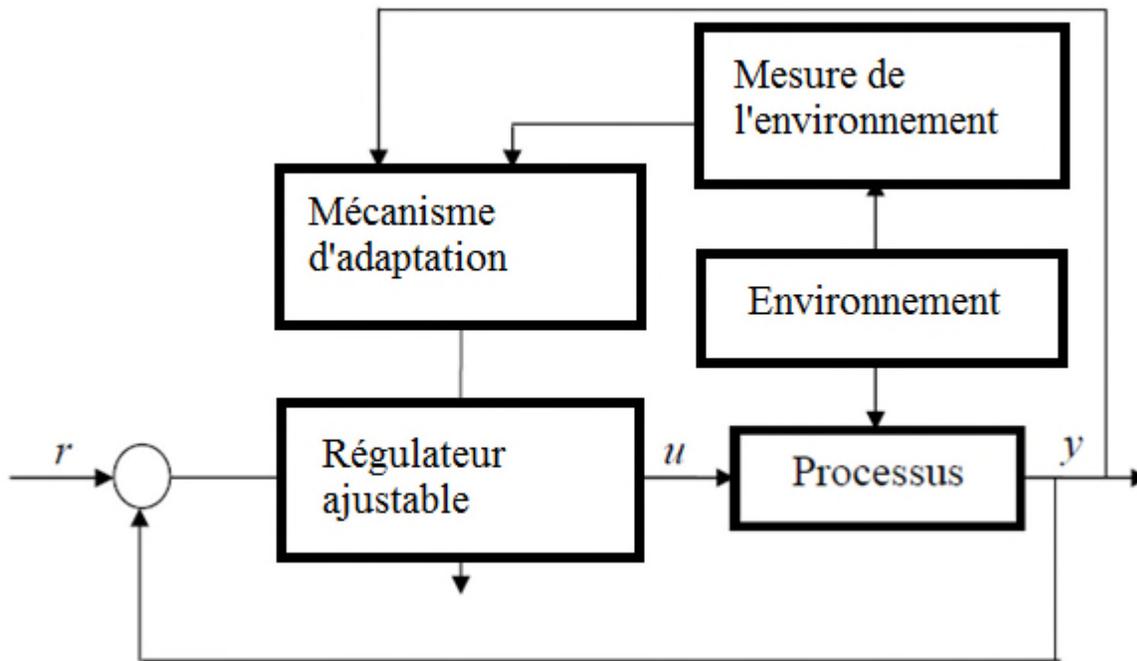


Figure 1.4 : Commande à gain programmé.

3.2. Commande optimale : [5]

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 u qui s'appliquera au système.

$$\dot{x} = g(x(t), u(t), t) \quad (1.1)$$

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

$$J = \int_{t_0}^{t_1} h(x(t), u(t), t) dt \quad (1.2)$$

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. Connue 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 important 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) [23]. 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.

3.3. Commande par retour d'état :[23]

La commande par retour d'état, inventée à la suite de la représentation d'état, utilise tous les états du système au travers d'un régulateur proportionnel. En supposant que l'état est entièrement mesurable et commandable, le régulateur par retour d'état est suit le schéma de la Figure (1.5). Contrairement au contrôle classique, la commande appliquée au système dépend de la dynamique de toutes les variables et non d'une seule. Cela permettra par un régulateur simple de régler toutes les dynamiques.

$$u(t) = -kx(t) \quad (1.3)$$

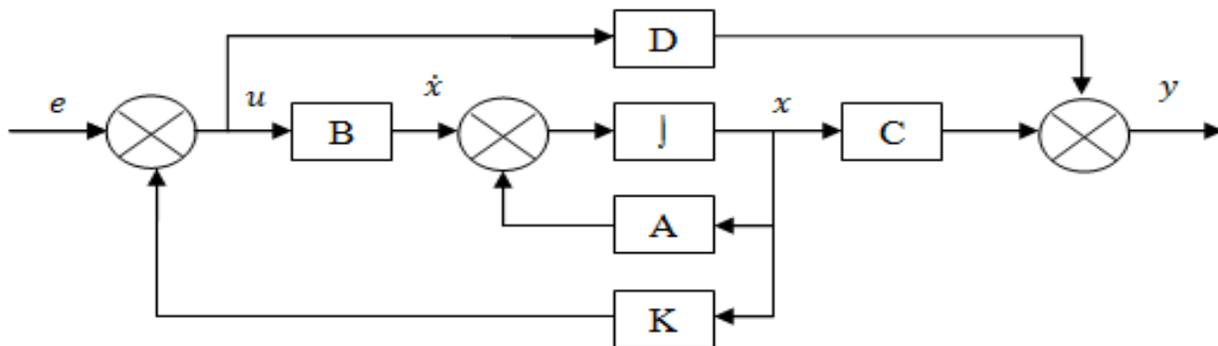


Fig.1.5. Forme standard d'un retour d'état.

A partir de cette structure, quatre méthodes peuvent définir les valeurs de la matrice de gain K :

- Les placements de pôles. Ils déterminent la matrice K et la dynamique du système en boucle fermée ($A - Bkt$) à partir des positions désirées des pôles. Un placement des vecteurs propres peut s'ajouter pour mieux caractériser le comportement du système;

- Les minimisations de critère (LQ). Elle règle le contrôleur par rapport à un critère à minimiser (performance, énergie...);
- Le contrôle robuste établit un régulateur, afin que celui-ci respecte des contraintes en stabilité et en performance par rapport aux incertitudes du système.

3.3.1. Placement de pôles :[3]

Le placement de pôles consiste à déterminer la valeur des gains d'un contrôleur afin de placer tout ou une partie des pôles du système en boucle fermée suivant la dynamique choisie par le concepteur. Un placement partiel des pôles peut se faire par un contrôle de sortie (uniquement avec les sorties mesurées). Par contre, un placement total implique une commande par retour d'état et impose la mesure de toutes les variables d'état du système. L'équation de la commande devient :

$$\dot{x} = (A - Bk) + Be \quad (1.4)$$

$$u = kx + e \quad (1.5)$$

Ceci montre qu'en boucle fermée, les pôles sont déplacés par la matrice K au travers de la matrice d'entrée B produisant ainsi la dynamique désirée. On choisit un K de façon que les pôles de FTBF soient tous stable l'opération s'appelle calcul de gain K par placement de pôles désirée en boucle fermé.

3.4. Commande robuste:[3]

La commande robuste est un type de commande qui vise à garantir les performances et la stabilité d'un système face à des perturbations du milieu et les incertitudes du modèle. En effet, le modèle mathématique qui modélise un système réel est une représentation qui vise à approximer au mieux, avec des hypothèses simplificatrices, le système qu'on veut commander. Il existe donc un écart entre le comportement observé du système réel et son modèle interne. La commande robuste vise à déterminer une loi de commande qui soit capable de garantir des critères de performance et stabilité pour un système dont le modèle varie autour du modèle théorique ou nominal. Par la même approche, on peut rendre le système robuste face aux perturbations extérieures (par exemple, une rafale de vent sur un avion de ligne) qui en somme peuvent être considérées comme une modification du modèle interne.

4. Conclusion:

Ce premier chapitre est réservé, essentiellement, aux rappels de notions sur différents techniques de commandes appliquées au système industriel. 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

Généralités sur la commande prédictive

1. Introduction:

Nos jours, avec les progrès observés dans le domaine des ordinateurs numériques, il est presque impossible de trouver un secteur de l'activité humaine qui ne soit touché par ce phénomène. L'emploi de l'ordinateur dans les processus de commande a permis l'implantation de techniques compliquées et sophistiquées qui permettent le développement de stratégies efficaces tout en restant de coût raisonnable ce qui était pratiquement impossible d'envisager avec les mécanismes et les dispositifs précédents. Un exemple de telles techniques est la commande prédictive [1].

La commande prédictive est née d'un besoin réel dans le monde industriel. Un besoin de systèmes de régulation capable de performances plus élevées que les contrôleurs classiques, à savoir PID, tout en respectant des contraintes de fonctionnement et de production toujours plus élevées.

2. Historique:

La fin de la décennie 70 été marquée par un intérêt pour la commande prédictive et surtout dans ses développements industriels. On peut citer les travaux de Richal et *et al*, où est formulé le problème de la commande heuristique prédictive basée modèle [MPHC "*Model Prédictive Heuristic Control*" appelé plus tard MAC "*Model Algorithmic Control*" [5], Cutler et Ramaker (1980), ont développé ce qui sera connu, plus tard, comme DMC "*Dynamic Matrix Control*", Un modèle dynamique du processus est utilisé dans les deux contributions (la réponse impulsionnelle dans la première et la réponse indicielle dans la seconde) en vue de quantifier l'effet des actions de commande sur la sortie, les commandes sont calculées pour minimiser l'erreur prédite sous restrictions d'exécution (fonction objectif). L'optimisation est répétée à chaque période d'échantillonnage, s'appuyant aussi sur les données mesurées sur le processus.[6]

Rapidement ces techniques sont devenues populaires dans les processus industriels grâce à la simplicité de l'algorithme et au fait qu'est utilisé un modèle dérivé de la réponse impulsionnelle ou indicielle, ce qui nécessite moins de paramètres que la formulation dans l'espace d'état ou la formulation entrée-sortie (fonction transfert).

Certains travaux de recherche académique basés sur la commande adaptative, ont développé des travaux basés sur les idées du prédictif pour des modèles formulés à partir d'une représentation entrée-sortie du système (fonction transfert).

La commande auto adaptative prédictive étendue développée dans [2] par de De Keyser et Van Cauwenberghe (1979) [le EPSAC "*Extended Prediction Self Adaptive Control*"] propose un signal de

commande constant pour tout l'horizon de prédiction, et qui est appliqué dès le début du calcul de la commande qui optimise le critère de coût choisi. Dans la commande adaptative à horizon étendu de Ydstie (1984) [6], une autre méthode le EHAC ("*Extended Horizon Adaptive Control*") [6], l'idée fondamentale consiste à calculer à chaque instant la séquence des signaux de commande pour essayer de maintenir la sortie future la plus proche possible de la consigne pour un horizon de temps plus grand que le retard présent sur le processus.

On peut trouver un résumé de ces méthodes et de leurs caractéristiques les plus importantes dans Clarke et Mohtadi [4].

Les années 90, ont marqué une vraie explosion dans le nombre des applications basées sur la commande prédictive à base de modèle (MPC) (d'abord aux Etats-Unis, plus tard au Japon et maintenant aussi en Europe). Il existe plusieurs applications réelles qui fonctionnent avec succès, dans l'industrie des processus chimiques ainsi que dans le domaine de la robotique. Cela s'est toujours accompagné d'une forte activité de recherche. [5]

Malgré le développement étendu qu'a connu le MPC pendant la fin de la décennie 70 et celle de 80, ce n'est qu'au début des années 90 qu'on commence à se préoccuper de l'étude de la stabilité et de la robustesse en MPC.

Le MPC peut aussi être formulé dans le contexte de la représentation en variables d'état. Ceci permet non seulement de faire usage de théorèmes et résultats existant dans la théorie d'espace d'état, mais aussi facilite l'extension de la théorie MPC à des cas plus complexes comme ceux des systèmes avec perturbations stochastiques, bruits sur les variables de mesure ou commande multi variable.

Étant donné la charge élevée de calcul qu'exigent les algorithmes de programmation quadratique dans la stratégie MPC, beaucoup d'auteurs commencent à étudier la possibilité d'obtenir une solution rapide fournissant un résultat le plus souvent sous-optimal dans le problème d'optimisation. On y présente une solution explicite pour le cas de retour d'états pour systèmes nominaux. On démontre que la loi de commande obtenue, peut être considérée linéaire à morceaux [7]

Cette approche présente l'inconvénient lié au nombre de régions dans lequel doit être divisé l'espace d'état, ce qui croît de manière combinatoire dans la mesure où augmente l'horizon de prévision. Ceci exige un temps de recherche important pour déterminer la région de travail appropriée, ce qui n'est pas convenable pour beaucoup de cas d'application pratique.

