

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
المركز الجامعي لعين تموشنت
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
Institut de Technologie
Département de Génie Electrique



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE
Filière : ELECTROTECHNIQUE
Spécialité : COMMANDES ELECTRIQUES
Thème

Commande prédictive du moteur à courant continu

Présenté Par :

- 1) BENCHIHA AMIRA SAADIA
- 2) DIABATE FODE

Devant les jurys composés de :

Mr FLITTI Mohammed	MCA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Président
Mr AYACHE Zouaoui	MAA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Mr BENZAZZA Barghdadi	MAA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Examineur

Année universitaire 2018/2019

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre gratitude et remerciement à Allah le tout Puissant qui nous a donné la force, le courage et la patience d'effectuer ce travail.

Nous remercions chaleureusement notre encadreur Mr AYACHE ZOUAOUI pour avoir accepté de diriger notre travail, pour son aide précieuse, ses conseils et ses remarques.

On exprime notre profonde reconnaissance à nos parents, nos frères, nos sœurs ainsi que toute notre famille pour leurs encouragements et prières qui nous ont permis de finaliser ce travail.

Nos sincères remerciements à Mr FLITTI et Mr BENZAZZA qui ont contribué à notre formation et qui ont accepté de juger notre travail.

Enfin, on exprime notre gratitude à tous ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à l'élaboration de ce travail.

Ô Allah, envoie tes bénédictions sur ton noble messager, sa famille et ses compagnons. Et bénis-nous dans notre travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Ma très chère mère, mon très cher père et ma très chère grande mère pour leurs soutiens, leurs patiences et leurs confiances.

Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude pour tout ce qu'ils font pour moi « que Dieu vous garde et vous bénisse ».

Mes très chers frères Boucif et Adem,

Mon fiancé Said et toute sa famille surtout ma chère belle-mère.

Toute ma grande famille,

A Tous mes amis (es)

Sans oublier Diabaté Fodé mon frère dans la réalisation de ce travail.

Amira Benchiha

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Ma très chère Mère et à mon très cher Père, en témoignage et en gratitude de leurs dévouements, de leurs soutiens permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconforts moraux et leurs confiances.

Ma grande sœur Flématou, reçoit ici l'expression de ma profonde gratitude pour tout ce que vous avez fait pour moi durant toute ma formation universitaire.

Mon très cher frère Django et sa femme,

Mes adorables sœurs,

Toute ma famille,

Tous mes amis (es)

Sans oublier Benchaha Amira ma sœur dans la réalisation de ce travail.

« Que Dieu vous garde en vie et vous bénisse ».

Diabaté Fodé

Tables des matières

LISTE DES FIGURES.....	7
LA LISTE DES TABLEAUX.....	8
LA LISTE DES ORGANIGRAMMES	8
LA TABLE DES ABREVIATIONS.....	8
INTRODUCTION GENERALE.....	1
I. CHAPITRE I : MACHINE A COURANT CONTINU	3
I.1 Introduction :.....	3
I.2 Définition:	3
I.3 Description de la machine à courant continu :	4
I.3.1 L'inducteur :	5
I.3.2 L'induit :	5
I.3.3 Le collecteur et les balais :	6
I.4 Principe de fonctionnement du MCC :	7
I.5 Différents types de moteur à courant continu	8
I.5.1 Les moteurs à balais :	8
I.5.2 Brushless :	11
I.6 Rendement : [7]	12
I.7 Bilan des puissances : [7]	12
I.8 Variation de vitesse:	13
I.9 Modélisation du moteur à courant continu :	13
I.9.1 Modèle de la MCC sous forme de Fonction de transfert:	14
I.9.2 Modèle de MCC sous forme d'Equations d'état de MCC :	16

I.10	Avantages et les inconvénients :	19
I.10.1	Avantages : [10]	19
I.10.2	Inconvénients :	19
I.11	Conclusion :	19
II.	CHAPITRE II : COMMANDE PREDICTIVE	18
II.1	Introduction :	18
II.2	Principes de la commande prédictive :	18
II.3	Éléments d'une commande prédictive :	20
II.4	Stratégie générale de la commande prédictive :	21
II.5	Modèle du système :	23
II.5.1	Modèle du processus :.....	24
II.5.2	Modèle de perturbation :	25
II.5.3	Fonction objectif et obtention de la loi de commande :	26
II.5.4	Les paramètres :	26
II.5.5	Trajectoire de référence :.....	27
II.5.6	Contraintes :	27
II.6	La Commande Prédictive Fonctionnelle (PFC) :	29
II.6.1	Modèle interne :	29
II.6.2	Trajectoire de référence :.....	30
II.6.3	Structuration de la variable manipulée :.....	32
II.6.4	Principe de l'horizon fuyant :	32
II.7	Avantages de la commande prédictive :	33
II.8	Conclusion :	33
III.	CHAPITRE III : APPLICATION DE LA COMMANDE PREDICTIVE AU CONTROLE DE VITESSE DU MCC	31
III.1	Introduction :	31
III.2	Le système de commande MPC proposé :	31

III.3 Test du système :	36
III.3.1 Variation de consigne de vitesse :	36
III.3.2 Variation de couple résistant :	37
III.4 Conclusion	38
IV. CONCLUSION GENERALE	38
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE	39
ANNEXE	41

Liste des figures

Figure I-1 : Conversion d'énergie de la machine à courant continu	4
Figure I-2 : Machine à courant continu	4
Figure I-3 : Inducteur de la machine à courant continu	5
Figure I-4: Induit de la machine à courant continu	6
Figure I-5: Dispositif collecteur/balais de la machine à courant continu.....	7
Figure I-6 : Principe de fonctionnement de la machine à courant continu.....	8
Figure I-7: Modèle électrique d'un Moteur à excitation séparée	9
Figure I-8: Modèle électrique d'un Moteur à excitation série	9
Figure I-9 : Modèle électrique d'un Moteur à excitation shunt	10
Figure I-10: Modèle électrique d'un Moteur à excitation compound	10
Figure I-11 : Moteur brushless	11
Figure I-12: Bilan de la puissance	12
Figure I-13: Schéma équivalent d'un moteur à courant continu	13
Figure I-14 : Schéma bloc de vitesse de la MCC	14
Figure I-15 : Schéma bloc du MCC en MATLAB/SIMULINK.....	17
Figure I-16 : Allure de la vitesse	18
Figure II-1: Philosophie de la commande prédictive. [16].....	19
Figure II-2: Stratégie de commande prédictive [15].....	21
Figure II-3: La méthodologie du MPC [13]	22
Figure II-4: Le schéma fonctionnel de la structure de base des algorithmes MPC [13]	23

Figure II-5: Signal de commande avec des restrictions [14]	28
Figure II-6: Trajectoire de référence et horizon de prédiction [15]	31
Figure II-7: Entrées et sorties de base [15]	32
Figure III-1: Modèle du contrôle MPC appliqué à la MCC sous SIMULINK	32
Figure III-2 : LA MCC à excitation séparée	32
Figure III-3 : Modélisation de La MCC sous SIMULINK	33
Figure III-4:Paramétrage du contrôleur prédictif	34
Figure III-5: Configuration du contrôleur	35
Figure III-6: Comportement temporelle de la vitesse	35
Figure III-7 : Contrôle qui assure la sortie déterminée	36
Figure III-8:Allure de la vitesse face à une variation de consigne.....	37
Figure III-9: Allure de la vitesse face à une variation de la charge TL.....	38

La liste des tableaux

Tableau I-1 : Paramètre de MCC à excitation séparée.....	Erreur ! Signet non défini.
--	------------------------------------

La liste des organigrammes

Organigramme II-1 : Schéma de principe de la commande prédictive.....	20
---	----

La table des abréviations

MCC : Le moteur à courant continu.

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

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

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

MAC : Les Méthodes et Algorithmes en Commande (Model Algorithmic Control).

EPSAC : La commande auto-adaptative prédictive (Extended Prediction Self Adaptive Control).

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

UPC : La commande prédictive unifiée (Unified Predictive Control).

EHAC : La commande adaptative à horizon étendu (Extended Horizon Adaptive Control).

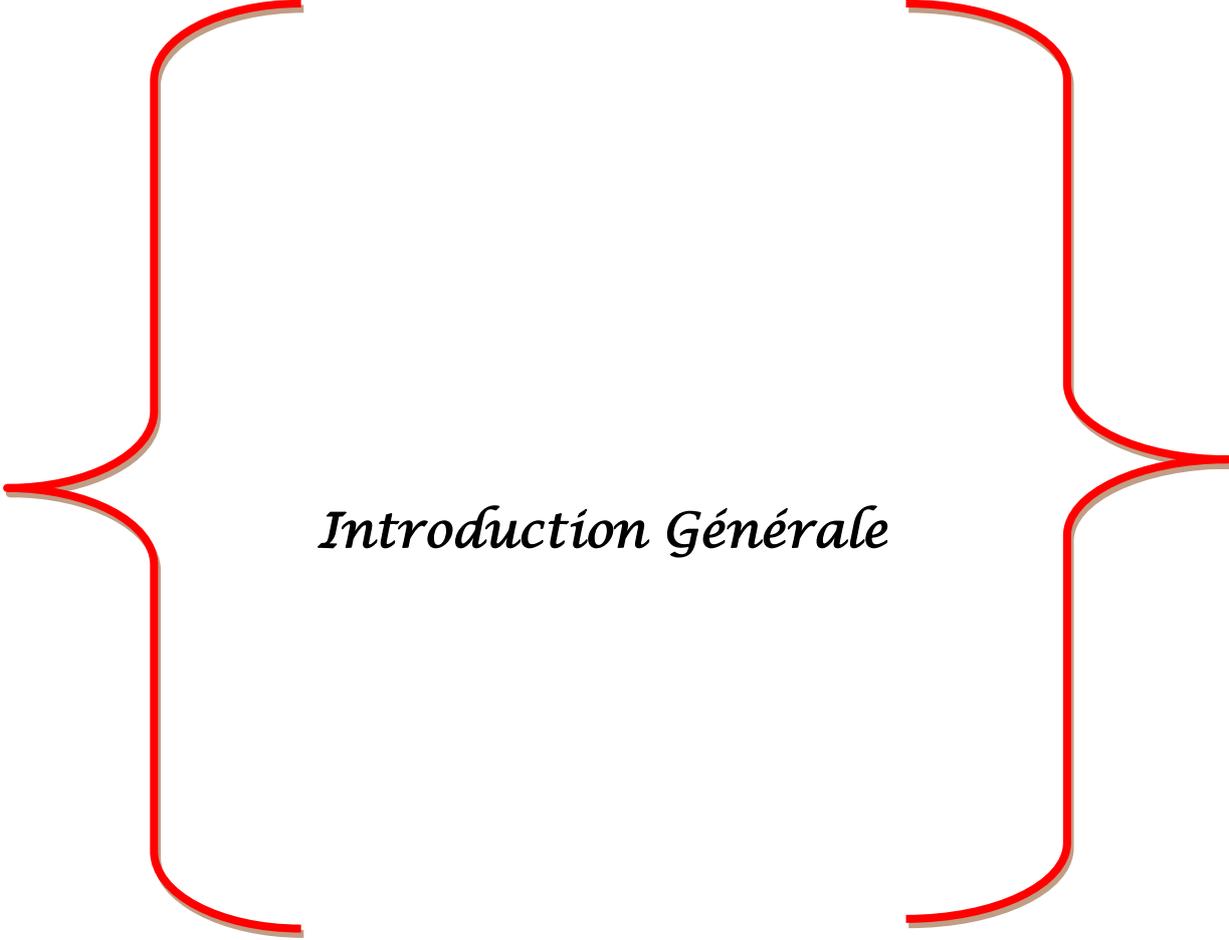
MUSMAR : La commande adaptative Multivariable Multi pas (Multi Step Multivariable Adaptive Control).

MURHAC : La commande adaptative à horizon réduit à base de prédicteur multiple (Multipredictor Receding Horizon Adaptive Control).

CARIMA : Le modèle autorégressif de moyenne mobile intégré (Controlled Auto-Regressive Integrated Moving Average).

PLC : Contrôleur a logique programmable (Programmable Logic Controller).

DCS : Système de contrôle distribué (Distributed Control System).



Introduction Générale

Introduction Générale

Dans la plupart des processus industriels, en particulier les moteurs électriques, il est indispensable de maîtriser certains paramètres physiques (vitesse, position, angle...etc.), il est donc nécessaire d'avoir recours à une commande. La commande prédictive est une technique de commande avancée de l'automatique. Elle 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.

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. [20]

La philosophie de la commande prédictive se résume à "utiliser le modèle pour prédire le comportement du système et choisir la meilleure décision au sens d'un certain coût tout en respectant les contraintes". 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.