3. Philosophie et la stratégie de la commande prédictive :

Fondamentalement, l'algorithme de commande prédictive prend en compte le comportement futur du système afin d'élaborer une commande permettant le meilleur suivi d'une trajectoire connue

Le principe de la commande prédictive consiste à créer pour le système à commander un effet anticipatif par rapport à une trajectoire à suivre connue à l'avance, en se basant sur la prédiction du comportement futur du système et en minimisant l'écart de ces prédictions par rapport à la trajectoire au sens d'une certaine fonction coût, tout en respectant des contraintes de fonctionnement.

Par exemple, le conducteur d'un véhicule connaît la trajectoire de référence désirée à l'avance (la route) sur un horizon de commande fini (son champ visuel), et en prenant en compte les caractéristiques de la voiture (Modèle mental du comportement du véhicule), il décide quelles actions (accélérer, freiner ou tourner le volant) il faut réaliser afin de suivre la trajectoire désirée. Seule la première action de conduite est exécutée à chaque instant, et la procédure est répétée à nouveau pour les prochaines actions. [9]

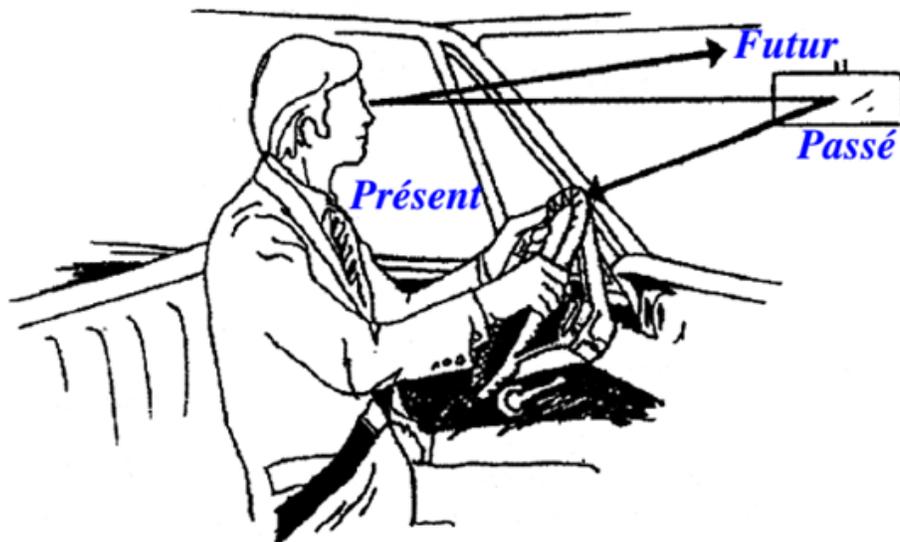


Figure (2.1) : Philosophie de la commande prédictive. [10]

La figure (2.2) résume le principe de la commande prédictive dans le cas général d'un problème de commande optimale sous contraintes sur un horizon glissant.

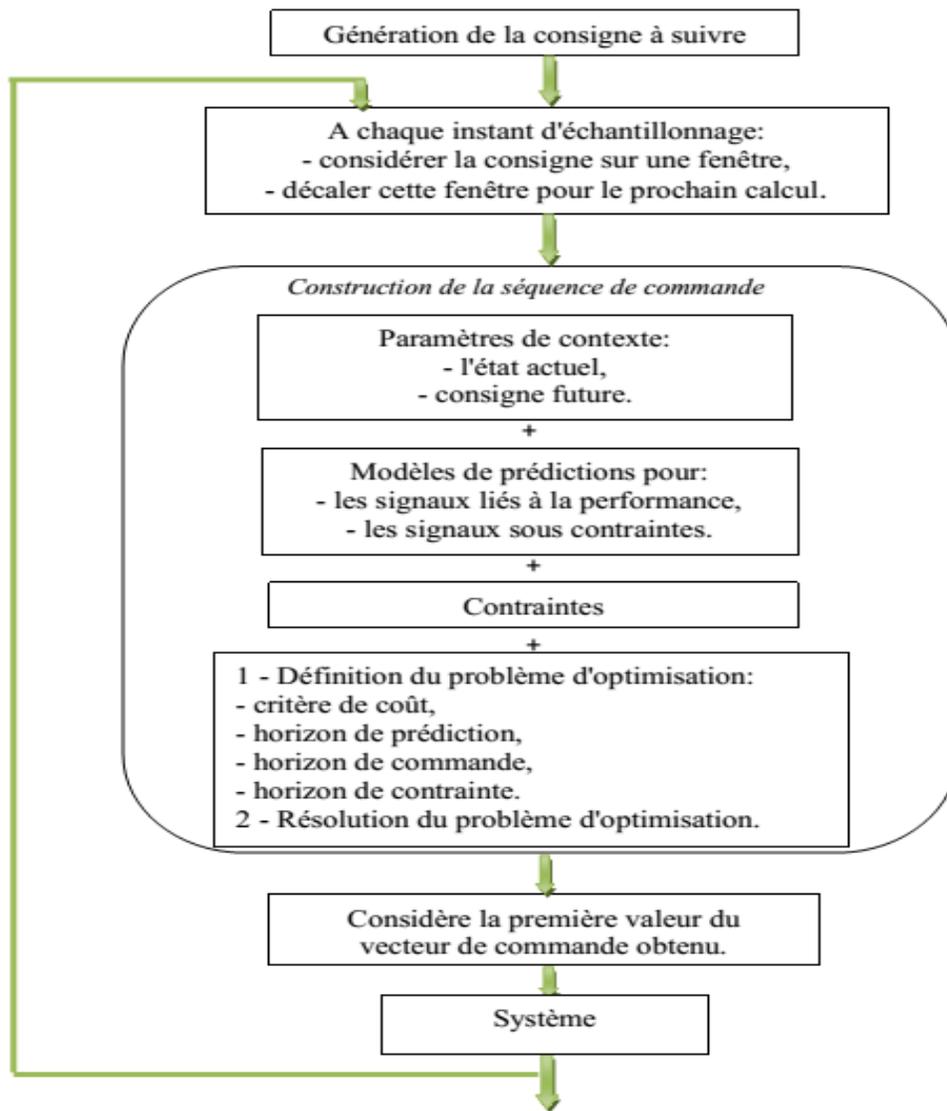


Figure (2.2): Schéma de principe de la commande prédictive. [11]

3-1 Eléments d'une commande prédictive

Tous les algorithmes de la commande prédictive possèdent les mêmes éléments Figure (2.2), et différentes options peuvent être considérées pour chaque élément, ce qui donne une multitude d'algorithmes. Ces éléments sont :

- 1- Le modèle du système (pour la prédiction),
- 2- Le critère de performances (la prédiction)
- 3- L'algorithme d'optimisation (pour déterminer la séquence de commande)

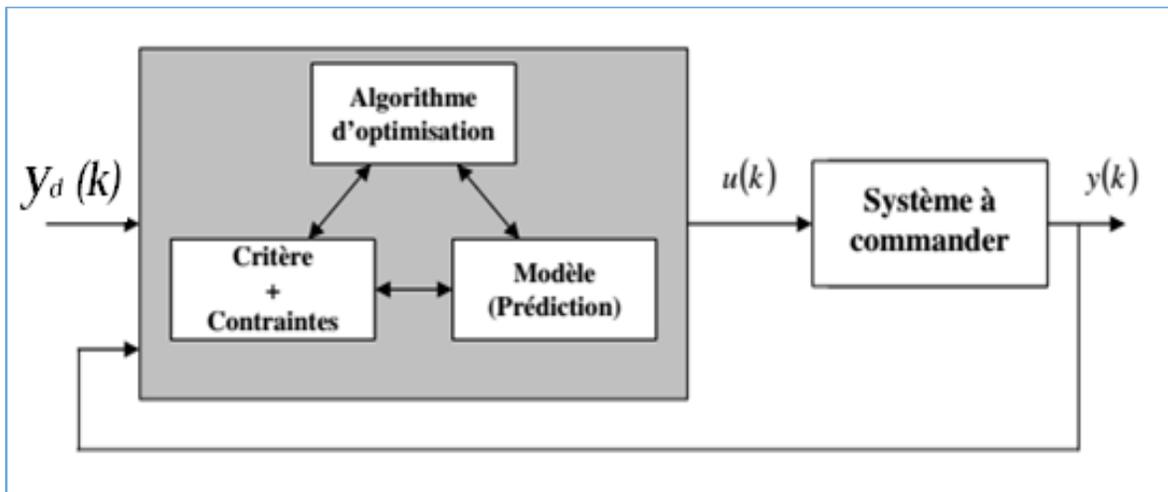


Figure (2.3): Stratégie de commande prédictive. [12]

Pour l'implémentation de la stratégie prédictive, la structure de base de la figure (I.3) est mise en œuvre. Un modèle sert à prédire les futures sorties du système, grâce aux valeurs courantes et passées de la commande et aux commandes optimales futures. Ces dernières sont calculées par une méthode d'optimisation, qui prend en compte la fonction de coût (qui dépend aussi des consignes futures), et éventuellement des contraintes. Donc, Le modèle du système à commander joue un rôle central dans la commande prédictive. Le modèle choisi doit être capable de prendre en compte la dynamique du processus pour prédire précisément les sorties futures. [9]

4. Les différents types d'algorithmes prédictifs :

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 :

4.1. 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 [8] 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 et permet de linéariser des modèles non linéaires instables. [13]

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 [14].

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 [15]

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.

4.2. Commande prédictive DMC (commande par matrice dynamique):

DMC c'est un algorithme de contrôle multi variable sans contraintes, qu'ils ont appelé Dynamic Matrix Control (DMC) [2]. Il est issu d'une technique de représentation de la dynamique des processus avec un ensemble de coefficients [16]. 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 [2].

4.3. Commande prédictive généralisé GPC (commande prédictive généralisée):

Développée par Clarke et al en 1987, la commande prédictive généralisée (GPC) est devenu l'un des algorithmes de commande prédictive les plus répandus.

L'idée de base de la GPC est de calculer une séquence de commandes futures de telle façon qu'une fonction de coût à plusieurs composantes soit minimale sur un certain horizon de prédiction. L'indice à optimiser est une fonction quadratique qui mesure la distance entre la sortie prédite du système et une

séquence de référence, plus une fonction quadratique qui mesure l'effort de commande. Les spécificités de la commande GPC sont l'existence d'une solution optimale analytique, le fait qu'elle soit compatible avec des systèmes instables ou à phase non minimale, et enfin la notion de l'horizon de commande et d'incrément de commande. [22]

Le schéma de principe de la commande prédictive généralisée est donné par la figure suivante :

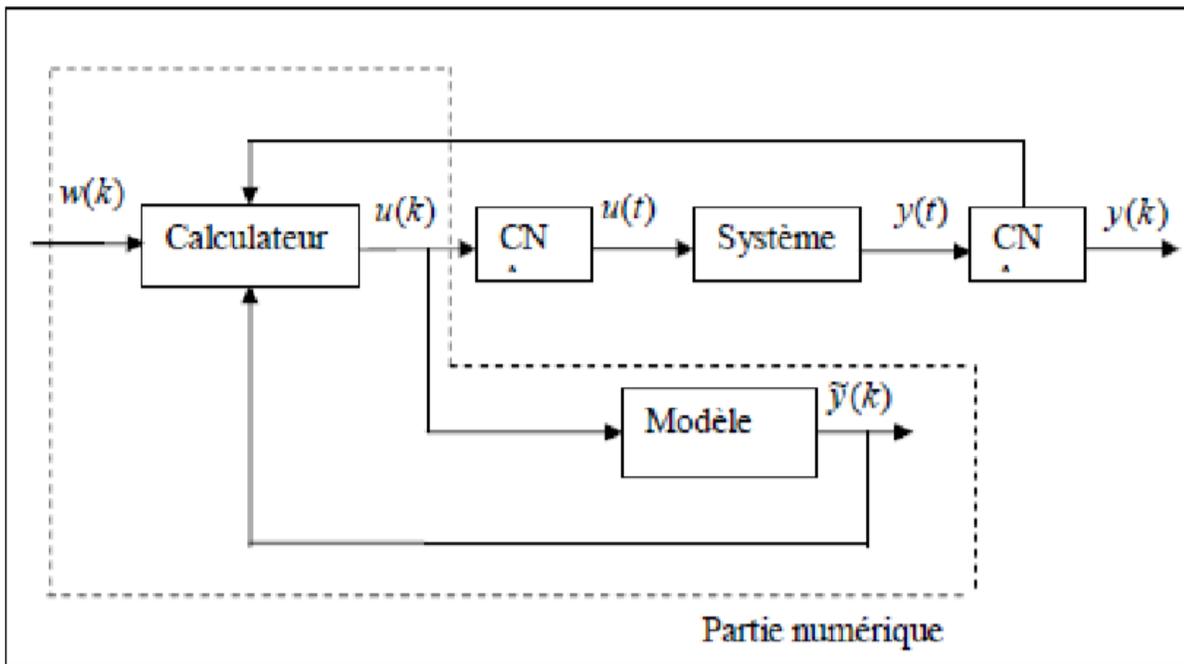


Figure. (2.4): Principe de fonctionnement de la commande prédictive généralisée [22]