Ce mémoire est présenté en trois chapitres :

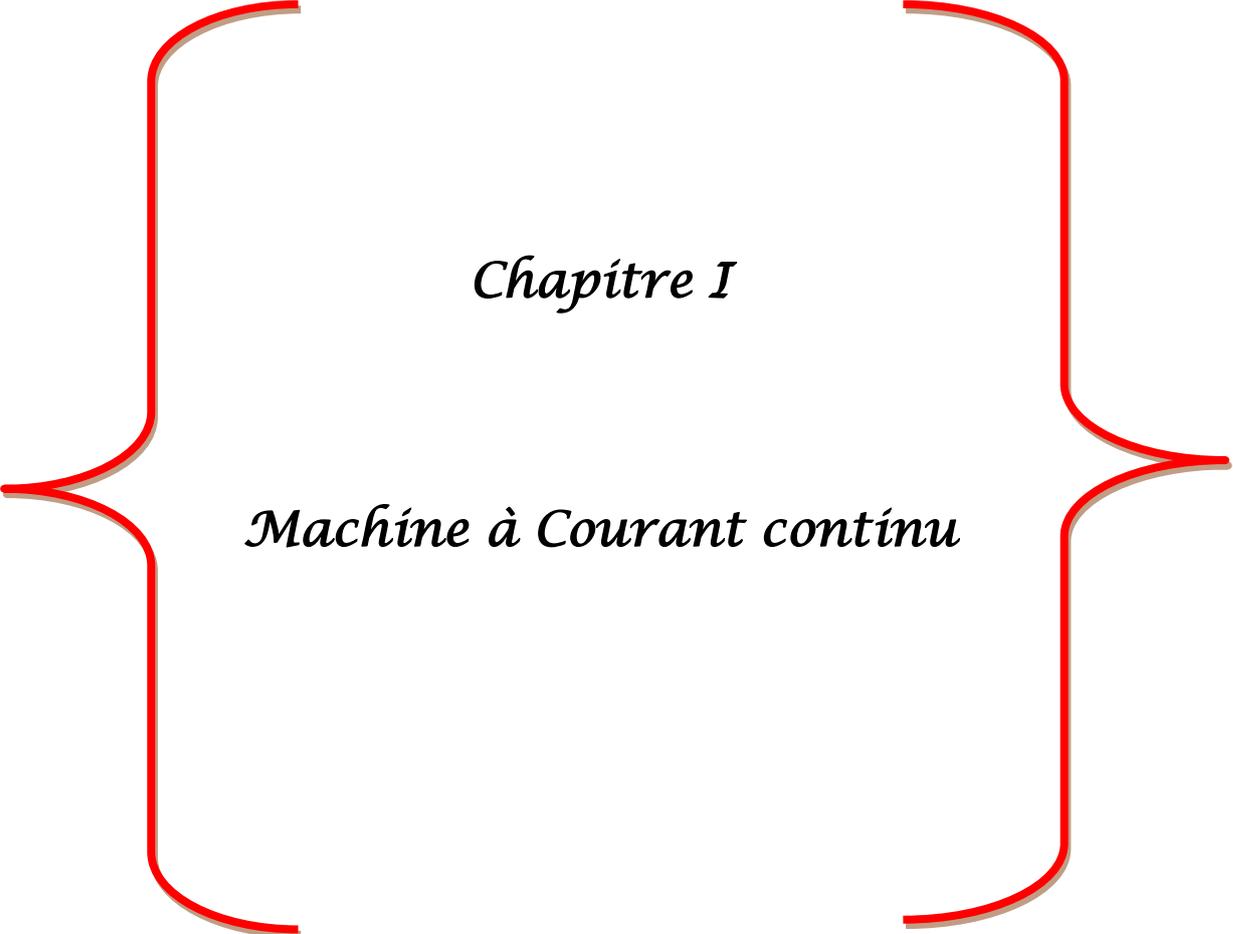
Le premier chapitre traite les généralités de la machine courant continue (MCC) et sa modélisation.

Le deuxième chapitre introduit les principes généraux de la commande prédictive et l'analyse de la commande prédictive à base de modèle d'état (MPC) et la commande prédictive fonctionnelle(PFC).

Le troisième chapitre concerne la simulation de la commande prédictive d'une machine à courant continu à excitation séparée sous MATLAB/SIMULINK.

Enfin on termine ce mémoire par une conclusion générale.

.



Chapitre I

Machîne à Courant continu

Chapitre I : Machine à courant continu

I.1 Introduction :

Les machines à courant continu sont désormais une technologie supplantée dans beaucoup de domaines mais elles s'imposent encore dans les très faibles puissances ou les faibles tensions et elles se prêtent encore très bien à la variation de vitesse avec des technologies électroniques simples et peu onéreuses. Les machines à courant continu permettent une régulation précise du couple et sa vitesse de rotation nominale. Les machines à courant continu sont très utilisées dans les systèmes automatiques qui nécessitent une variation précise de la vitesse de rotation. [1]

Dans ce chapitre, nous allons présenter quelques généralités sur les machines à courant continu ensuite faire sa modélisation.

I.2 Définition:

Les machines à courant continu sont des convertisseurs électromécaniques d'énergie : soit elles convertissent l'énergie électrique absorbée en énergie mécanique lorsqu'elles sont capables de fournir une puissance mécanique suffisante pour démarrer puis entraîner une charge en mouvement, on dit alors qu'elles ont un fonctionnement moteur. Soit elles convertissent l'énergie mécanique reçue en énergie électrique lorsqu'elles subissent l'action d'une charge entraînée. On dit alors qu'elles ont un fonctionnement générateur. [1]

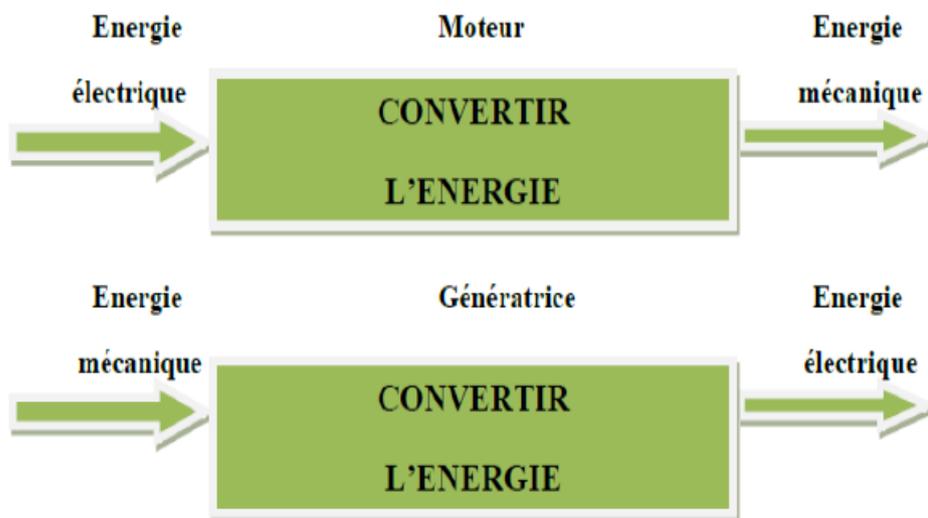


Figure I-1 : Conversion d'énergie de la machine à courant continu

I.3 Description de la machine à courant continu :

La machine à courant continu est constituée de trois parties principales : [2]

- ❖ L'inducteur.
- ❖ L'induit.
- ❖ Le dispositif collecteur / balais.

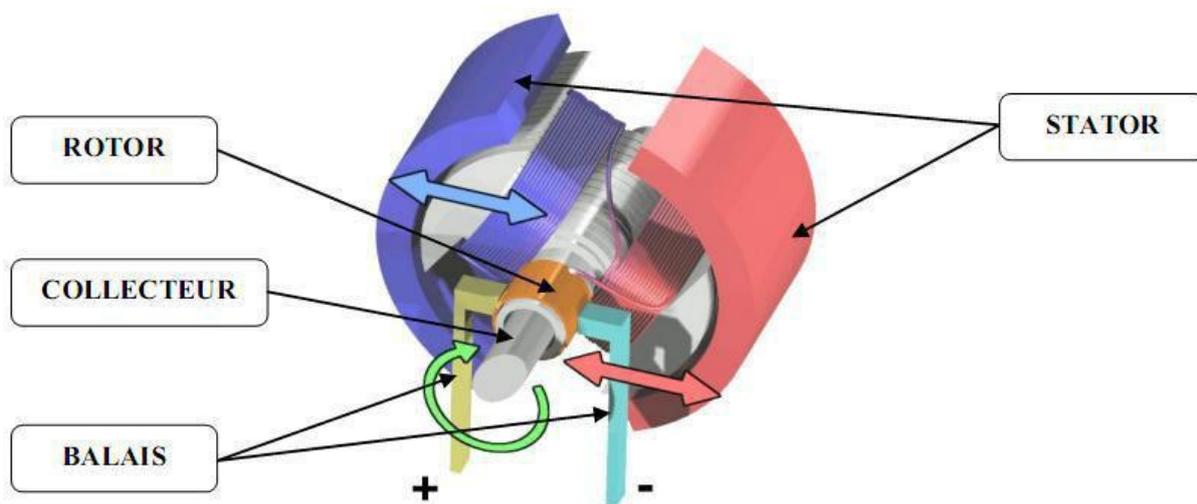


Figure I-2 : Machine à courant continu

I.3.1 L'inducteur :

Il est formé soit d'aimants permanents en ferrite soit de bobines placées autour des noyaux polaires. Lorsque les bobines sont parcourues par un courant continu, elles créent un champ magnétique dans le circuit magnétique de la machine notamment dans l'entrefer, espace séparant la partie fixe et la partie mobile, où se situent les conducteurs. [2]

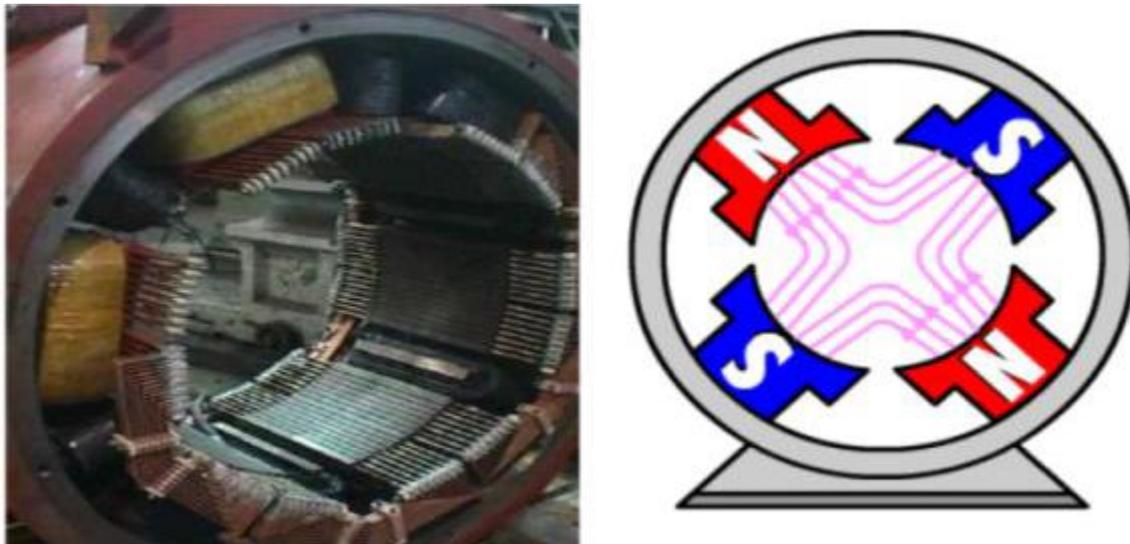


Figure I-3 : Inducteur de la machine à courant continu

I.3.2 L'induit :

L'induit est composé d'un ensemble de bobines identiques réparties uniformément autour d'un noyau cylindrique. Il est monté sur un arbre et tourne entre les pôles de l'inducteur. L'induit constitue un ensemble de conducteurs qui coupent les lignes de champ magnétique.

Les bobines sont disposées de telle façon que leurs deux côtés coupent respectivement le flux provenant d'un pôle nord et d'un pôle sud de l'inducteur. Le noyau est formé d'un assemblage de tôles en fer doux. Ces tôles sont isolées électriquement les unes des autres et portent des encoches destinées à recevoir les bobines. [2]



Figure I-4: Induit de la machine à courant continu

I.3.3 Le collecteur et les balais :

Le collecteur figure I-5.a est un ensemble de lames de cuivre où sont reliées les extrémités du bobinage de l'induit. [3]

- ❖ Ensemble cylindrique de lames de cuivre isolées les unes des autres.
- ❖ Chaque lame est soudée à un des deux fils sortant d'une des bobines de l'induit.
- ❖ Il tourne avec le rotor.

Il est essentiellement constitué par une juxtaposition cylindrique de lames de cuivre séparées par des lames isolantes. Chaque lame est reliée électriquement au bobinage induit.

Les balais (ou charbons) figure I-5.b sont situés au stator et frottent sur le collecteur en rotation. [3]

- ❖ Faits en carbone en raison de sa bonne conductivité électrique et de son faible coefficient de frottement.
- ❖ Assurent la liaison électrique (contact glissant) entre la partie fixe et la partie tournante.
- ❖ En s'appuyant sur le collecteur, assurent un contact électrique entre l'induit et le circuit extérieur.
- ❖ Dans une machine à enroulements imbriqués, il y a autant de balais que de pôles magnétiques inducteurs.
- ❖ Pour des machines de forte puissance, la mise en parallèle des balais est alors nécessaire.

[4]



Figure I-5: Dispositif collecteur/balais de la machine à courant continu

I.4 Principe de fonctionnement du MCC :

Le fonctionnement du moteur à courant continu est basé sur le principe des forces de Laplace:

Un conducteur de longueur (L), placé dans un champ magnétique et parcouru par un courant, est soumis à une force électromagnétique.

Le champ créé par l'inducteur agit sur les conducteurs de l'induit : Chacun des (N) conducteurs de longueurs (L) placé dans le champ (B) et parcouru par un courant (I) est le siège d'une force électromagnétique perpendiculaire au conducteur :

$$F = BIL \sin \alpha \quad (I-1)$$

Ces forces de Laplace exercent un couple proportionnel à l'intensité (I) et au flux (Φ) sur le rotor. Le moteur se met à tourner à une vitesse proportionnelle à la tension d'alimentation (V) et, inversement proportionnelle au flux (Φ).

Au passage de tout conducteur de l'induit sur la ligne neutre, le courant qui le traverse change de sens grâce au collecteur. Le moteur conserve le même sens de rotation.

Pour inverser le sens de rotation du moteur, il convient d'inverser le sens du champ produit par l'inducteur par rapport au sens du courant circulant dans l'induit [1]:

- Soit on inverse la polarité de la tension d'alimentation de l'induit.
- Soit on inverse la polarité d'alimentation du circuit d'excitation.

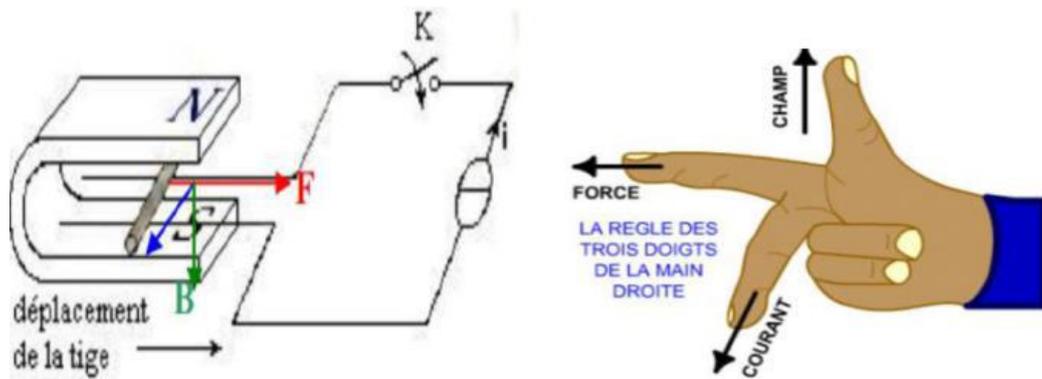


Figure I-6 : Principe de fonctionnement de la machine à courant continu

I.5 Différents types de moteur à courant continu

Les moteurs à courant continu (MCC) représentent le premier type de moteur largement utilisé et les coûts initiaux des systèmes (moteur et variateur) ont tendance à être moins élevés que les systèmes courant alternatif pour des appareils de faible consommation, mais avec des appareils de plus grande consommation, les frais d'entretien généraux augmentent et devraient être pris en compte. La vitesse des MCC peut être contrôlée en variant la tension d'alimentation et ces moteurs sont disponibles dans une large gamme de tensions. Cependant, les tensions les plus utilisées sont 12 et 24 V, dont certains avantages sont : [4]

- Installation facile.
- Commande de vitesse dans une large gamme.
- Démarrage, arrêt, marche arrière et accélération rapides.
- Couple de démarrage élevé.
- Courbe couple-vitesse linéaire.

Les MCC sont largement utilisés et ce avec de petits appareils et outils jusqu'aux palans, ascenseurs et véhicules électrique.

Les deux types les plus courants sont : [4]

I.5.1 Les moteurs à balais :

Ils sont généralement utilisés pour des applications à faible budget, dans lesquelles le système de commande est relativement simple, telles que des applications grand public, et pour des équipements industriels basiques. Ce type de moteur peut être décomposé comme ci-dessous :

I.5.1.1 Moteurs à inducteur bobiné: [5]

I.5.1.1.1 Moteurs à excitation séparée :

Ils sont peu employés, car ils nécessitent deux sources de tension. On les utilise pour des machines de forte puissance dans le but d'améliorer la commutation. (On augmente la tension, on diminue le courant). [5]

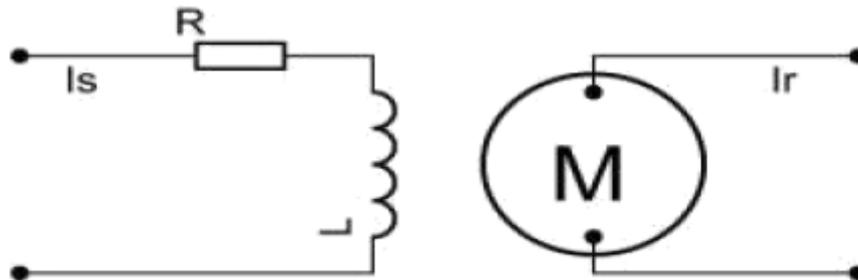


Figure I-7: Modèle électrique d'un Moteur à excitation séparée

I.5.1.1.2 Moteurs à excitation liée :

I.5.1.1.2.1 Moteurs à excitation série :

Le bobinage du stator est connecté en série au bobinage du rotor. Le contrôle de la vitesse est effectué en variant la tension d'alimentation. Cependant, ce type de moteur offre un contrôle médiocre de la vitesse et lorsque le couple vers le moteur augmente, sa vitesse chute. Ces moteurs sont utilisés dans les applications exigeant un couple de démarrage élevé comme les automobiles, les palans, ascenseurs et grues. [5]

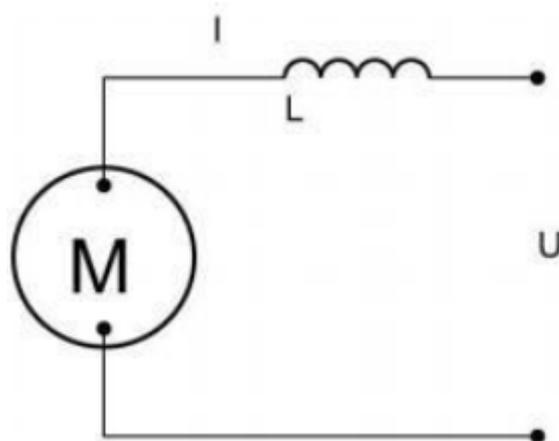


Figure I-8: Modèle électrique d'un Moteur à excitation série

I.5.1.1.2.2 Moteurs à excitation shunt (parallèle) :

Le bobinage du stator est connecté en parallèle au bobinage du rotor et peut fournir un couple plus élevé, sans réduction de vitesse lors d'une augmentation du courant de moteur. Son couple de démarrage est moyen avec une vitesse constante, il convient donc aux applications telles que les tours, aspirateurs, convoyeurs et meuleuses. [5]

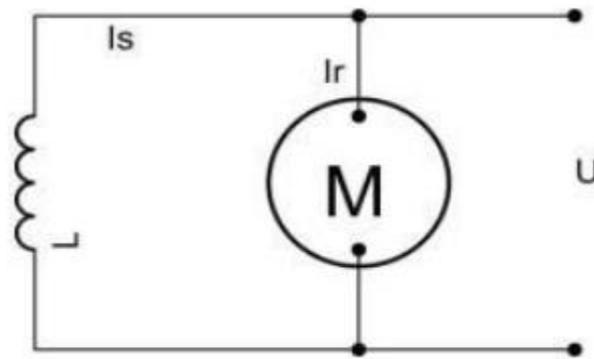


Figure I-9 : Modèle électrique d'un Moteur à excitation shunt

I.5.1.1.2.3 Moteurs à excitation compound (composée) :

Ce type de moteur combine la structure à excitation série et celle du bobinage "shunt". Ainsi la polarité du bobinage shunt s'ajoute aux champs en série. Ce type de moteur possède un couple de démarrage élevé et offre une large variation de vitesse. Il est utilisé pour piloter des compresseurs, pompes centrifuges à tête variable, presses rotatives, scies circulaires, machines de cisaillement, ascenseurs et carrousels à bagages. [5]

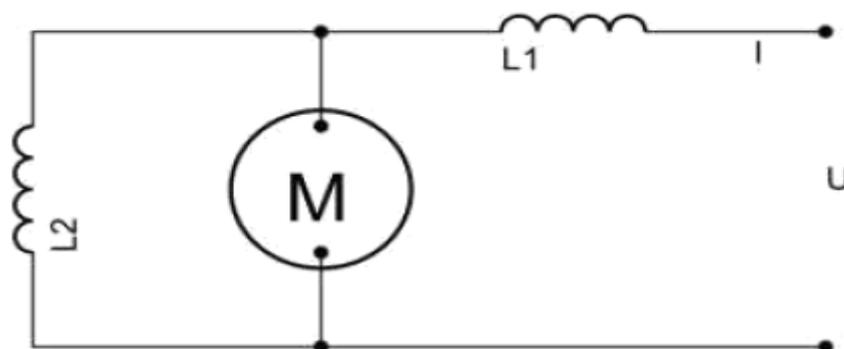


Figure I-10: Modèle électrique d'un Moteur à excitation compound

I.5.1.2 Moteur à aimant permanent :

Ce type de moteur est utilisé dans des applications où une commande précise et un couple faible sont nécessaires, telles que dans la robotique et les servo-systèmes. Il n'y a pas de circuit inducteur, le flux inducteur est produit par un aimant permanent. Tous les moteurs à courant continu de faible puissance et les micromoteurs sont des moteurs à aimant permanent. Ils représentent maintenant la majorité des moteurs à courant continu. Ils sont très simples d'utilisation. [4]

I.5.2 Brushless :

Le défaut principal des moteurs à courant continu est la présence des balais, qui engendrent des frottements, des parasites, et limitent la durée de vie du moteur par leur usure. Pour éviter tous ces problèmes on utilise des moteurs brushless, ou moteurs sans balais. [6]



Figure I-11 : Moteur brushless

I.5.2.1 Composition du moteur brushless :

Un moteur brushless comporte les mêmes éléments qu'un moteur à courant continu, excepté le collecteur, mais l'emplacement des bobines et des aimants permanents sont inversés. Le rotor est composé d'un ou plusieurs aimants permanents, et le stator de plusieurs bobinages.

I.5.2.2 Fonctionnement du moteur brushless :

Les bobines sont alimentées de façon séquentielle. Cela crée un champ magnétique tournant à la même fréquence que les tensions d'alimentation. L'aimant permanent du rotor cherche à chaque instant à s'orienter dans le sens du champ. Pour que le moteur brushless tourne les tensions d'alimentation doivent être adaptées continuellement pour que le champ reste en avance sur la position du rotor, et ainsi créer un couple moteur.

I.6 Rendement : [7]

Les moteurs à courant continu consomment une partie de l'énergie absorbée pour leur fonctionnement. L'énergie mécanique fournie sera toujours plus petite que l'énergie électrique absorbée. Le rapport entre l'énergie fournie et l'énergie absorbée est le rendement.

P_u : Puissance utile.

P_a : Puissance absorbée.

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad (I-2)$$

I.7 Bilan des puissances : [7]

Le bilan des puissances décline toutes les puissances, depuis la puissance absorbée d'origine électrique jusqu'à la puissance utile de nature mécanique. Entre ces deux termes, l'étude se portera sur toutes les pertes aussi bien mécaniques qu'électriques, et enfin une puissance sera étudiée tout particulièrement, elle correspond au passage de la puissance électrique à la puissance mécanique.

Le bilan, peut être résumé à l'aide schéma suivant :

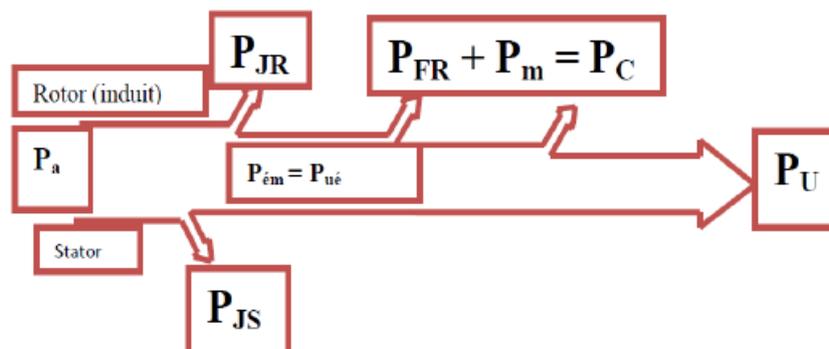


Figure I-12: Bilan de la puissance

P_a : Puissance absorbée.