5. La commande prédictive à base d'un modèle d'état:

5.1. Calcul des prédictions:

Le modèle de base pour calculer les prédictions est un modèle d'état discret donné par :

$$\begin{cases} x_m(k + 1) = A_m x_m(k) + B_m u(k) \\ y(k) = C_m x_m(k) \end{cases} \quad (1)$$

x_m est le vecteur Variable d'état, $u(k)$ est la variable manipulée ou la variable d'entrée, $y(k)$ est la sortie du système, k l'instant d'échantillonnage, alors tout ce que nous pouvons faire est de prédire à partir des équations ci-dessus, nous obtenons le prédicateur sous forme matricielle :

En appliquant une opération de différence sur (1) on obtient :

$$x_m(k + 1) - x_m(k) = A_m [x_m(k) - x_m(k - 1)] + B_m [u(k) - u(k - 1)] \quad (3)$$

En notant :

$$\begin{cases} \Delta x_m(k+1) = x_m(k+1) - x_m(k) \\ \Delta x_m(k) = x_m(k) - x_m(k-1) \\ \Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \end{cases} \quad (4)$$

En appliquant (4) sur (3) on obtient :

$$\Delta x_m(k+1) = A_m x_m(k) + B_m \Delta u(k) \quad (5)$$

L'objectif maintenant est de ressortir la relation entre ΔX_m et Y

$$\begin{aligned} y(k+1) - y(k) &= C_m [x_m(k+1) - x_m(k)] = C_m \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) - y(k) &= C_m A \Delta x_m(k) + C_m B_m \Delta u(k) \end{aligned} \quad (6)$$

En combinant (5) et (6) on forme alors le nouveau modèle d'état appelé modèle d'état renforcé :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_m(k+1) \\ \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A & & \\ A_m & 0_m^T & \\ C_m A_m & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix} \Delta u(k) \\ y(k) &= \begin{bmatrix} C \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

5-1-1 Calcul des prédictions des états et de la sortie:

Ce calcul se réalise dans une fenêtre de prédiction ou fenêtre d'optimisation (intervalle de temps). La longueur de cette fenêtre est notée N_p (N_2).

En supposant que les états $X(k_i)$ sont mesurables à l'instant courant k_i , les futures commandes à appliquer au système pour obtenir les états et la sortie désirés sont :

Où $N_c(N_u)$ est l'horizon de commande (le nombre de commande à envoyer au système pour le contrôler)

$$\Delta u(k_i), \Delta u(k_i + 1), \Delta u(k_i + 2), \dots, \dots, \Delta u(k_i + N_c - 1) \quad (7)$$

A partir de la mesure $X(k_i)$, les variables d'état futures sont alors prédites pour N_p nombre d'échantillons futures :

$$x(k_i + 1|k_i), x(k_i + 2|k_i), \dots, \dots, x(k_i + N_p|k_i) \quad (8)$$

En se basant sur le modèle d'état augmenté, les expressions des futurs états prédits sont :

$$\begin{aligned} x(k_i + 1|k_i) &= Ax(k_i) + B\Delta u(k_i) \\ x(k_i + 2|k_i) &= Ax(k_i + 1|k_i) + B\Delta u(k_i + 1) \\ &= A^2x(k_i) + AB\Delta u(k_i) + B\Delta u(k_i + 1) \end{aligned} \quad (9)$$

$$x(k_i + N_p | k_i) = A^{N_p} x(k_i) + A^{N_p-1} B \Delta u(k_i) + A^{N_p-2} B \Delta u(k_i + 1) + \dots + A^{N_p-N_c} B \Delta u(k_i + N_c - 1) \quad (10)$$

En multipliant ces états prédites par la matrice augmentée C, on obtient les sorties :

$$y(k_i + 1 | k_i) = CAx(k_i) + CB\Delta u(k_i) \quad (11)$$

$$y(k_i + 2 | k_i) = CAx(k_i + 1 | k_i) + CB\Delta u(k_i + 1) \quad (12)$$

$$= CA^2x(k_i) + CAB\Delta u(k_i) + C B\Delta u(k_i + 1)$$

$$y(k_i + N_p | k_i) = CA^{N_p} x(k_i) + CA^{N_p-1} B \Delta u(k_i) + CA^{N_p-2} B \Delta u + \dots + CA^{N_p-N_c} B \Delta u(k_i + N_c - 1)$$

On remarque donc que les prédictions dépendent de l'état courant et des futures commandes

En les regroupant, on peut les mettre sous une forme matricielle :

$$Y = [y(k_i + 1 | k_i), y(k_i + 2 | k_i), \dots \dots \dots y(k_i + N_p | k_i)]^T \quad (13)$$

$$\Delta U = [\Delta u(k_i), \Delta u(k_i + 1), \Delta u(k_i + 2), \dots \dots \dots \Delta u(k_i + N_c - 1)]^T \quad (14)$$

Alors :

$$Y = Fx(k_i) + \phi \quad (15)$$

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix}; \quad \phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & 0 & \dots & 0 \\ CA^2B & CAB & CB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ CA^{N_p-1}B & CA^{N_p-2}B & CA^{N_p-3}B & \dots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix} \quad (16)$$

5-2 Optimisation:

Pour un signal de consigne donné $e(k_i)$ à l'instant k_i , dans un horizon de prédiction, l'objectif de la commande prédictive sera d'amener la sortie prédite aussi proche que possible du signal de consigne. Cet objectif consiste à trouver le «meilleur» vecteur de commandes ΔU de sorte qu'une fonction d'erreur entre la consigne et la sortie prédite est minimisée.

$$R_S^T = \begin{bmatrix} \overbrace{111\dots\dots 1}^{N_p} \end{bmatrix} r(k_i) \quad (17)$$

On définit la fonction de coût :

$$J = (R_s - Y)^T (R_s - Y) + \Delta U^T \bar{R} \Delta U \quad (18)$$

$$\bar{R} = r_w \times I_{N_c \times N_c} \quad (19)$$

En combinant (16) et (18) on obtient la forme de la fonction de coût :

$$J = (R_s - Fx(k_i))^T (R_s - Fx(k_i)) - 2\Delta U^T \phi^T (R_s - Fx(k_i)) + \Delta U^T (\phi^T \phi + \bar{R}) \Delta U \quad (20)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta U} = 2\phi^T (R_s - Fx(k_i)) + 2(\phi^T \phi + \bar{R}) \Delta U \quad (21)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta U} = 0 \rightarrow \Delta U = (\phi^T \phi + \bar{R})^{-1} \phi^T (R_s - Fx(k_i)) \tag{22}$$

6 Application de la commande prédictive dans l'industrie:

La commande prédictive est l'une des commandes avancées les plus utilisées de nos jours dans l'industrie.

Cet engouement est dû à sa facilité de mise en oeuvre et à ses qualités techniques.

Elle permet de résoudre des problèmes inaccessibles au PID comme la commande des systèmes présentant des retard importants, des contraintes fortes au niveau des variables et aussi elle s'applique à tous les types d'industrie : la pharmacie, la chimie, la sidérurgie, la pétrochimie, l'aéronautique, etc.

[4]

Plus de 4000 applications au moins étaient recensées en 2003, Le tableau 3.1 résume les domaines d'applications pour la commande prédictive.

On peut constater que les applications de la commande prédictive aux domaines du raffinage et pétrochimique sont les plus nombreuses.

Area	Aspen Technology	Honeywell	Adersa	Invensys	Total
Raffinage	1200	480	280	25	1985
Pétrochimie	450	80	-	20	550
Chimie	100	20	3	21	144
Papier	18	50	-	-	68
Air et gaz	-	10	-	-	10
Métallurgie	8	6	7	16	37
Alimentaire	-	-	41	10	51
Polymère	17	-	-	-	17
Cuisson	-	-	42	3	45
Aérospatial	-	-	13	-	13
Automobile	-	-	7	-	7
Autres	40	40	1045	26	1151

Tableau 3.1. Applications industrielles de la commande prédictive [2]

7. 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.

La commande prédictive présente un certain nombre d'avantages, par rapport aux autres méthodes, parmi lesquelles on trouve les avantages suivants:

- Facilité de mise en œuvre (bonnes performances et simplicité d'implémentation).
- si la consigne est connue `à l' avance, son caractère prédictif permet de l'anticiper et donc d'améliorer le suivi.
- Un réel gain financier par une meilleure utilisation des actionneurs, chose qui entraîne le prolongement de leur durée de vie.
- La faculté d'adaptation du système aux perturbations mesurées.
- Numériquement stable. [21].
- Technique bien adaptée pour:
 - commande des systèmes complexes.
 - problèmes de suivi de trajectoire sans/sous contraintes (entrées, sorties, états), pour lesquels la trajectoire à suivre est parfaitement connue à l'avance et planifiée
 - différents objectifs [20]

8. Conclusion:

Dans ce chapitre on a présenté un état de l'art sur la commande prédictive. Nous avons donné au premier lieu les concepts de base et le principe de la commande prédictive, ainsi que les différents Application et Avantages de cette dernière.

Chapitre III

Modélisation de moteur

1. Introduction :

L'évolution des technologies conduit à utiliser des machines nécessitant des vitesses de rotation précises et variables pour l'entraînement d'engins industriels, systèmes robotique...etc. Dans notre étude, on s'intéresse aux moteurs à courant continu, car ils offrent une introduction facile au fonctionnement de ses homologues, en donnant des repères clairs.

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.

2. Constituants de la 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.

Pour faire fonctionner une machine à courant continu, on peut brancher l'inducteur en série avec l'induit : on parle alors de machine série. Si l'inducteur est alimenté de façon séparée par rapport à l'induit, on parle de machine à excitation indépendante

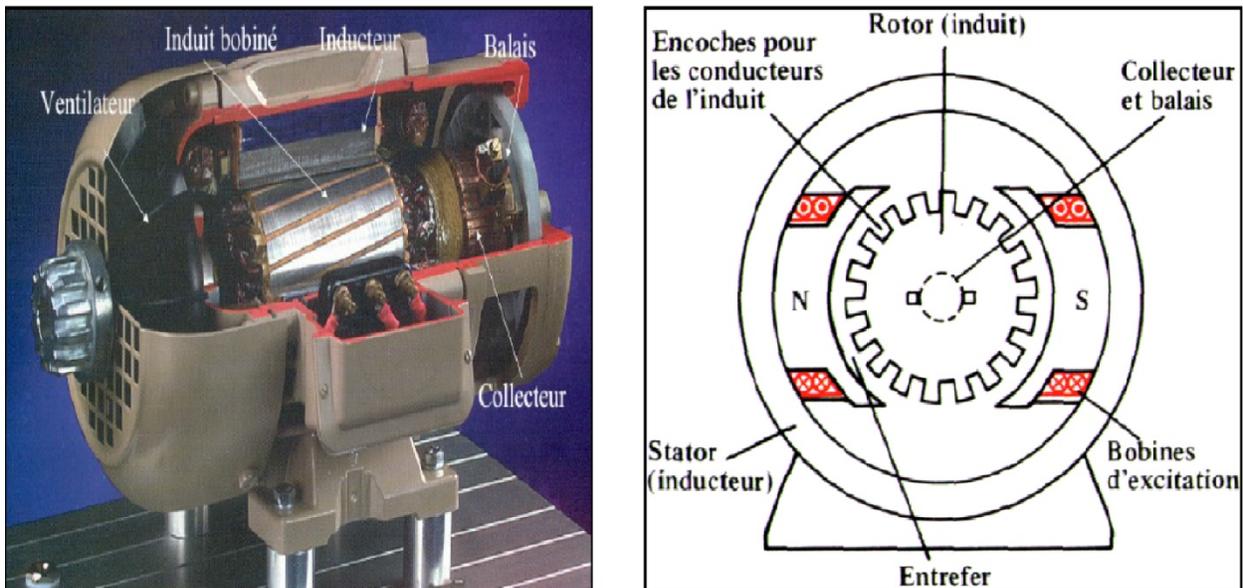


Figure 3.1: Constitution du moteur à courant continu [18].

3. Les différents types des moteurs à courant continu :

On distingue deux types de moteurs à courant continu :

3.1. 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 permanents. Ils représentent maintenant la majorité des moteurs à courant continu [17]

3.2. Les moteurs à inducteur bobiné :

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

3.2.1. Excitation série:

Dans ce montage, le courant d'excitation est le même que le courant dans l'induit. 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 [17]

3.2.2 Excitation dérivation ou shunt

La même source d'alimentation alimente l'induit et l'inducteur. L'inducteur est mis en parallèle avec l'induit.

Ce mode d'excitation offre à l'utilisateur une fréquence de rotation pratiquement indépendante de la charge et qui peut démarrer à vide.

3.2.2. Excitation séparée ou indépendante :

Deux sources d'alimentation sont nécessaires, une pour l'induit, l'autre pour l'inducteur. Ce mode d'excitation offre à l'utilisateur une fréquence de rotation indépendante de la charge et réglable par action sur la tension d'induit ou sur le courant d'excitation.

4. Simulation du la machine

Les caractéristiques du moteur sont : [17]

- moment d'inertie $J = 0.00128 \text{ kg.m}$
- coefficient de frottement $F = 0.000143 \text{ N.m/ rad.sec}$
- résistance du moteur $R = 36.8 \text{ } \Omega$
- constante du couple moteur $k_e = 1.17$
- inductance du moteur $L = 0.442 \text{ H}$
- couple résistant $Cr = 1$

4.1. Simulation d'une machine à courant continu à excitation séparée

Pour faire la simulation, nous réalisons le modèle ci-dessous:

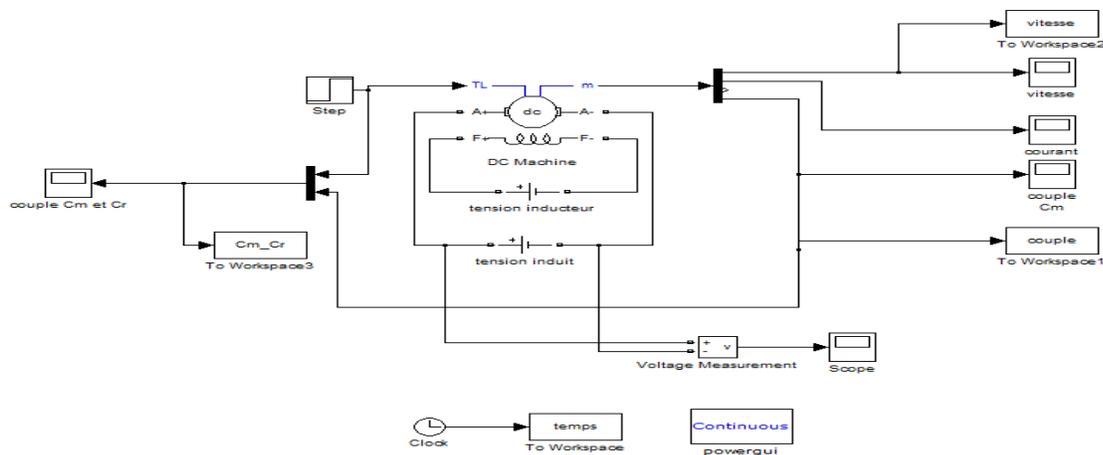


Figure 3.2: Bloc SIMULINK moteur à excitation séparée.

On prend les paramètres caractéristiques suivants :

1. Les paramètres de l'enroulement de l'induit : $R_a=2,52$ Ohm, $L_a=0,048$ H
1. Les paramètres de l'enroulement d'excitation $R_f=92$ Ohm, $L_f=5,257$ H, $L_{af}=0,257$ H
2. La somme des moments d'inertie de la machine et de la charge : $J=0,017$ (K gm²)
3. Le coefficient de frottement visqueux $B_m=0,0000142$ N.m.s ;
4. Le coefficient de frottement à sec : $T_f=0,005968$ Nm

On effectue enfin les derniers réglages sur le schéma ci-dessus en réduisant le temps de simulation de 0 à 0.5 seconde, en alimentant l'inducteur sous 220 V, l'induit sous 240V, et en réglant le couple résistant C_r constant sur 10Nm.

Après simulation, on a obtenu les résultats suivants:

4.1.1. Vitesse de rotation

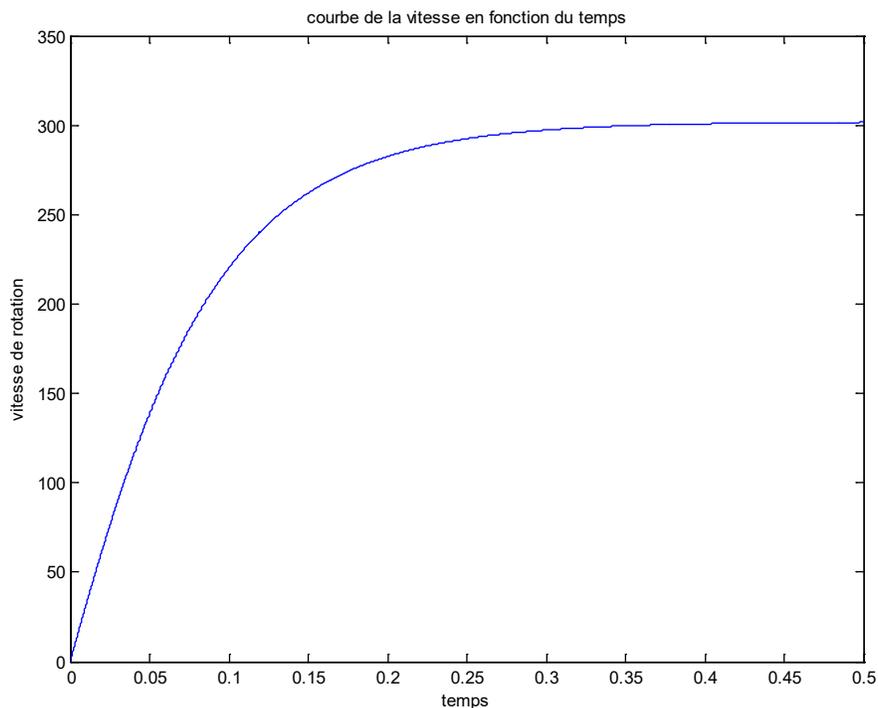


Figure 3.3: Allure de la vitesse.

➤ **Interprétation**

La vitesse part de zéro pour se stabiliser autour de 300 tr/min, qui est la vitesse en régime établi. La courbe a une forme exponentielle, ce qui correspond à la présence de phénomènes transitoires dans les enroulements de la machine.

4.1.2. Couple moteur

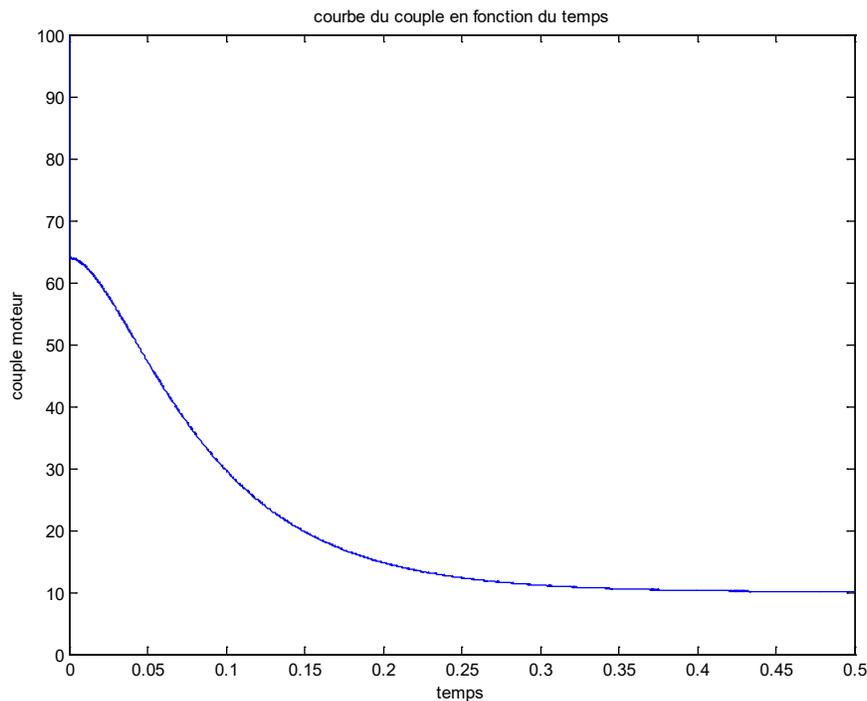


Figure 3.4: Allure du couple moteur.

➤ **Interprétation**

Le moteur démarre avec un couple de démarrage important de l'ordre de 65 N.m, puis le couple passe du régime transitoire au régime établi pour se stabiliser autour de 10 N.m, qui correspond au couple résistant imposé par la charge (couple résistant).

4.1.3. Couple moteur et couple résistant

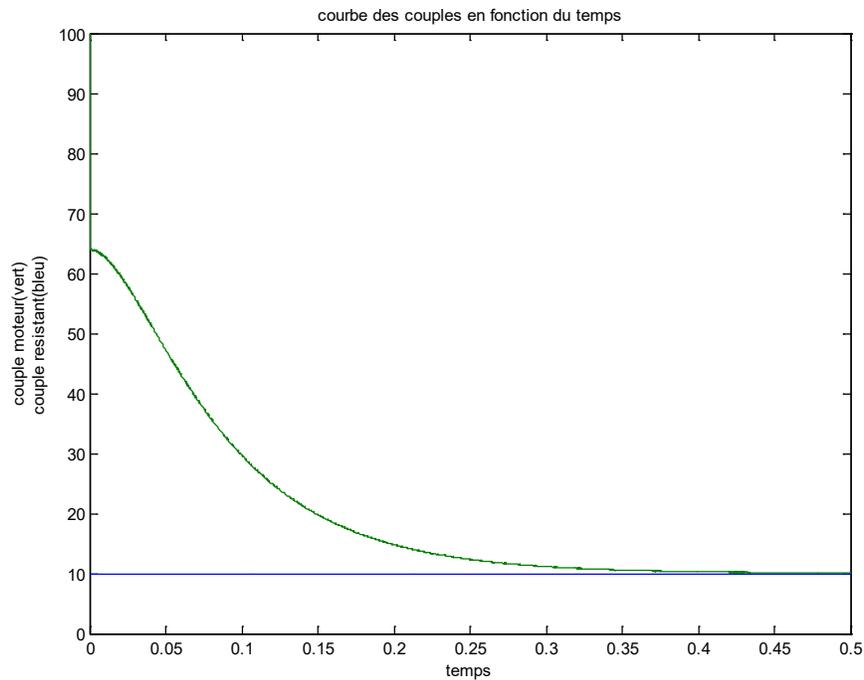


Figure 3.5: Allure du couple résistant.

➤ Interprétation

Le couple résistant reste constant et fixé à 10 N.m; le couple moteur passe du régime transitoire au régime établi pour se stabiliser autour de 10 N.m. Les deux courbes se confondent autour de l'instant 0.5 seconde, et leur intersection définit le point de fonctionnement de la machine.