P_u : Puissance utile.

$P_{ém}$: Puissance électromagnétique.

PJS : Pertes par effet joule dans l'inducteur.

PJR : Pertes par effet joule dans l'induit.

Pc : Pertes fer + pertes mécaniques : dites pertes constantes.

I.8 Variation de vitesse:

Pour faire varier la vitesse d'un moteur à courant continu, on peut agir sur la tension aux bornes de l'induit. La tension d'induit est directement proportionnelle à la vitesse de rotation. La puissance varie mais le couple reste constant. On dit alors que l'on fait de la variation de vitesse à couple constant.

I.9 Modélisation du moteur à courant continu :

Selon le schéma de la figure. I-14, un moteur électrique à courant continu est régi par les équations physiques découlant de ses caractéristiques électriques, mécaniques et magnétiques. D'après la loi de Newton, combiné à des lois de Kirchhoff, On peut écrire les équations différentielles de premiers ordres suivantes : [8]

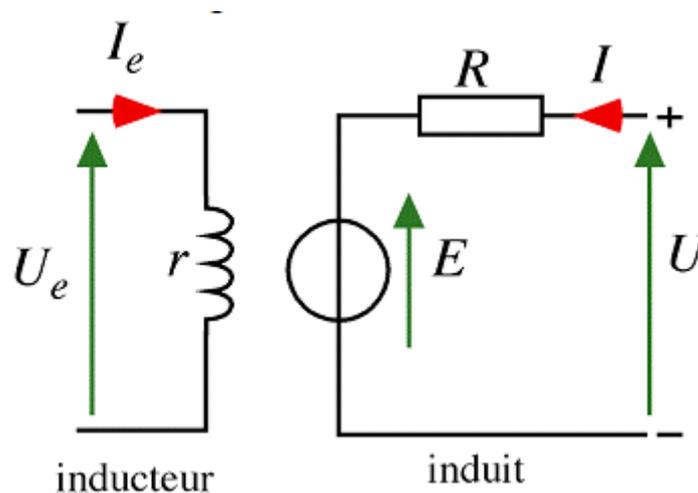


Figure I-13: Schéma équivalent d'un moteur à courant continu

$$U(t) = RI(t) + L \frac{dI}{dt} + E(t) \quad (I-3)$$

$$E = K_e \Omega \quad (I-4)$$

D'après le principe fondamental de la dynamique on a :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - f\Omega \quad (I-5)$$

$$C_e = K_m I \tag{I-6}$$

$U(t)$: Tension appliquée au moteur.

$E(t)$: Force contre électromotrice.

$i(t)$: Intensité traversant le moteur.

$\Omega(t)$: Vitesse de rotation du rotor.

C_e : Couple moteur généré.

$C_r = TL$: Couple résistant.

f : Coefficient de frottement visqueux.

J : Moment d'inertie de l'axe du rotor.

$K_m = KT$: Constante de couple.

K_e : Constante de la force électromotrice.

A partir des équations précédentes le schéma bloc de la MCC est obtenu figure I-15.

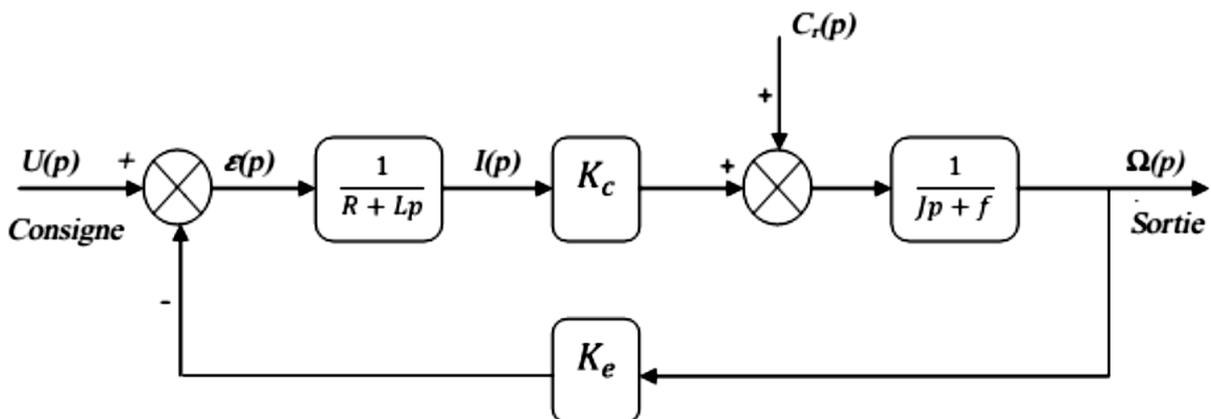


Figure I-14 : Schéma bloc de vitesse de la MCC

I.9.1 Modèle de la MCC sous forme de Fonction de transfert:

La fonction de transfert $H(p)$ entre la tension d'entrée $U(p)$ et la vitesse de sortie $\Omega(p)$ est présentée par l'équation I-6:

$$H(P) = \frac{S(P)}{E(P)} = \frac{\Omega(P)}{U(P)} \quad (I-7)$$

En supposant le couple résistant nul $C_r=0$, l'équation mécanique I-5 devient :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - f\Omega \quad (I-8)$$

L'équation I-9 représente la transformée de Laplace de l'équation I-8 :

$$JP\Omega(P) = C_e - f\Omega(P) \quad (I-9)$$

A partir de l'équation I-9 on obtient l'équation de la vitesse I-10 :

$$\Omega(P) = \frac{C_e}{JP+f} \quad (I-10)$$

L'équation du couple et l'équation électrique de la tension dans le domaine de Laplace sont respectivement données par les équations I-11 et I-12 :

$$C_e = kmI(P) \quad (I-11)$$

$$U(P) = RI(P) + LPI(P) + E(P) \quad (I-12)$$

A partir de l'équation I-11 on obtient l'équation du courant I-13 :

$$I(P) = \frac{U(P)-E(P)}{R+LP} \quad (I-13)$$

En remplaçant l'expression du courant I-13 dans l'équation I-11, on obtient l'équation du couple I-14 :

$$C_e = \frac{km(U(P)-E(P))}{R+LP} \quad (I-14)$$

En remplaçant l'expression de la force électromotrice I-4 dans l'équation I-14, on obtient l'équation du couple finale I-15 :

$$C_e = \frac{km.U(P)-km.ke.\Omega(P)}{R+LP} \quad (I-15)$$

A partir de l'équation mécanique I-5, la vitesse aura pour expression:

$$\Omega(P) = \frac{km.U(P)-km.ke.\Omega(P)}{(R+LP)(JP+f)} \quad (I-16)$$

L'équation I-16 peut être réécrite sous la forme I-17 ou bien I-18 :

$$\Omega(P).(R + LP)(JP + f) = km.U(P) - km.ke.\Omega(P) \quad (I-17)$$

$$\Omega(P).(R + LP)(JP + f + km.ke) = km.U(P) \quad (I-18)$$

L'expression de la fonction de transfert $H(P) = \frac{\Omega(P)}{U(P)}$ sera :

$$H(P) = \frac{km}{(R+LP)(JP+f+km.ke)} \quad (I-19)$$

$$H(P) = \frac{km}{LJP^2+(RJ+Lf+L.km.ke).P+Rf+R.km.ke} \quad (I-20)$$

Finalement on aboutit à une fonction de transfert de deuxième ordre équation I-21 :

$$H(P) = \frac{\frac{1}{ke}}{\frac{LJ}{km.ke}P^2 + \frac{(RJ+Lf)}{km.ke}P + 1} \quad (I-21)$$

I.9.2 Modèle de MCC sous forme d'Equations d'état de MCC :

De manière générale, la dynamique d'un système linéaire invariant d'entrée u et de sortie y peut être décrite par une représentation sous la forme :

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (I-22)$$

$$y = Cx + Du \quad (I-23)$$

Avec A , B , C et D des matrices constantes et x un vecteur de dimension n , appelé vecteur d'état. Cette représentation est appelée représentation d'état du système. Le vecteur d'état permet de décrire complètement l'évolution du système, dont il donne une représentation interne.

Le système d'équations différentielles d'ordre un $\frac{dx}{dt} = Ax + Bu$ rend compte des équations dynamiques du système alors que la relation $y = Cx + Du$ est l'équation de mesure (ou de sortie) du système.

On peut facilement déterminer un modèle d'état du MCC. On considère que l'entrée du système est sa tension d'induit u alors que sa sortie est représentée par la vitesse de rotation Ω du rotor. On choisit deux variables indépendantes du système : la vitesse de rotation $x_1 = \Omega$ et le courant d'induit $x_2 = i$. L'équation électrique (I.2) s'écrit alors :

$$Rx_2 + L \frac{dx_2}{dt} + K_e x_1 = u \quad (I-24)$$

De même à partir de l'équation mécanique (I.4) on a : ($C_r = 0$)

$$J \frac{dx_1}{dt} = K_m x_2 + f x_1 \quad (I-25)$$

On en déduit la représentation d'état :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{f}{J} & \frac{K_m}{J} \\ -\frac{K_e}{L} & -\frac{R}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{pmatrix} u \quad (I-26)$$

$$y = (1 \ 0) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad (I-27)$$

Simulation du MCC avec utilisation de la charge résistive Cr= 5Nm

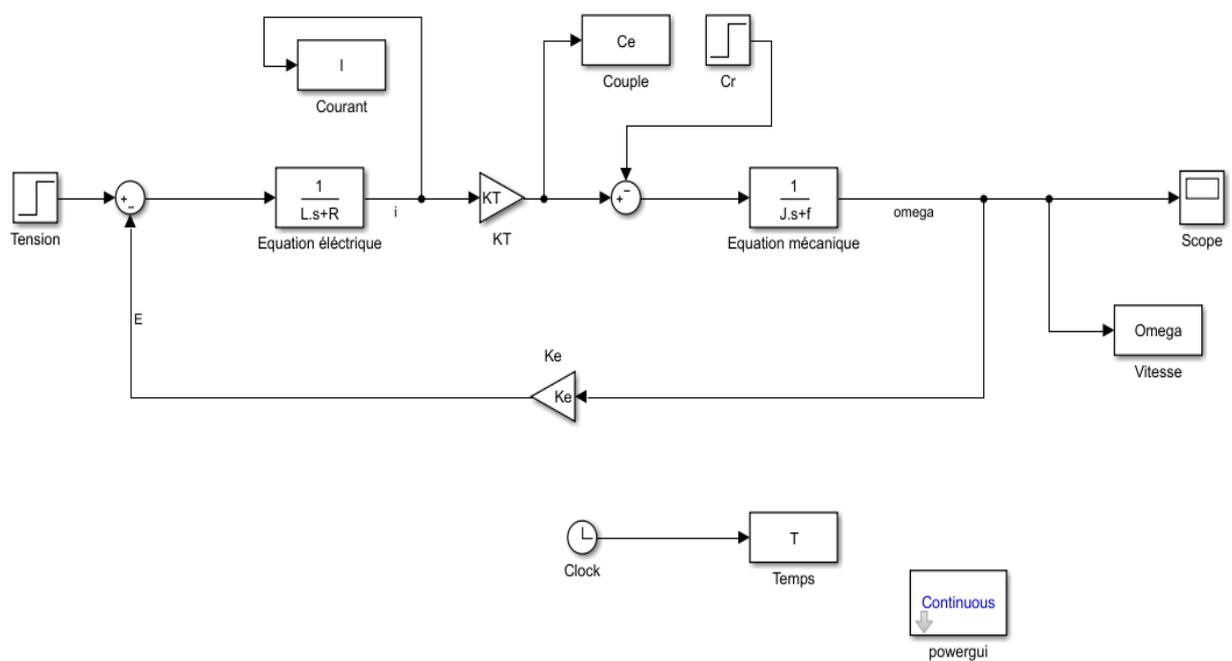


Figure I-15 : Schéma bloc du MCC en MATLAB/SIMULINK

Paramètre du MCC	
Tension d'induit U [V]	400
Résistance d'induit R_a [Ω]	2.03
inductance d'induit L_a [mH]	32.2
Moment d'inertie J [kg m ²]	0.05
Coefficient de frottement f [N.m/rad/s]	0.000131
Coefficient $K_T=K_e$ [Nm/A]	2.732
Vitesse de rotation N [rad/s]	157

Tableau I-1 : Paramètre de MCC à excitation séparée [9]

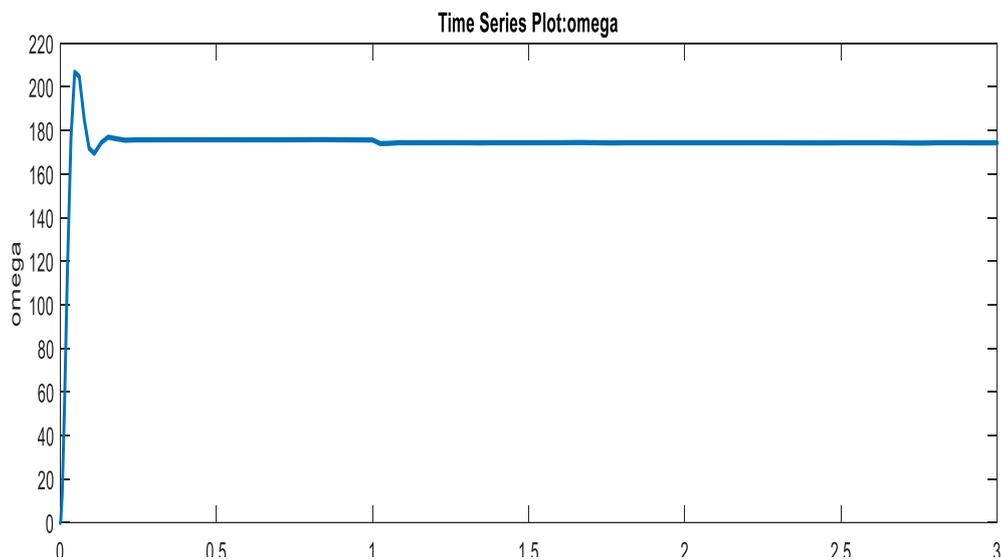


Figure I-16 : Allure de la vitesse

INTERPRETATION :

La figure I-16 montre le résultat de simulation du MCC avec utilisation de charge. On remarque que la réponse de vitesse diminue pendant l'application de couple de charge à instant $t=1s$, le couple électromagnétique prend la valeur de charge ($C_r=5Nm$).