4.1.4. Caractéristique électromécanique

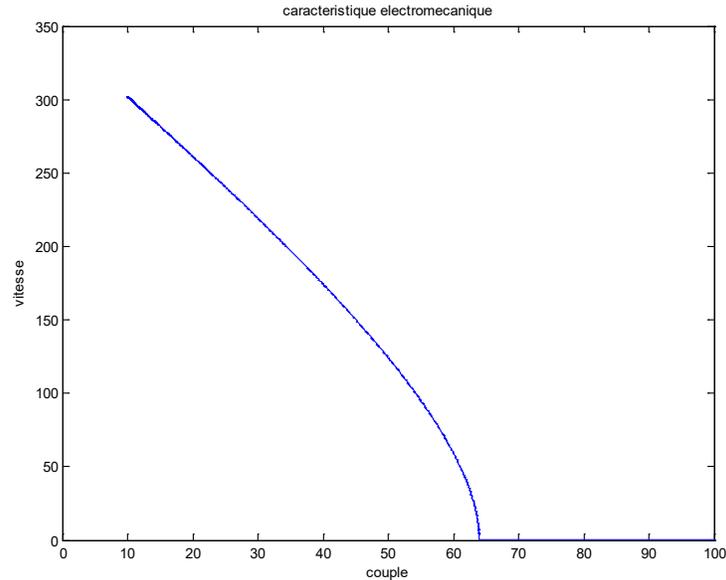


Figure 3.6: Allure de la caractéristique électromécanique.

➤ Interprétation

On remarque que la caractéristique mécanique est pratiquement linéaire dans sa partie utile : ce qui est conforme à la théorie.

Cette caractéristique indique surtout que le moteur à courant continu est facile à commander du point de vue vitesse. Au démarrage, (à $n=0$) le moteur développe un couple qui est le couple de démarrage (Ici il est pratiquement de 65 Nm)

Les caractéristiques mécaniques montrent donc que la vitesse est une fonction décroissante du couple

4.2. Simulation d'une machine à courant continu à excitation shunt

Dans cette partie, on fait la même chose pour la simulation du moteur à excitation indépendante, sauf qu'ici la source de tension de l'inducteur est supprimée et l'inducteur est mis en parallèle sur la source de tension de l'induit suivant le modèle de la figure suivant :

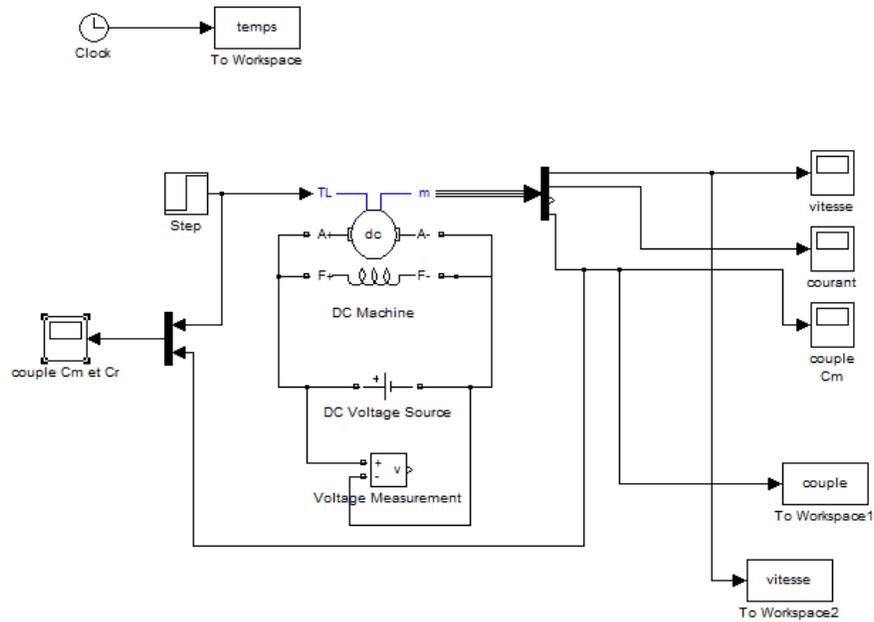


Figure 3.7: Bloc SIMULINK moteur shunt.

L'induit est alimenté sous une tension de 240V et le couple résistant est nul. Le moteur tourne donc à vide.

Cette machine à excitation shunt peut être assimilée à la machine à excitation indépendante précédente tournant à vide .En effet, la tension d'alimentation des enroulements ainsi que les paramètres internes du moteur restent les mêmes.

Après simulation, on a obtenu les résultats suivants:

4.2.1. Vitesse de rotation

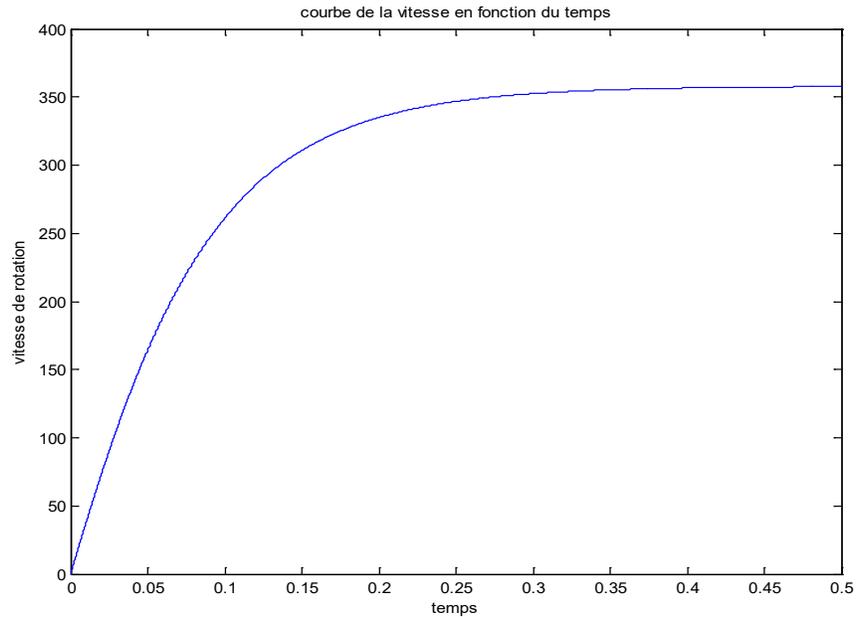


Figure 3.8: Allure de la vitesse.

➤ Interprétation

La vitesse augmente puis se stabilise autour de 360 tr/min.

On se rend compte ici que la vitesse en régime établi est plus grande ici que pour le moteur précédent (moteur excitation indépendante). Ici, en effet, c'est le fait qu'il n'y ait pas de couple de charge et donc pas d'inertie supplémentaire qui fait tourner le moteur plus vite.

4.2.2. Couple moteur

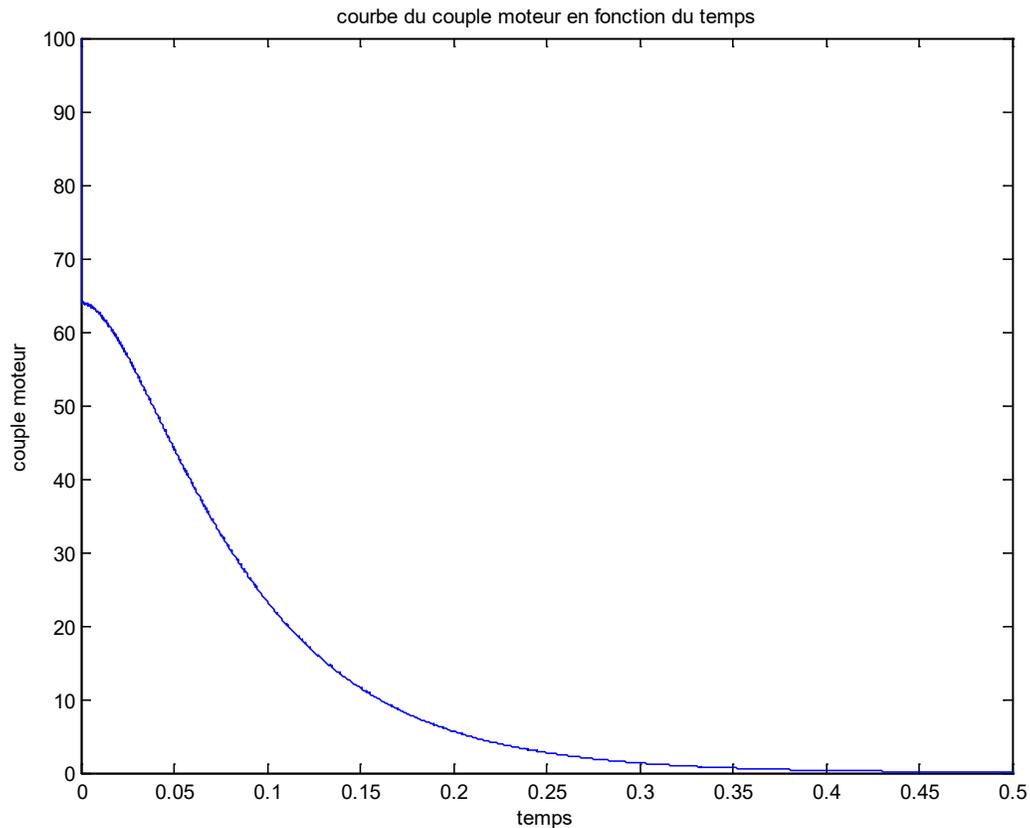


Figure 3.9: Allure du couple moteur.

➤ **Interprétation**

Le couple moteur en régime établi est ici aussi plus petit que pour le moteur précédent (pratiquement nul); ce qui est normal puisqu'il n'y a pas de couple de charge à vaincre ici. En réalité, le couple moteur développé n'est pas nul, un petit couple est développé par le moteur pour vaincre le couple de pertes dû aux pertes par frottements dans les parties mécaniques de la machine.

4.2.3. Couple moteur et couple résistant

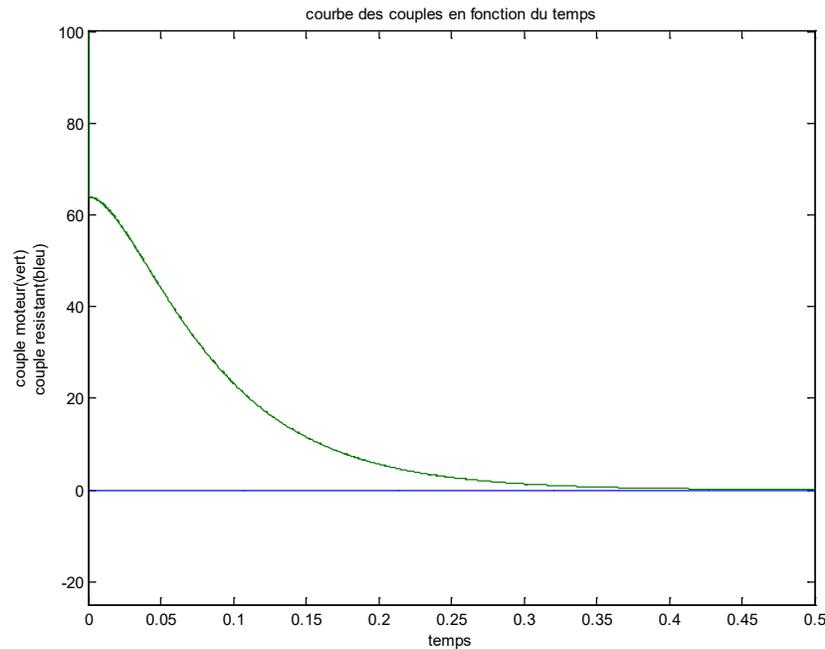


Figure 3.10: Allure du couple résistant.

5. Modélisation D'un Moteur A Courant Continu A Excitation Séparée:

5.1. Hypothèses simplificatrices:

Lors de la modélisation de la machine utilisée, on admet quelques hypothèses permettant une simplification du traitement.

- ❖ L'excitation des enroulements inducteurs est constante et égale à la valeur nominale
- ❖ Les matériaux magnétiques ne sont pas saturés, ceci permet d'exprimer le flux comme une fonction linéaire du courant.
- ❖ On suppose que les pertes de fer (hystérésis et courants de Foucault) sont nulles.
- ❖ La réaction magnétique de l'induit n'est pas considérée.
- ❖ Tous les enroulements formant l'induit de la machine sont représentés par une résistance et une inductance. Leurs valeurs ne changent pas durant le fonctionnement. [19]

Le comportement électrique et mécanique de la machine à courant continu est décrit par les équations suivantes :

5.2. Equation différentielle:

La machine à courant continu est l'un des convertisseurs électromécaniques les plus complexes. En effet, elle est sujette aux phénomènes de commutation provoqués par la rotation de l'arbre de la machine, en plus du phénomène de la réaction magnétique de l'induit (Séguier & Notelet, 1994)[22]. La réversibilité de fonctionnement entraîne également des états transitoires qui affectent son fonctionnement [20]. Schématiquement décrites à la figure suivante.