I.10 Avantages et les inconvénients :

I.10.1 Avantages : [10]

- ❖ Alimentation aisée dans les systèmes transportant leur réserve d'énergie (autonome) : pile ou batterie.
- ❖ Une large gamme de variation de vitesse au-dessus et au-dessous de la vitesse nominale.
- ❖ La variation de fréquence de rotation est simple à réaliser.
- ❖ Fonctionnement avec des couples constants ou variables.
- ❖ Une accélération, un freinage et une inversion du sens de rotation très rapide, ce qui est avantageux dans le cas des appareils de levage et des machines-outils.
- ❖ Une vitesse de rotation qui peut être réglée par l'intermédiaire d'un système de rétroaction.
- ❖ Une facilité de récupération d'énergie (fonctionnement dans les 4 quadrants).

I.10.2 Inconvénients :

Le principal problème de ces machines vient de la liaison entre les balais ou charbons et le collecteur rotatif. [7]

- ❖ Plus la vitesse de rotation est élevée, plus les balais doivent appuyer fort pour rester en contact et plus le frottement est important.
- ❖ Aux vitesses élevées, les charbons doivent être remplacés très régulièrement.
- ❖ Le contact électrique imparfait cause des arcs électriques, usant rapidement le commutateur et générant des parasites dans le circuit d'alimentation.
- ❖ Un mauvais facteur de puissance à basse vitesse. [10]
- ❖ Nécessite beaucoup de maintenance, notamment pour le remplacement des balais sur le collecteur.
- ❖ Ne peut pas être utilisé dans des environnements explosifs, le frottement des balais sur le collecteur engendre des étincelles.

I.11 Conclusion :

La supériorité de ces moteurs réside dans le fait qu'ils se prêtent facilement à un contrôle souple, continu et presque instantané de leur vitesse. Dans ce chapitre nous avons présenté quelque généralité sur le moteur à courant continu, le principe de fonctionnement et ses caractéristiques, cela, dans le but d'appliquer à notre moteur une commande prédictive dans le chapitre qui suit.



Chapitre II

Commande Prédicative

Chapitre II : Commande prédictive

II.1 Introduction :

La commande prédictive est une approche de commande avancée. De toutes les commandes qui portent cette appellation, la commande prédictive est la plus utilisée dans l'industrie, aussi bien pour les qualités techniques et ses performances ainsi que sa facilité de mise en œuvre. Son champ d'application s'étend à tous les domaines industriels, notamment aux cas où la régulation PID n'est pas efficace. [11]

Ce chapitre a pour but d'introduire les principes généraux de la commande prédictive et d'analyser les structures les plus utilisées en l'occurrence la commande prédictive à base de modèle d'état (MPC) et la commande prédictive fonctionnelle(PFC).

II.2 Principes de la commande prédictive :

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. Cette idée est simple et pratiquée de façon assez systématique dans la vie quotidienne. 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. [12]

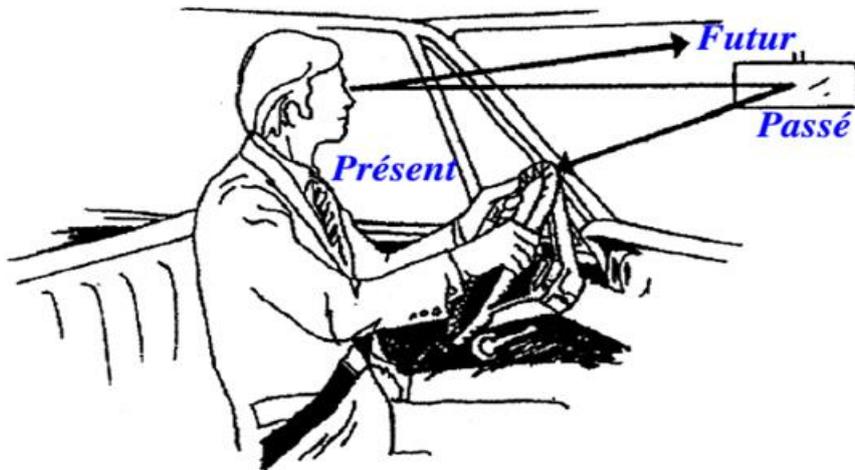
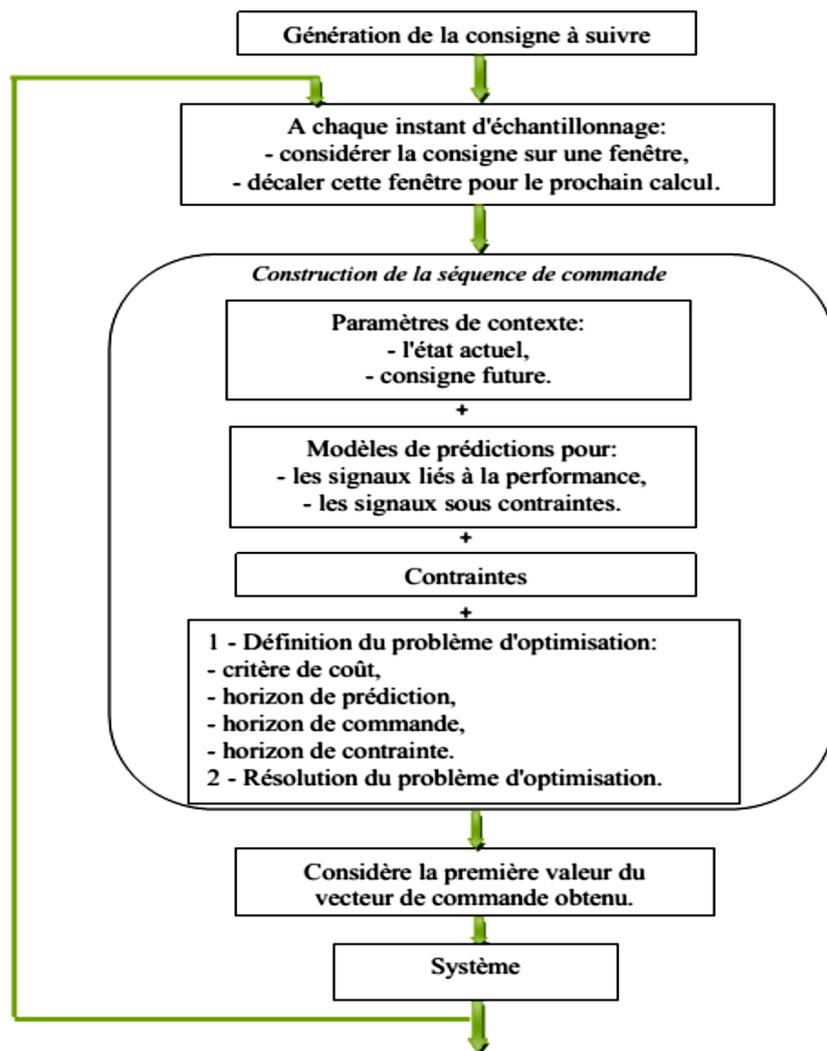


Figure II-1: Philosophie de la commande prédictive. [16]

L'organigramme II-1 résume le principe de la commande prédictive dans le cas général d'un problème de commande optimale sous contraintes sur un horizon glissant.



Organigramme II-1: Schéma de principe de la commande prédictive [19]

II.3 Eléments d'une commande prédictive :

Tous les algorithmes de la commande prédictive possèdent les mêmes éléments figure II-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.
- 3- L'algorithme d'optimisation (pour déterminer la séquence de commande).

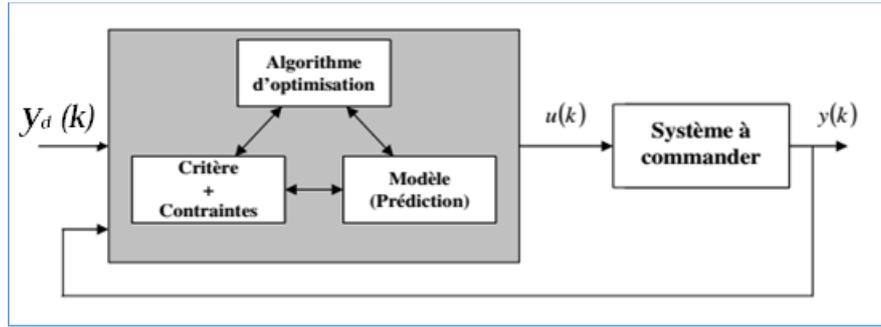


Figure II-2: Stratégie de commande prédictive [15]

Pour l'implémentation de la stratégie prédictive, la structure de base de la figure II- 2 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. [14]

II.4 Stratégie générale de la commande prédictive :

De manière générale, la loi de commande prédictive est obtenue à partir de la méthodologie suivante :

1. Prédire les sorties futures du processus sur l'horizon de prédiction défini, en utilisant le modèle de prédiction. On dénote $y(t+k/t), k=0.....N$, les sorties prédites et par N l'horizon de prédiction. Ces sorties sont dépendantes des valeurs de sorties et d'entrées du processus à commander connues jusqu'au temps t .
2. Calculer la séquence de signaux de commande, dénotée par $u(t+k/t), k=0.....N-1$, en minimisant un critère de performance afin de mener la sortie du processus vers une sortie de référence dénotée par $w(t+k/t), k=0.....N$. D'habitude le critère de performance à minimiser est un compromis entre une fonction quadratique des erreurs entre $y(t+k/t)$ et $w(t+k/t)$ et un coût de l'effort de commande. Par ailleurs, la minimisation d'une telle fonction peut être soumise à des contraintes sur l'état et plus généralement à des contraintes sur la commande.

3. Le signal de commande $u(t / t)$ est envoyé au processus tandis que les autres signaux de commande sont oubliés. Au temps $t + 1$ on acquiert la sortie réelle $y(t + 1)$ et on recommence au premier. [14]

La figure II.3 illustre cette méthodologie et sa mise en œuvre utilise la structure de base montrée dans la figure II.4. Les deux boucles fondamentales à remarquer sur cette figure sont le modèle et l'optimiseur. Le modèle doit être capable de capturer la dynamique du processus, de prédire les sorties futures de manière précise et sa mise en œuvre doit être facile, l'optimiseur fournir les actions de commande. En présence de contrainte, la solution est obtenue via des algorithmes itératifs, avec plus de temps de calcul évidemment. [14]

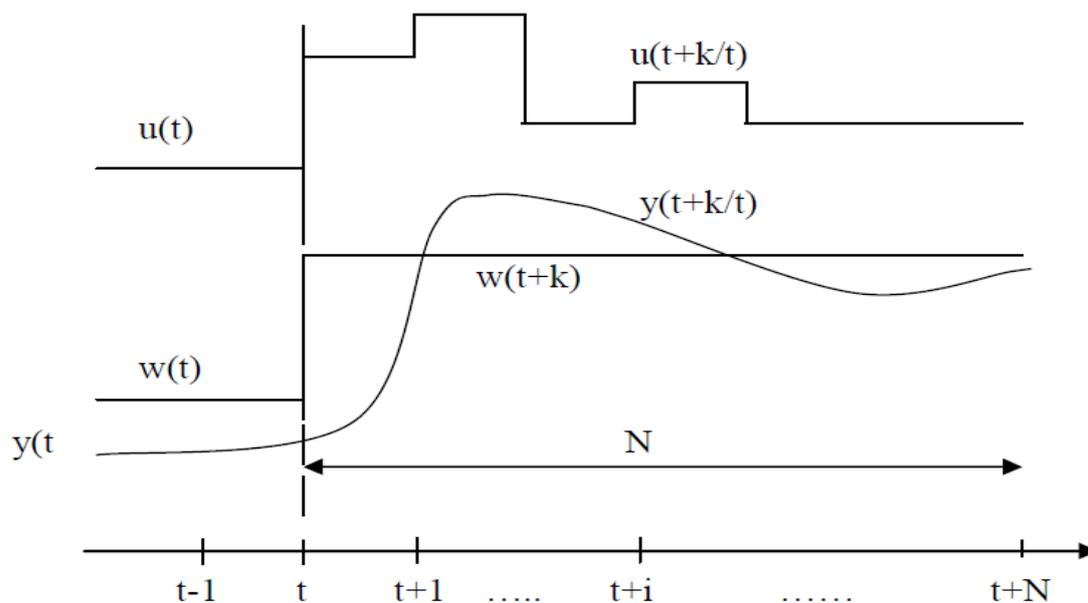


Figure II-3: La méthodologie du MPC [13]

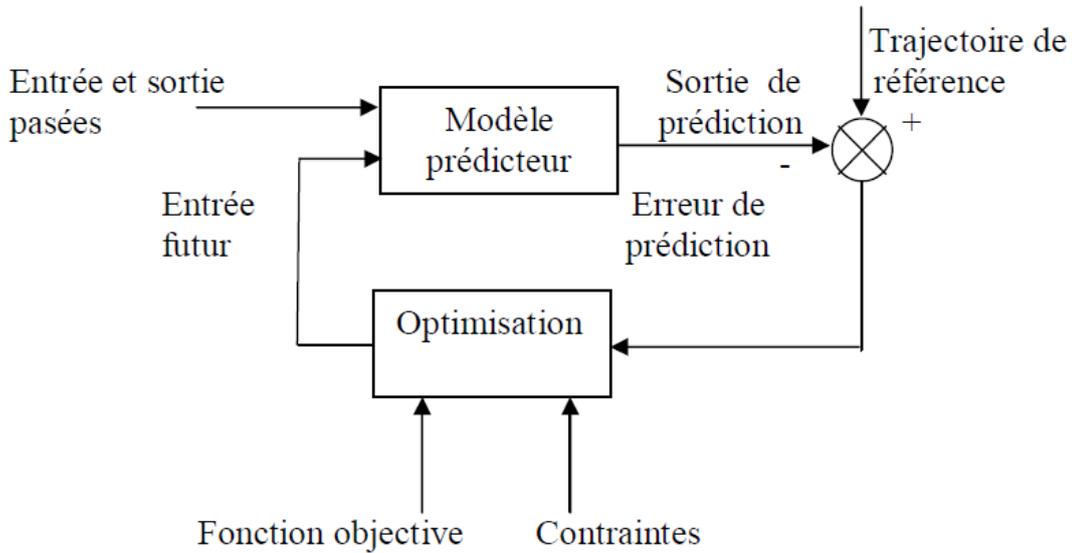


Figure II-4: Le schéma fonctionnel de la structure de base des algorithmes MPC [13]

II.5 Modèle du système :

Le modèle joue un rôle décisif dans le calcul de la commande. Il doit reproduire avec une exactitude suffisante les caractéristiques dynamiques du processus à des futurs moments du temps $\{y(k+i/k)\}$ en se servant des valeurs passées de la commande, de la sortie et des valeurs optimales de la commande future $\{u(k+i/k)\}$.

Les différentes stratégies du MPC emploient différents modèles pour représenter la relation entre la sortie et l'entrée du système. Parmi les signaux d'entrée on a les variables manipulées (ou commande), les perturbations mesurables qui peuvent être "traitées" par compensation par « anticipation » ("feedforward"). De plus, doivent être prise en considération les composantes non considérées par le modèle du système, ce qui inclut l'effet des entrées non mesurables, des bruits et des erreurs de modélisation. Ainsi, le modèle peut être divisé en deux parties : le modèle du processus et le modèle des perturbations. Les prédictions de la sortie seront en fonction des deux. [13]

II.5.1 Modèle du processus :

Dans l'approche classique de la commande prédictive toute forme de modélisation, et le plus souvent linéaire, est utilisée. La réponse impulsionnelle ou celle à un échelon, sont les plus usitées, mais existent aussi les représentations par fonction de transfert et par formalisme d'état. Donnons une vision rapide de ces types de modélisation.

II.5.1.1 Réponse impulsionnelle :

Elle apparaît dans l'algorithme MAC et dans les cas spéciaux de GPC et d'EPSAC, notamment pour les systèmes stables. Le modèle (tronqué) à utiliser pour la prédiction, est celui obtenu de la réponse impulsionnelle du système :

$$y(k + i|k) = \sum_{j=1}^N h_j u(k + i - j|k) \quad (II-1)$$

$y(k+i/k)$ est la prédiction de la sortie en $k+i$ étant donnée sa connaissance en k , $u(k+i-j/k)$ est l'entrée en $k+i-j$, h_j sont les valeurs de la sortie à chaque période d'échantillonnage quand on met à l'entrée un signal impulsionnel d'amplitude 1.

Un inconvénient de ce type de modélisation est le nombre élevé de paramètres nécessaires pour une précision appropriée. Habituellement N a une valeur comprise entre 40 et 50. Néanmoins c'est le modèle le plus appliqué dans l'industrie peut-être parce qu'il est tout à fait intuitif et compréhensible.

Un grand avantage pour utiliser ce modèle est qu'il n'a pas besoin d'information à priori et que l'identification est simple. De plus des dynamiques complexes telles que celles à phase non minimale ou en présence de retards considérables, sont facilement pris en compte.

II.5.1.2 Réponse indicielle :

Elle est utilisée dans l'algorithme DMC, et ce cas est assez semblable au précédent à la différence près que le signal d'entrée est un échelon. A nouveau, le modèle tronqué, pour les systèmes stables, est utilisé pour la prédiction de la sortie. Il se présente sous la forme :

$$y(k + i|k) = \sum_{j=1}^N g_j \Delta u(k + i - j|k) \quad (II-2)$$

$y(k+i/k)$ est la prédiction de la sortie en $k+i$ étant donnée sa connaissance en k , les g_j sont les paramètres obtenus à la sortie du système lorsqu'on applique un échelon à l'entrée, et $\Delta u(k) = \{u(k) - u(k-1)\}$ les changements de l'entrée du système. Le modèle a les mêmes avantages et inconvénients que ceux expliqués précédemment.

II.5.1.3 Fonction de transfert :

Utilisée dans GPC, UPC, EPSAC, EHAC, MUSMAR et MURHAC. Le modèle de prédiction est :

$$y(k + i|k) = \frac{B(Z^{-1})}{A(Z^{-1})} u(k + i|k) \quad (II-3)$$

$$\begin{cases} A(Z^{-1}) = 1 + a_1 Z^{-1} + a_2 Z^{-2} + \dots + a_{na} Z^{-na} \\ B(Z^{-1}) = b_0 Z^{-1} + b_1 Z^{-2} + \dots + b_{nb} Z^{-nb} \end{cases} \quad (II-4)$$

Cette représentation est validée également pour des processus instables et elle a l'avantage d'avoir besoin de peu de paramètres, néanmoins elle nécessite une connaissance a priori du processus, particulièrement pour déterminer l'ordre des polynômes $A(z^{-1})$ et $B(z^{-1})$.

II.5.1.4 L'espace des états:

Utilisé dans PFC, il a la représentation suivante :

$$\begin{cases} x(k + 1) = Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (II-5)$$

Où $x(k)$ est le vecteur d'état, $u(k)$ le vecteur des entrées et $y(k)$ des sorties, A , B , et C sont les matrices du système, de l'entrée et de la sortie respectivement. Alors la prédiction de la sortie s'écrit :

$$y(k + i|k) = C \left[A^i x(k) + \sum_{j=1}^i A^{i-j} B u(k + i - j|k) \right] \quad (II-6)$$

Ce modèle a l'avantage de pouvoir être utilisé pour les systèmes multi variables. Son utilisation présuppose la mesure de l'état global ce qui n'est pas toujours possible, dans ce cas un observateur d'états doit être envisagé. [13]

II.5.2 Modèle de perturbation :

La sélection du modèle à utiliser pour représenter les perturbations affectant le système est aussi importante que la sélection du modèle du processus. Le modèle le plus utilisé est le modèle autorégressif de moyenne mobile intégré (CARIMA), où les perturbations qui sont la différence entre la sortie mesurée et calculée par le modèle, sont données par :

$$\eta(t) = \frac{C(Z^{-1})}{D(Z^{-1})} e(t) \quad (II-7)$$

Où le polynôme $C(Z^{-1})$ peut être égal à un, le polynôme $D(Z^{-1})$ est un intégrateur

$\Delta = 1+Z^{-1}$ et $e(t)$ est un bruit blanc de moyenne nulle, ce modèle est utilisé dans GPC, EPSAC, EHAC et UPC, et avec de petites variations dans les autres méthodes. Il est possible de noter que l'inclusion de l'intégrateur élimine l'erreur stationnaire. Le filtre $C(Z^{-1})/D(Z^{-1})$ peut également être choisi de sorte à éliminer les perturbations de fréquence définie. [13]

II.5.3 Fonction objectif et obtention de la loi de commande :

Les divers algorithmes MPC proposent différentes fonctions de coût pour obtenir la loi de commande. L'objectif principal consiste à faire en sorte que la sortie future pour l'horizon de prédiction considéré s'approche de la meilleure façon possible de la trajectoire de référence $\{w(k)\}$ tout, en même temps, pénalisant l'effort de commande $\{\Delta u(k)\}$ nécessaire. Une expression générale de la fonction objectif adaptée à cette tâche est donnée par :

$$j(N1, N2, Nu) = E \left\{ \sum_{i=N_1}^{N_2} \sigma(i) [y(k+i|k) - w(k+i|k)]^2 + \sum_{i=1}^{Nu-1} \lambda(i) [\Delta u(k+i|k)]^2 \right\} \quad (II-8)$$

II.5.4 Les paramètres :

N_1 et N_2 définissent l'intervalle de temps où l'on désire que la sortie se rapproche de la référence.

N_2 : représente l'horizon de commande maximal.

N_u : représente l'horizon de commande.

$N_u \leq N_2$ et $\Delta(k+i|k) = 0$ pour $i \leq N_u$

$\sigma(i) \geq 0$ et $\lambda(i) > 0$ sont les matrices de pondération.

Il n'est pas nécessaire de commander immédiatement la pénalisation des déviations des sorties prédites $(k+i|k)$ de la trajectoire de référence $(k+i|k)$ si $(N_1 > 1)$ car il peut exister un retard entre l'application de la commande $u(t)$ et de la réponse du système à celle-ci.

La forme de l'équation de coût implique que le vecteur d'erreur $(k+i|k) - (k+i|k)$ est pénalisé à chaque point i dans l'intervalle $N_1 \leq i \leq N_2$. [20]

II.5.5 Trajectoire de référence :

Un des grands avantages des commandes prédictives est que, si l'on connaît l'évolution future de la trajectoire de référence, le système peut commencer à répondre avant que le changement ne soit détecté.

L'évolution future de la référence est bien connue dans beaucoup d'applications, comme en robotique. Dans la plupart des méthodes habituelles, on utilise souvent une trajectoire de référence qui n'est pas nécessairement égale à la vraie référence.

Par exemple, on peut approcher celle-ci au moyen d'un système du premier ordre :

$$w(k + i) = \alpha w(k + i - 1) + (1 - \alpha)r(k + i) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (II-9)$$

Où α est un paramètre contenu entre 0 et 1 qui constitue une valeur réglable qui influencera la réponse dynamique du système (ainsi, α proche de 1 conduira à une réponse "douce").

II.5.6 Contraintes :

Dans la pratique, les processus sont sujets à des contraintes qui doivent, bien sûr, être prises en compte dans le problème d'optimisation afin d'obtenir des commandes admissibles.

Les techniques de la commande MPC intègrent les contraintes pendant la phase de synthèse et d'implantation du contrôleur, permettant à l'ingénieur de présenter les contraintes d'une façon directe de sorte que l'algorithme trouve automatiquement la meilleure solution admissible.

Le système de commande, particulièrement dans le cas de la commande prédictive avec des grands horizons de prédiction, doit prévoir la violation des restrictions et corriger avec une forme appropriée. Bien que les restrictions à l'entrée et à la sortie du processus se traitent de même manière, les implications de chaque type de contraintes sont différentes.