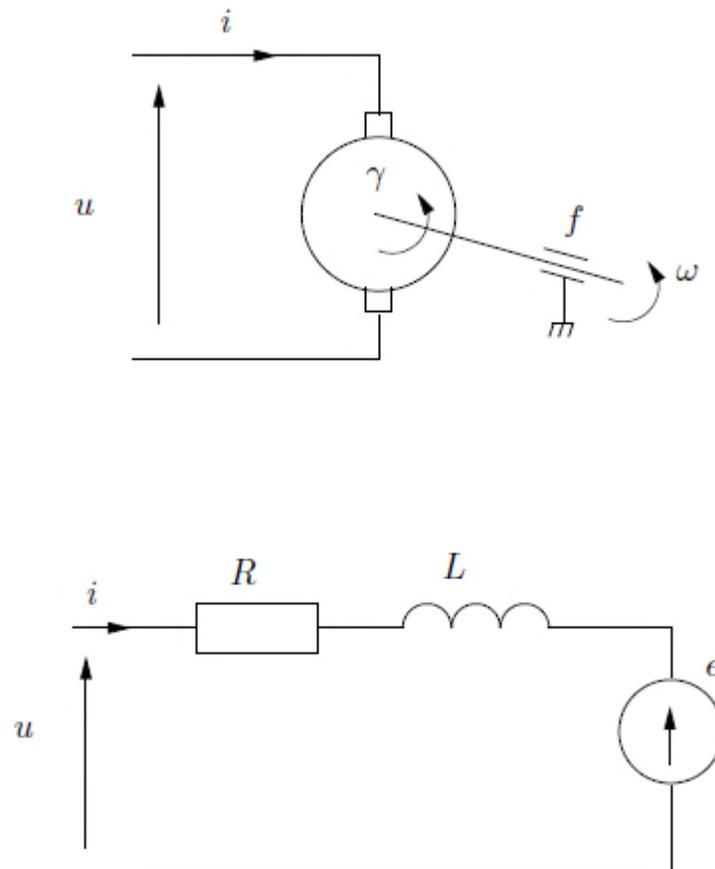


Figure 3.11 : Schéma d'un moteur à courant continu

Pour la partie électrique, on calcule la tension aux bornes de l'induit. L'équation électrique globale peut alors se mettre sous la forme suivante :

$$U(t) = Ri(t) + \frac{Ldi(t)}{dt} + e(t) \quad (3.1)$$

Ou 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 :

$$e(t) = K_e \Omega \quad \text{Ou } K_e = K\phi \quad (3.2)$$

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 :

$$C(t) - C_r(t) = J \frac{d\Omega(t)}{dt} + f\Omega(t) \quad (3.3)$$

Ou $C(t)$ 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 $i(t)$:

$$C(t) = K_m i(t) \quad \text{Ou } K_m = K\phi \quad (3.4)$$

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 $K_e = K_m = K$ les équations (3.3) et (3.4) donnent :

$$Ki(t) - C_r(t) = f\Omega(t) + J \frac{d\Omega(t)}{dt} \quad (3.5)$$

En dérivant (3.5), il devient :

$$K \frac{di(t)}{dt} = f + \frac{d\Omega(t)}{dt} + J \frac{d^2\Omega(t)}{dt^2} \quad (3.6)$$

En combinant (3.5) et (3.6) avec (3.1) et (3.2) :

$$\frac{R}{K} \left(f\Omega(t) + J \frac{d\Omega(t)}{dt} \right) + \frac{L}{K} \left(f \frac{d\Omega(t)}{dt} + J \frac{d^2\Omega(t)}{dt^2} \right) + K\Omega(t) = u(t) \quad (3.7)$$

Finalement, en ordonnant (2.7) de façon à avoir un coefficient de un devant le degré de dérivation le plus élevé, il vient :

$$\frac{d^2\Omega(t)}{dt^2} + \frac{RJ + Lf}{LJ} \frac{d\Omega(t)}{dt} + \frac{Rf + K^2}{LJ} \Omega(t) = \frac{K}{LJ} u(t) \quad (3.8)$$

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.

5.3. Equation d'état:

Ces équations peuvent également être représentées sous la forme de l'espace d'état. 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 $x_2 = i(t)$.

$$u(t) = R x_2 + \frac{L dx_2}{dt} + K x_1$$

Alors que l'équation mécanique donne :

$$K x_2 - f x_1 = J \frac{dx_1}{dt}$$

En déduit l'équation d'état du MCC :

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{f}{J} & \frac{K}{J} \\ -\frac{K}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{pmatrix} u(t) \\ y = (1 \quad 0) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \end{cases} \quad (3.9)$$

5.4. Fonction de transfert d'un MCC :

La transformé de Laplace de l'équation (3.1) :

$$(R + LP)I(p) = U(P) - E(P) \quad (3.10)$$

La transformé de Laplace de l'équation (3.2) :

$$E(P) = K\Omega(P) \quad (3.11)$$

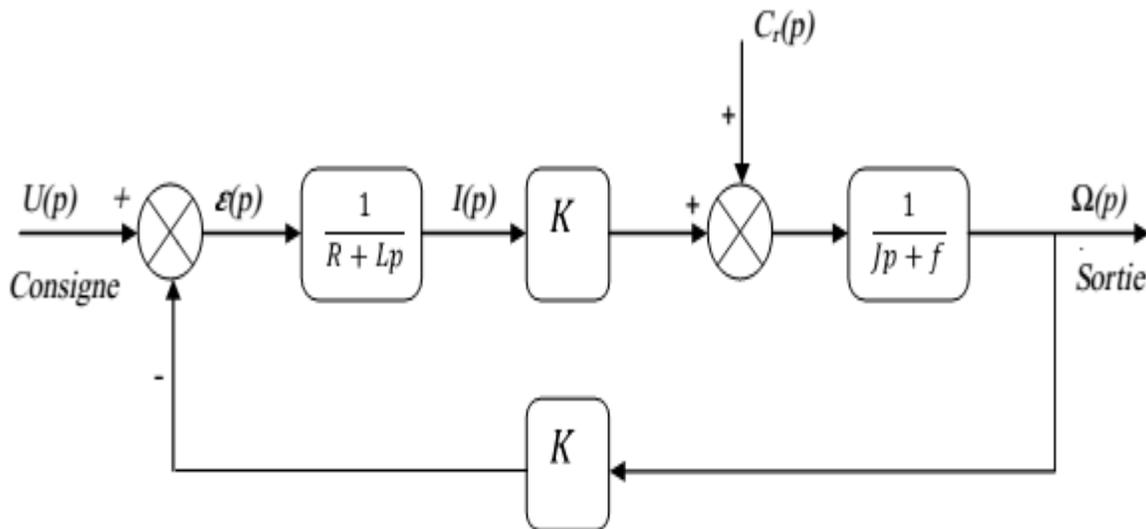
La transformée de Laplace de l'équation (3.3) :

$$C(P) - C_r(P) = (f + JP)\Omega(P) \quad (3.12)$$

La transformée de Laplace de l'équation (3.4) :

$$C(P) = KI(P) \quad (3.13)$$

5.5. Schéma-bloc du MCC:



6. Conclusion

L'avantage de ces moteurs réside dans le fait qu'ils se prêtent facilement à un contrôle souple, continu et presque instantané de leur vitesse. Ce chapitre a présenté quelque généralité sur le moteur à courant continu, le principe de fonctionnement, ses caractéristiques et leur modélisation mathématique, cela, dans le but d'appliquer à notre moteur une commande adaptative et prédictive dans le chapitre qui suit.

Chapitre IV

Commande Prédictive Du Moteur a Courant Continu

1. Introduction :

La simulation, est une série de calculs effectués sur un ordinateur et reproduisant un phénomène physique. Elle aboutit à la description du résultat de ce phénomène, comme s'il s'était réellement déroulé. Cette représentation peut être une série de données, une image ou même un film vidéo.

Ce chapitre a pour but, d'implémenter le réglage de la vitesse d'un moteur à courant continu à excitation séparée, pour annuler l'erreur statique, diminuer le dépassement, diminuer le temps de réponse et le temps de montée afin d'obtenir une réponse adéquate du procédé et de la régulation et d'avoir un système précis, rapide, stable et robuste.

2. Présentation du logiciel MATLAB :

MATLAB est un logiciel destiné principalement au calcul scientifique, à la modélisation et à la simulation. Le noyau de calcul est associé à l'environnement SIMULINK, permettant une modélisation basé sur des schémas-blocs.

Des bibliothèques spécialisés sont disponibles ('Toolboxes') pour la plus part des domaines des sciences et techniques nécessitant des moyens de calcul importants : électrotechnique, automatique, traitement du signal, télécommunication, mathématiques appliquées... Dans ce travail nous allons utiliser la toolboxe MPC (Model predictive Control) pour synthétiser un régulateur prédictif.

3. Le système de commande MPC proposé:

Le schéma de la commande prédictive appliquée au MCC à excitation séparée constante sous SIMULINK est illustré par la figure (4.1).

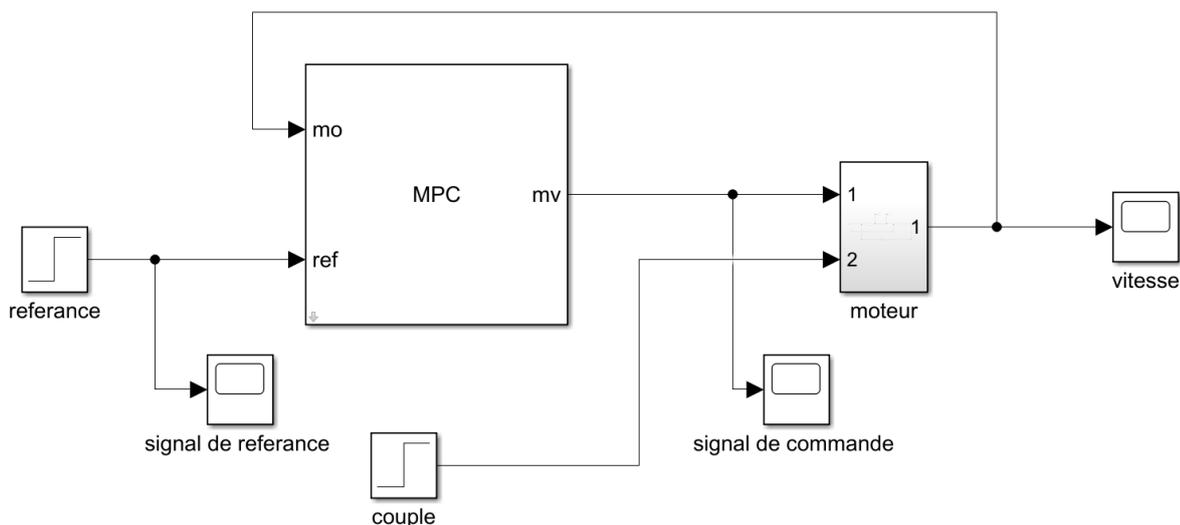


Figure 4.1: Modèle du contrôle MPC appliqué à la MCC sous SIMULINK

En utilisant les équations (3.10) - (3.13), on trouve la fonction de transfert suivante:

$$\omega(p) = \frac{b_0}{p^2 + a_1 p + a_2} U(p) - \frac{br_0 p + br_1}{p^2 + a_1 p + a_2} Cr(p)$$

Avec

- $b_0 = \frac{k_e k}{JL}$
- $br_0 = \frac{1}{J}$
- $br_1 = \frac{R}{JL}$
- $a_1 = \frac{JR + Lf}{JL}$
- $a_2 = \frac{fR + Ke^2}{JL}$

On prend les paramètres caractéristiques du moteur suivants :

1. Les paramètres de l'enroulement de l'induit : $R_a=2,52$ Ohm, $L_a=0,048$ H
1. Les paramètres de l'enroulement d'excitation $R_f=92$ Ohm, $L_f=5,257$ H, $L_{af}=0,257$ H
2. La somme des moments d'inertie de la machine et de la charge : $J=0,017$ (Kgm²)
3. Le coefficient de frottement visqueux $B_m=0,0000142$ N.m.s ;
4. Le coefficient de frottement à sec : $T_f=0,005968$ Nm
5. $K_e=K=0.1$

On effectue enfin les derniers réglages sur le schéma ci-dessus en réduisant le temps de simulation de 0 à 10 secondes, en alimentant l'inducteur sous 220 V, l'induit sous 240V.