Les restrictions en sortie sont fondamentalement dues à des raisons de sécurité opérationnelles, et doivent être contrôlées à l'avance puisqu'elles peuvent endommager les équipements physiques et causer des pertes dans la production. Dans le cas des variables d'entrée, elles peuvent toujours être bornées dans leurs limites permises en fonction des mécanismes de saturation.

En pratique il est habituel d'employer le GPC standard pour calculer le signal $u(k)$, sans contraintes, puis, de le saturer à ses limites permises. Cette façon de procéder ne garantit pas que soit obtenue l'optimalité quand les restrictions sont violées par la solution sans contraintes. La proposition principale du GPC, qui est d'appliquer la meilleure action de commande possible en vue de minimiser la fonction objective, ne sera pas atteinte de cette façon.

Afin d'illustrer ce fait, et pour considérer le cas de la violation des restrictions dans l'amplitude du signal d'entrée est représenté sur la figure II.5 un problème de GPC avec vecteur de commande de valeur 2. Sont tracées les courbes de valeur constante d'une fonction objectif quadratique qui dépend de deux variables $\{u_1, u_2\}$. [14]

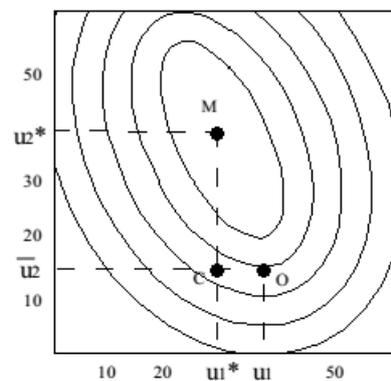


Figure II-5: Signal de commande avec des restrictions [14]

Si les restrictions n'existent pas, la solution optimale de coût minimum est clairement donnée par $\{u_1^*, u_2^*\}$.

Si l'action de commande u_2 a une limite supérieure \bar{u}_2 , la solution appliquée par une stratégie ne prenant pas en compte les contraintes de minimisation sera $\{u_1^*, u_2\}$ qui correspond au point C de la figure.

Si l'action u_2 de commande a une limite supérieure \bar{u}_2 et si les contraintes sont considérées dans l'optimisation, la solution optimale correspond au point O dans la figure II-6, u_2 se maintient à sa valeur maximum \bar{u}_2 mais u_1 est déplacé de sa valeur initiale u_1^* pour compenser la saturation de u_2 .

Le fait de ne pas considérer les restrictions dans les variables manipulables peut causer une détérioration de la fonction objective et conduire à un comportement peu désirable du système commandé. [14]

II.6 La Commande Prédictive Fonctionnelle (PFC) :

Cette méthode introduite par J.Richalet et al applique la même philosophie que la commande prédictive généralisée de D.W. Clarke et al.

Néanmoins, la mise en œuvre de cette philosophie commune s'avère relativement différente, par les notions utilisées et la mise en équations. Cette méthode repose sur quatre principes essentiels : [15]

- Modèle interne.
- Trajectoire de référence.
- Structuration de la variable manipulée.
- Principe de l'horizon fuyant.

II.6.1 Modèle interne :

Tout algorithme MPC nécessite un modèle interne pour prédire le comportement du système, par prédiction de la (des) sortie(s) du procédé à commander. Le modèle interne doit être formulé sous forme discrète, pour pouvoir être embarqué dans un calculateur. Toutefois, sa composition n'est pas restreinte à une formulation unique. Le modèle interne peut être : linéaire, non-linéaire, sous forme d'espace d'état, fonction de transfert, basé sur des principes de physiques fondamentales, numériques, boîte noire . . . etc. Dans ce lot, deux familles de modèles émergent :

- **Modèles indépendants**: la sortie du modèle est calculée avec les entrées passées et présentes du modèle.
- **Modèles recalés**: la sortie calculée, utilisant soit les valeurs passées des entrées et sorties du procédé, ou des estimations des variables d'état du procédé.

II.6.2 Trajectoire de référence :

Une trajectoire de référence désirée est définie à partir de la valeur de sortie mesurée du procédé.

A la différence d'une commande classique, le but de la commande n'est pas d'égaliser la consigne de commande, mais une trajectoire qui emmène la sortie à cette consigne, appelée trajectoire de référence. Le concept est aussi connu sous le nom de comportement en boucle fermée. Cependant, la trajectoire de référence peut être variable par rapport au temps où on a l'état du procédé, et est par conséquent, sujette à toutes sortes de spécifications variant d'un algorithme MPC à l'autre.

Il est essentiel de choisir comme trajectoire de référence un premier ordre afin de rallier la consigne en douceur, selon la relation :

$$C(t + j) - y_r(t + j) = \lambda^j [C(t) - y_p(t)] \quad (II-10)$$

Avec C , y_r , y_p sont la consigne, la trajectoire de référence, la sortie réelle du processus, respectivement. Ainsi que la variable λ est définie par $\lambda = \exp(-3T_e / T_r)$, où T_e est la période d'échantillonnage et T_r représente le temps de réponse de la boucle fermée. On préfère parler de points de coïncidence, plutôt que d'horizons de prédiction. En ces points de coïncidence, la sortie prédite du système est supposée coïncider avec la trajectoire de référence. Il n'existe aucune indication précise pour fixer ces points particuliers. Pour cela, on introduit la notion d'horizon de coïncidence (H_1 , H_2) il ne s'agit pas en effet de rechercher une coïncidence à tous les instants futurs, mais seulement sur un certain nombre de point entre H_1 et H_2 . {Voir Figure II-6}.

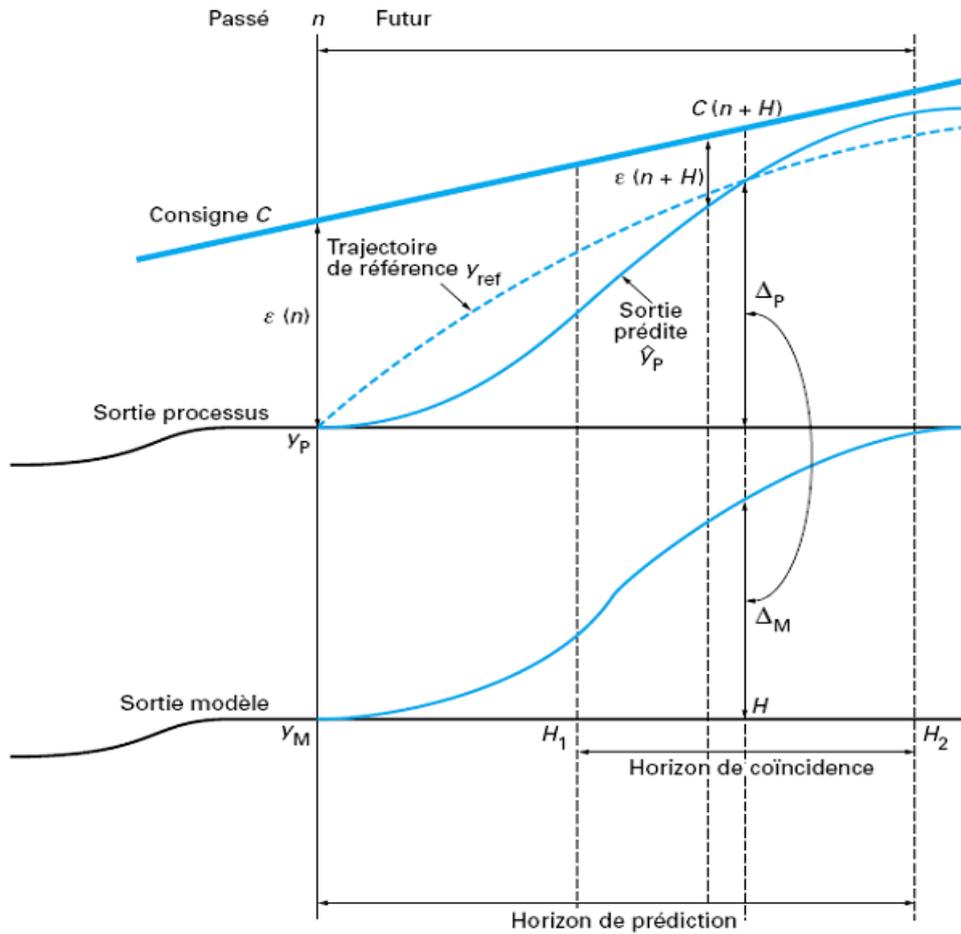


Figure II-6: Trajectoire de référence et horizon de prédiction [15]

La dynamique de la trajectoire de référence peut éventuellement être variable dans le temps ou suivant l'état du processus. Elle est le facteur qui va régler la dynamique en boucle fermée avec une grande simplicité, directement interprétable par n'importe quel régulateur.

La méthode de commande consiste alors à transférer l'incrément de sortie désirée du processus, Δ_p spécifiée par la trajectoire de référence, vers un modèle mathématique qui va permettre de calculer une commande qui réalise le même incrément de sortie du modèle.

$$\Delta_m = \Delta_p \tag{II-11}$$

Ce transfert de spécification est un élément clé de la méthode. La trajectoire de référence est prise exponentielle du décrétement, elle relie le point courant de la sortie à la consigne $C(k)$. A un point de coïncidence $H \in [H_1, H_2]$ on a :

$$y_r(k + H) = y_p(k + H) \tag{II-12}$$

Prenant par exemple le cas d'une consigne constante C'est à dire $C(k)=C_0$, on aboutit à la formulation :

$$\Delta p (C_0 - y_p(k)) (1 - \lambda h) = \Delta m = y_m(k + H) - y_m(k) \quad (II-13)$$

II.6.3 Structuration de la variable manipulée :

La commande future est définie à partir d'une combinaison linéaire d'un ensemble de n_b fonctions uB_k , dénommées fonctions de bases :

$$u(n + 1) = \sum_1^{n_b} u_k(n) uB_k(i) \quad (II-14)$$

La détermination des coefficients inconnus n , s'effectue en minimisant un critère quadratique lié à l'écart entre la sortie prédite \hat{y} du processus et la trajectoire de référence en un ensemble n_h de points ($n_h \geq n_b$) de coïncidences :

$$j_k = \sum_1^{n_h} [y^r(k + h_j) - \hat{y}(k + h_j)]^2 \quad (II-15)$$

Chaque entrée de base uB_k induit une sortie de base SB_k connue à priori pour un modèle donné, un exemple est donné par la figure II-7.

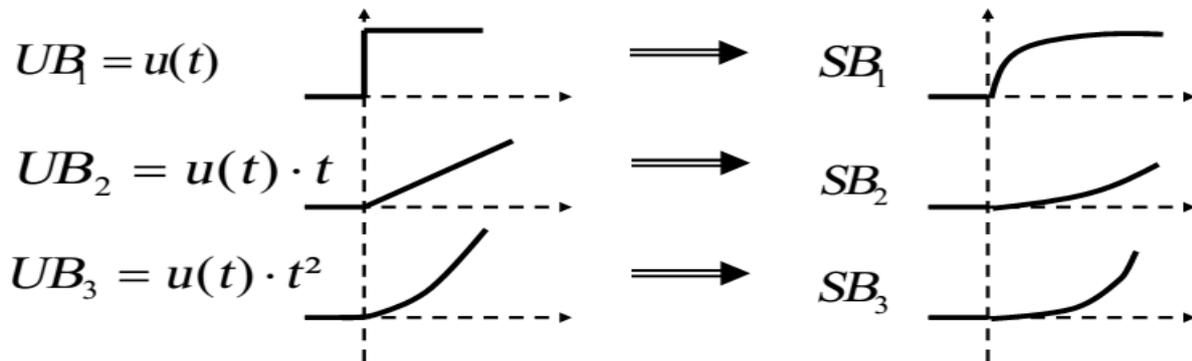


Figure II-7: Entrées et sorties de base [15]

II.6.4 Principe de l'horizon fuyant :

Seul le 1^{er} élément de la séquence optimale précédente est appliqué sur le système. Tous les autres éléments peuvent être omis car à la période d'échantillonnage suivante, les séquences sont décalées, une nouvelle sortie est mesurée et la procédure complète est répétée. Ce procédé repose sur le principe de l'horizon fuyant.

$$u_k = \sum_{j=1}^{n_b} u_{j,k} u_B(0) \quad (II-16)$$

Le 1^{er} élément de la séquence « optimale » précédente est appliqué sur le système

- Les séquences sont décalées.
- Une nouvelle sortie est mesurée.
- La procédure complète est répétée. [15]

II.7 Avantages de la commande prédictive :

- ❖ Facilité de mise en œuvre (bonnes performances et simplicités d'implémentation)
- ❖ Effet anticipatif : par utilisation explicite de la trajectoire à suivre dans le futur
- ❖ Technique bien adaptée pour :
 - Commande des systèmes complexes : systèmes multi-variables, systèmes soumis aux contraintes, systèmes non linéaires, systèmes hybrides, systèmes à retard, systèmes multi-agent.
 - 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.
 - Une grande application dans le milieu industriel :
 - Robots, machines-outils, industrie chimique ou biochimie, aéronautique, thermique, l'industrie du ciment, bâtiment intelligent...
 - Exemple : régulation de la vitesse des ascenseurs de la tour Eiffel.