Et le système devient après remplacement des valeurs numériques des paramètres,

$$\omega(p) = \frac{122.5}{p^2 + 52.82p + 1242} U(p) - \frac{58.82p}{p^2 + 52.82p + 1242} Cr(p)$$

Le bloc qui réalise le contrôle prédictif sous SIMULINK est le MPC contrôleur figure (4.2) La configuration des paramètres de ce bloc est illustrée dans les figures (4.3) , (4.4) et (4.5).

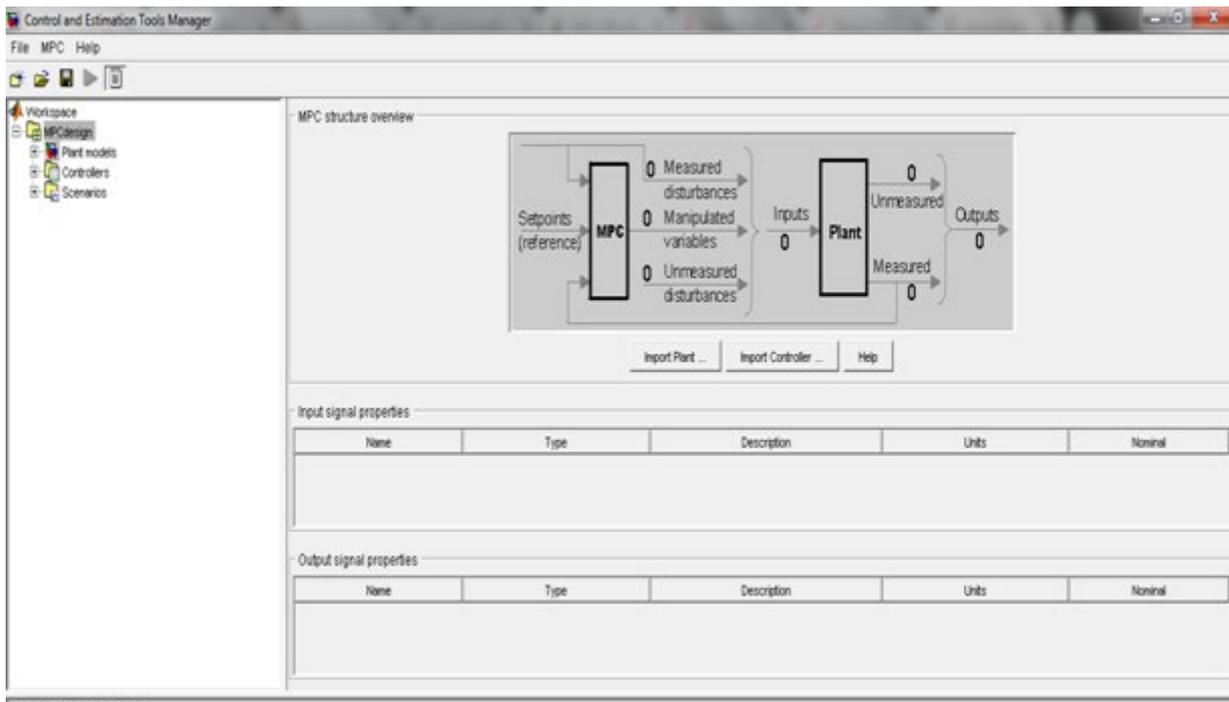


Figure 4.2: interface MPC design Tools.

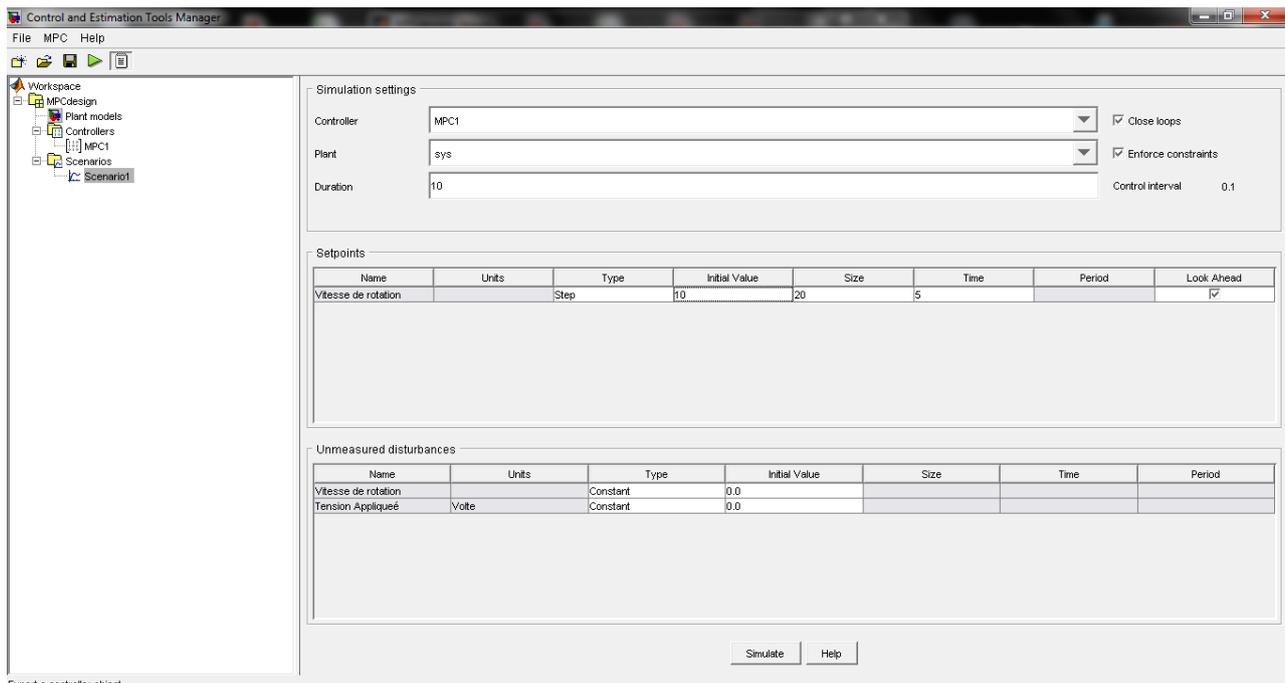


Figure 4.3: Configuration des paramètres (système).

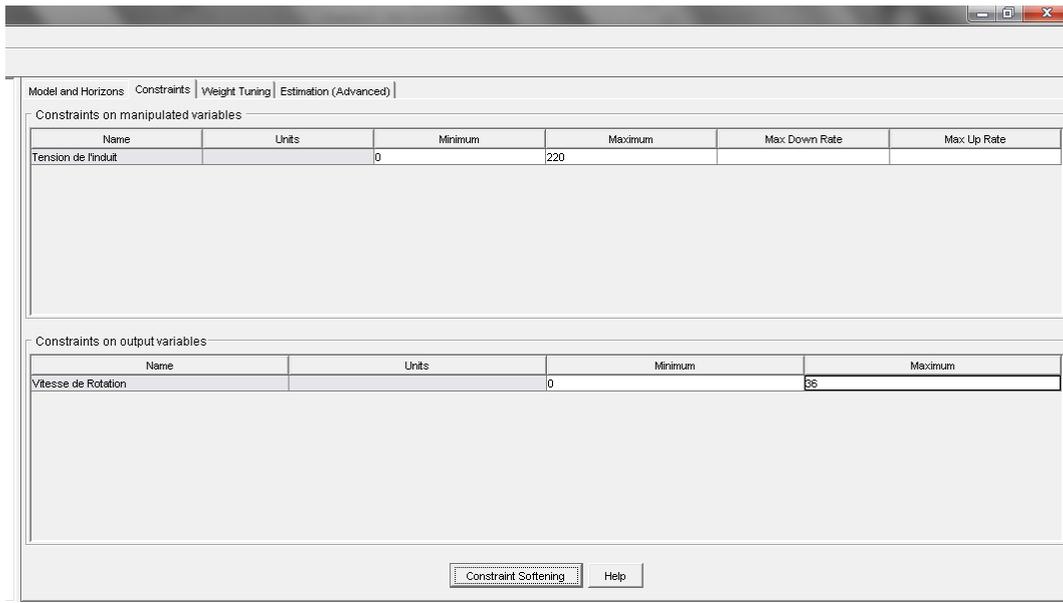


Figure 4.4: Configuration des paramètres (contraintes).

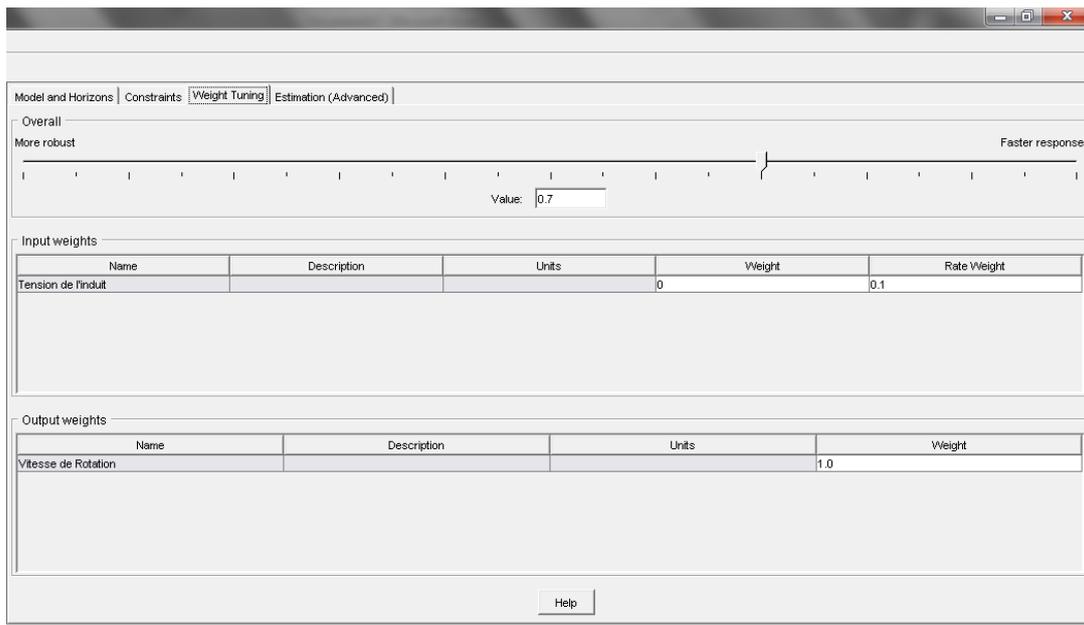


Figure 4.5: Configuration des paramètres (Régulateur).

La figure (4.6) montre l'allure de la vitesse désirée et celle imposée par le contrôleur MPC et la figure (4.7) représente la commande qui va gouverner ce comportement pour des paramètres du régulateur 1^{er} scénario.

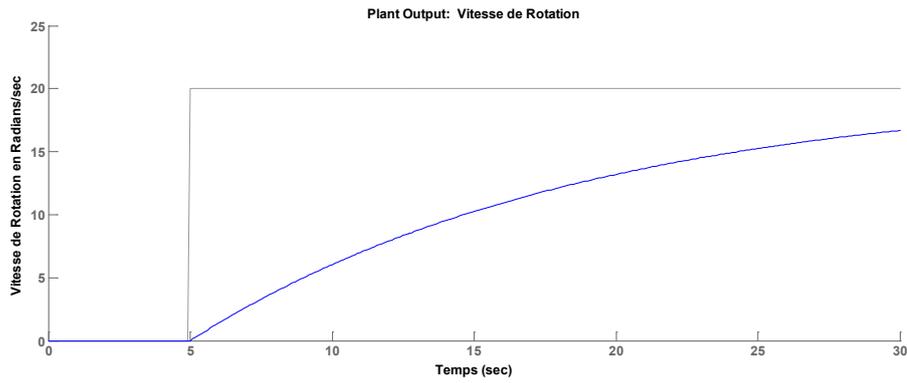


Figure 4.6: Allure de la vitesse face à une variation de consigne 1^{er} scénario

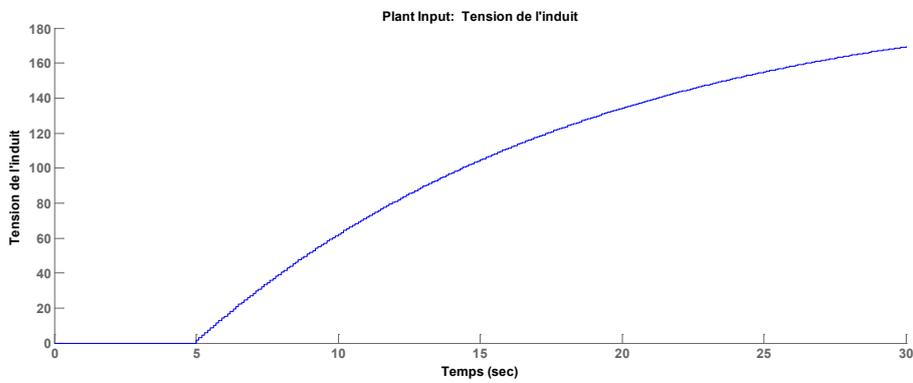


Figure 4.7: Evolution de la tension d'induit commandée par MPC.

La figure (4.8) montre l'allure de la vitesse désirée et celle imposée par le contrôleur MPC et la figure (4.9) représente la commande qui va gouverner ce comportement pour des paramètres du régulateur 2^{em} scénario.

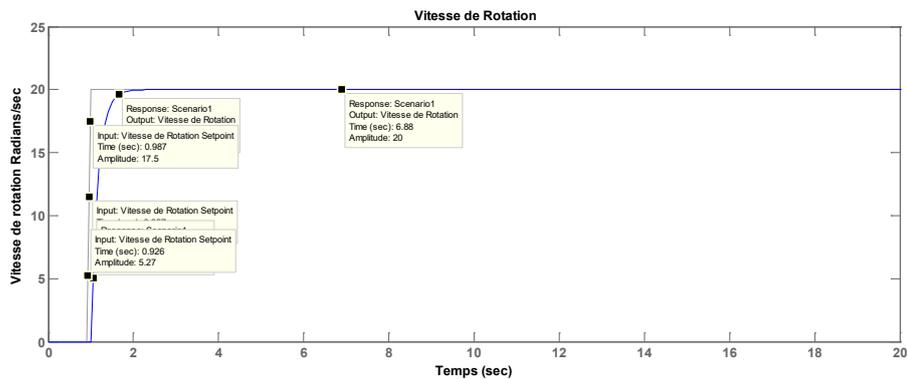


Figure 4.8: Allure de la vitesse face à une variation de consigne à l'instant 1 sec 2^{em} scénario.

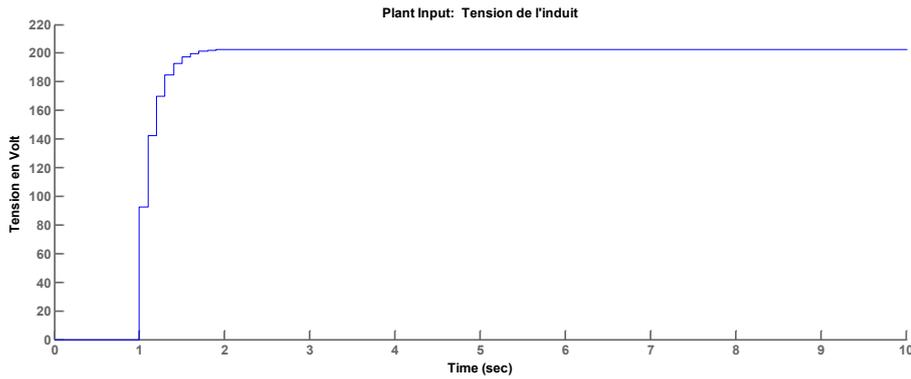


Figure 4.9: Evolution de la tension d'induit commandée par MPC 2^{em} scénario.

Nous avons varié les paramètres du régulateur (sur l'interface) pour améliorer la rapidité de la réponse, et nous avons imposé une augmentation de vitesse du moteur à partir de la cinquième seconde figure (4.10), il est clair que le système (courbe en bleu) est devenu rapide par rapport les résultats précédents

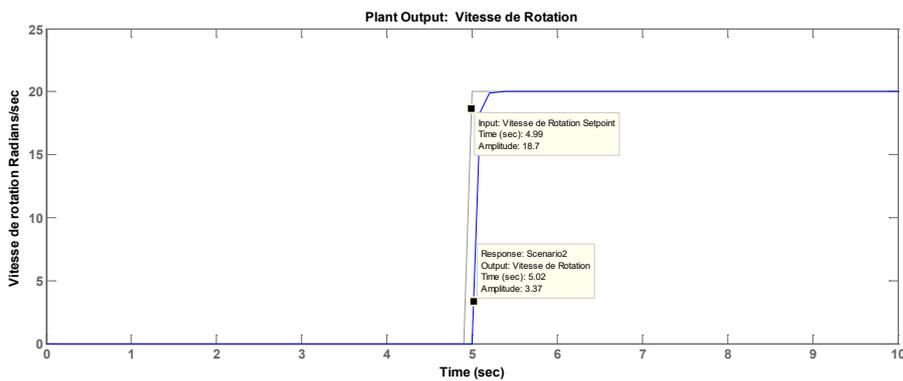


Figure 4.10: Allure de la vitesse face à une variation de consigne à l'instant 5 sec 3^{em} scénario.

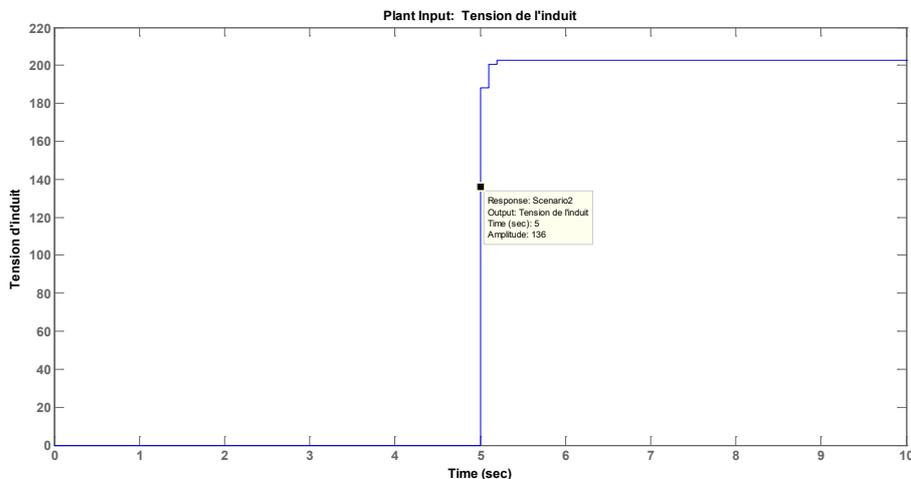


Figure 4.11: Evolution de la tension d'induit commandée par MPC 3^{em} scénario.

Interprétation :

Après le changement de consigne, il y a une légère perturbation dû au ce changement avant que le signal réel en bleu suit la valeur de référence en gris avec une stabilité et précision acceptables et sans dépassement, l'interface nous a permis d'améliorer la qualité de la réponse d'une manière simple.

4. Conclusion :

L'application du MPC comme régulateur de la vitesse du MCC montre que le système répond très bien, avec un excellent temps de réponse et une stabilité rapide.

A travers les courbes présentées, on a pu remarquer le suivi désiré entre les sorties (vitesse) et le signal de référence.

L'objectif de ce mémoire est l'étude de la commande prédictive à base de modèle.

Dans ce travail on a étudié et appliqué l'algorithme de la commande prédictive MPC pour commander la vitesse de rotation d'un moteur à courant continu. Les résultats de simulations nous ont permis de vérifier l'efficacité de cet algorithme, et le degré appréciable de performances que ce soit, au niveau de la précision, du temps de réaction, du dépassement, ou de la stabilité.

Ce travail nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Le MPC apporte des performances remarquables, notamment, en ce qui concerne la poursuite de la consigne imposée.
- Les paramètres de réglage ont une influence déterminante sur le comportement du système mais il n'est pas toujours facile de trouver des valeurs optimales pour ces paramètres
- L'interface **MPC design tool** du MATLAB nous a permis d'estimer un régulateur prédictif et d'améliorer la qualité de la réponse d'une manière simple.

- [1] E.G MIGLIORE, "Commande predictive a base de programmation semi définie " Thèse de doctorat, l'institut National des science appliquées de Toulouse, 2004
- [2] S.J.Qin and badgwell A survey of industrial model predictive control technology. *Control engineering practice*, 11:733–764,2003.
- [3] Olivier BACHELIER Cours d'Automatique Représentations d'état linéaires des systèmes monovariabiles, ENSIP 28 juin 2017
- [4] Alexandre Teplaira BOUM "commande prédictive d'un craqueur catalytique à lit fluidisé avec estimation des paramètres clés " Thèse de doctorat, de l'université de lorraine, 2014
- [5] Camacho, E. F. et Bordons, C. (1998). *Model Predictive Control in the process industry*. Springer, London.
- [6] De Keyser, R. M. C., Van de Velde, Ph. G. A. et Dumortier, F. G. A., (1988). A Comparative Study of Self-adaptive Long-range Predictive Methods. *Automatica*, vol. 24, pags. 149-163.
- [7] Ramírez, D. R. et Camacho, E. F. (2001). On the piecewise linear nature of Min-Max Model Predictive Control with bounded uncertainties. *Proceedings of the 40th Conference on Decision and Control*, Florida USA.
- [8] O. Bourebia, «Commande Prédictive Floue Des Systèmes Non Linéaires», Thèse De Doctorat, Université Mentouri De Constantine, 2011.
- [9] A. Bezzini, «Commande Prédictive Non Linéaire En Utilisant Les Systèmes Neuro-Flous Et Les Algorithmes Génétiques», Mémoire De Magister, Université Mohamed Khider De Biskra, 2013
- [10] S. Meziane, « Commandes Adaptative Et Prédictive De La Machine Asynchrone », Thèse De Doctorat, Université De Constantine, 2009.
- [11] S. Aouaouda, «Modélisation Multimodèle Et Commande Prédictive D'une Station D'épuration », Thèse De Doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba (Ubma) ,2012.
- [12] G. Idiri, «Commande Prédictive Des Systèmes Non Linéaires Dynamiques», Mémoire De Magister, Université Mouloud Mammeri De Tizi Ouzou, 2011

[13] J. Richalet, J. L. Estival, Ph. Fiani, "Industrial applications of Predictive Functional Control to metallurgical Industries", IEEE, 1995, pp. 934-942.

[14] 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.

[15] Eduardo F. Camacho, Carlos Bordons, Model Predictive Control, Springer publication, London, 2007.

[16] 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.

[17] Fabrice DESCHAMP, « Cours BAC S SI – Convertir L'énergie – Machine à Courant Continu » Sciences de L'ingénieur, LYCEE JACQUES PREVERT

[18] <https://www.google.com/search?q=constitution+de+moteur+a+courant+continuu&sourceid=chrome&ie=UTF-8>

[19] M. Mouldi Ennaceur, « Etude Et Conception D'un Algorithme Adaptatif Pour La Commande De Position D'un Moteur A Courant Continu », Mémoire, Université Du Québec, 1991.

[20] Cristina Stoica Maniu Principes de la commande prédictive École d'été francophone CA'NTI 22/2016

[21] L. Matoug, « Modélisation Et Commande Prédictive D'une Station De Production D'eau Glacée Basée Sur Un Compresseur Scroll », Mémoire De Magister, Université Badji-Mokhtar Annaba, 2008.

[22] THÈSE de DOCTORAT D'ÉTAT Thème « Commande des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires par la stratégie prédictive » Option AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE Par Mohamed Larbi SAIDI

[23] Mr ACHOUR AbdelYazid "Techniques de Commande avancée" Université A.MIRA-BEJAIA

[24] 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.

[25]https://www.researchgate.net/publication/309034694_Commande_adaptative_directe_avec_modele_de_referance_a_base_de_modele_floue_Automatique_Informatique_Industrielle_All