II.8 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons porté une étude sur le modèle de la commande prédictive (MPC). Nous avons donné les concepts de base et le principe de la commande prédictive.

A large, red, stylized bracket with rounded ends, positioned vertically on the page. It frames the central text, with its top and bottom curves facing inward and its left and right ends facing outward.

Chapitre III

*Application de la commande
prédictive au contrôle de
vitesse du MCC*

Chapitre III : Application de la commande prédictive au contrôle de vitesse du MCC

III.1 Introduction :

Dans la pratique industrielle, c'est probablement l'absence d'outils de commande prédictive dans la plupart des systèmes de contrôle courants, la méconnaissance de la technique, et le manque de connaissance en contrôle de procédés, des personnes responsables de leur programmation et de leur entretien qui représente le plus grand inconvénient de la commande prédictive par rapport à la commande PID. [21]

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.

III.2 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 III.1.

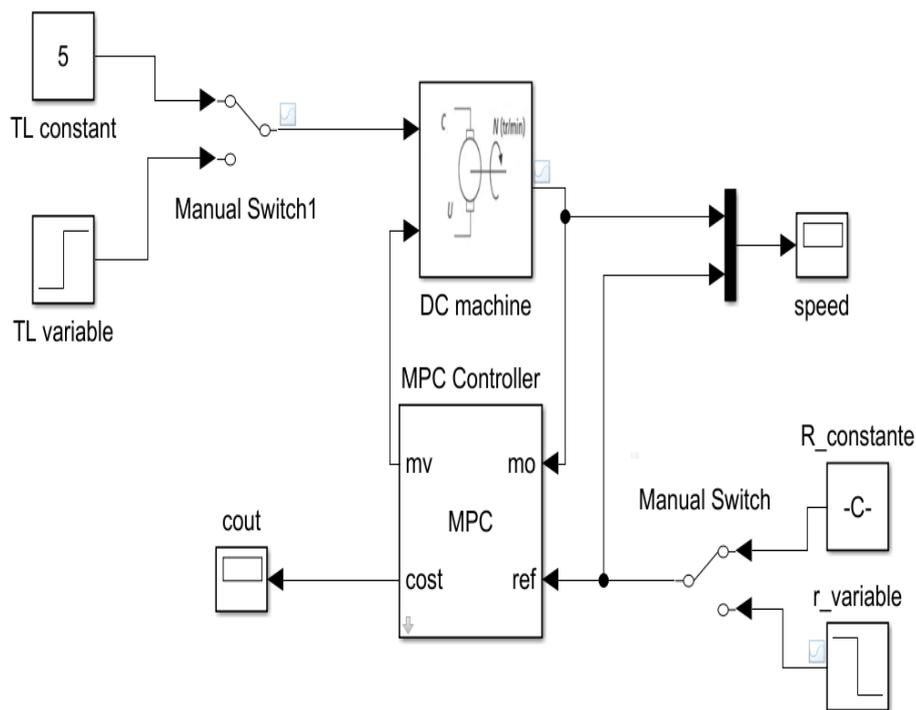


Figure III-1: Modèle du contrôle MPC appliqué à la MCC sous SIMULINK

Le modelé interne de la MCC est présenté à la figure III-2, cette machine délivre dans les conditions standards une puissance de 7.8 KW, ces paramètres sont résumés dans le tableau III-1. [9]

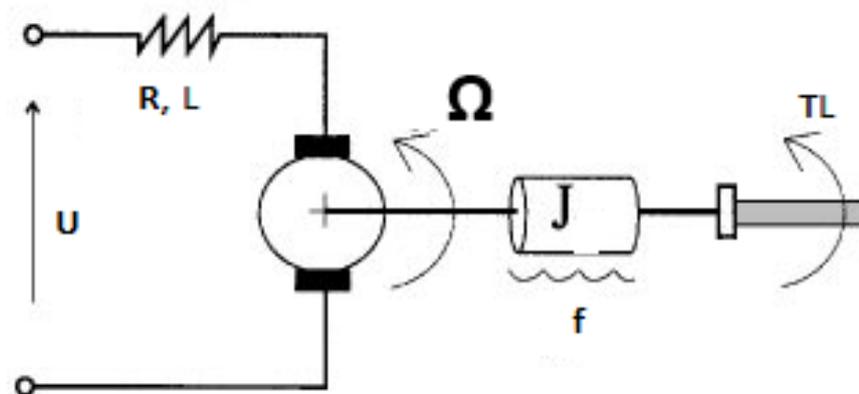


Figure III-2 : LA MCC à excitation séparée

Le modèle de la MCC sous SIMULINK est présenté à la figure III-3

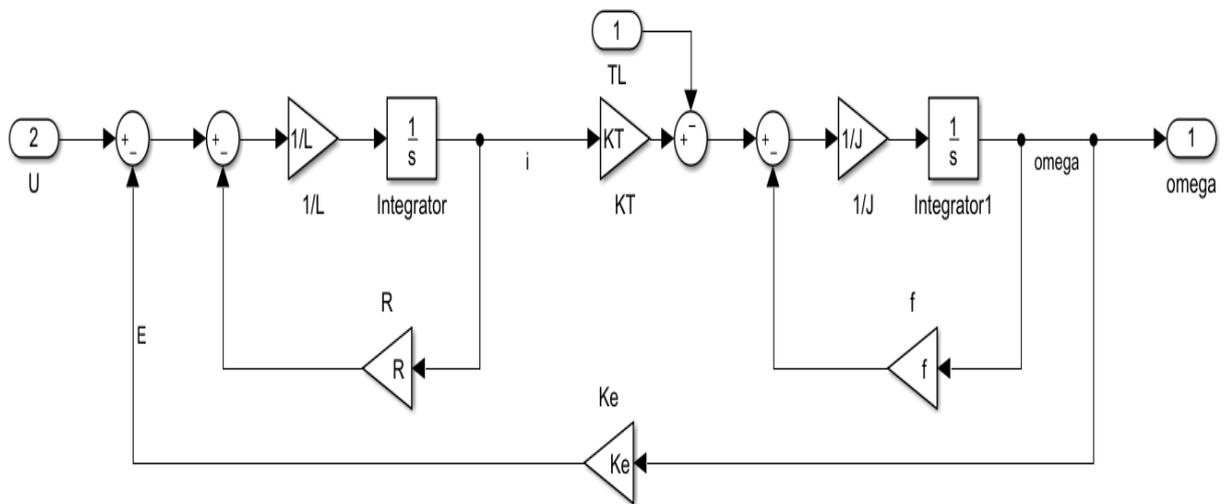


Figure III-3 : Modélisation de La MCC sous SIMULINK

Le bloc qui réalise le contrôle prédictif sous SIMULINK est le MPC contrôleur figure III-1. La configuration des paramètres de ce bloc est illustrée à la figure III-4. Le programme qui régit le contrôleur MPC1 est donné dans l'annexe.

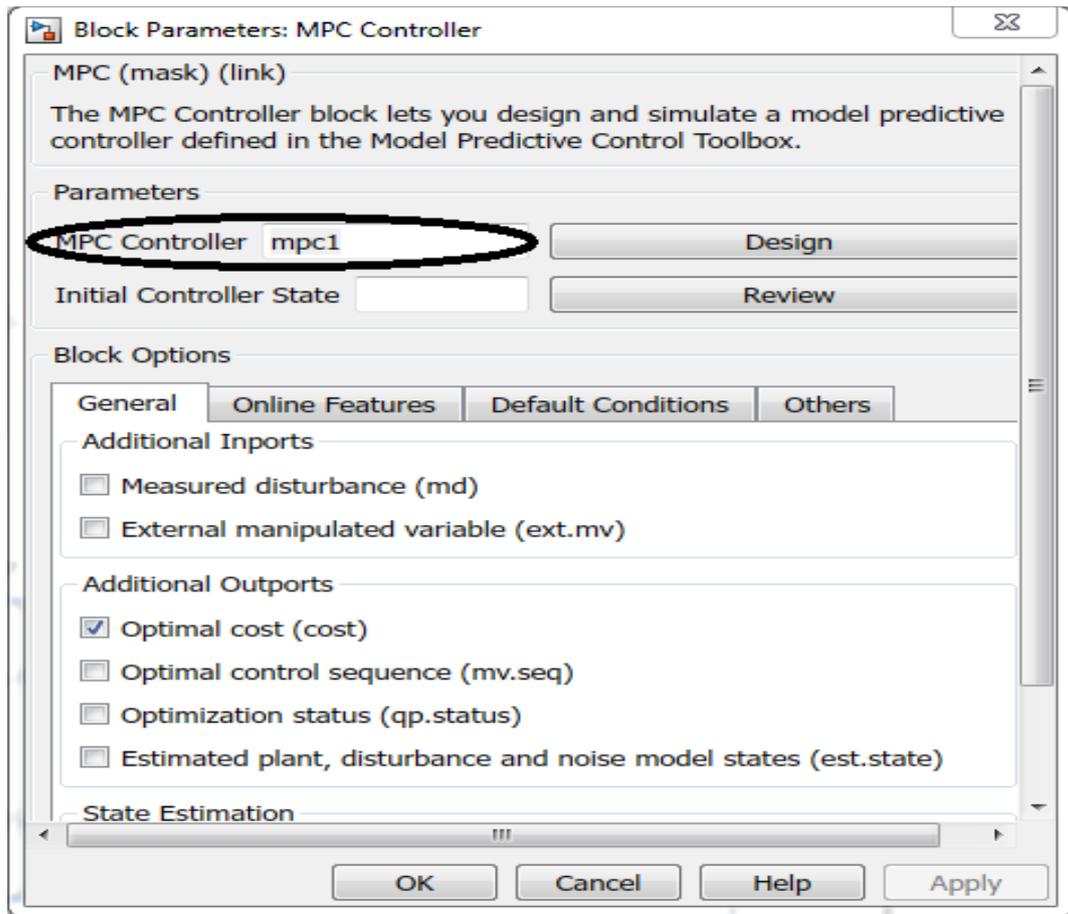


Figure III-4: Paramétrage du contrôleur prédictif

Dans la conception du régulateur, on propose deux types de contrôle. La première influence le système de telle sorte qu'il se comporte comme un système du deuxième ordre, et le deuxième impose au système un comportement de premier ordre figure III-5.

Notre choix s'est porté sur le premier contrôleur car il offre un comportement optimal avec un dépassement de 10%, et un temps de réponse de 0.4s qui est meilleur que le deuxième contrôleur.

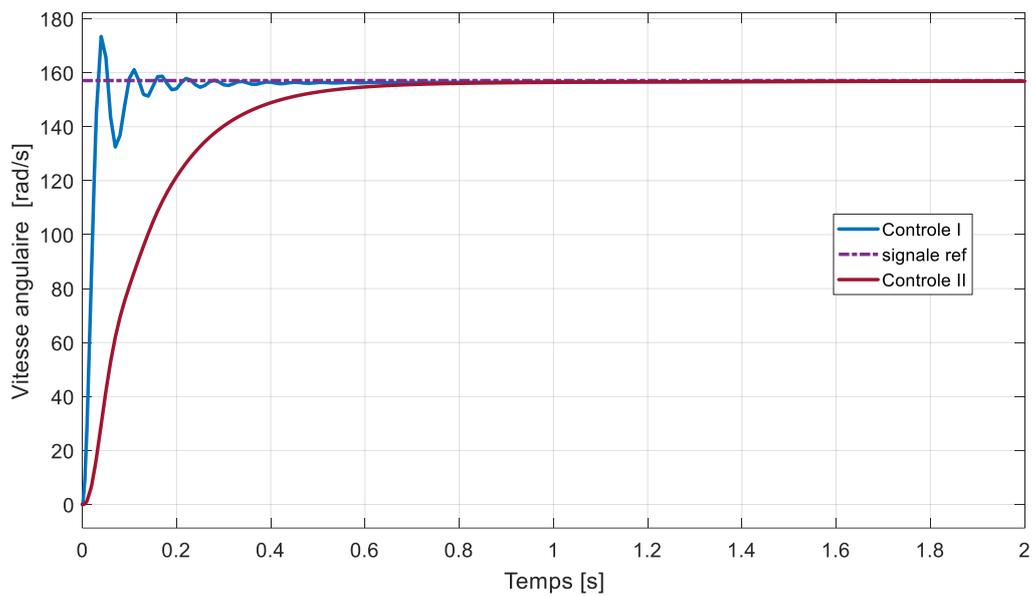


Figure III-5: Configuration du contrôleur

La figure III-6 montre l'allure de la vitesse imposée par le contrôleur MPC et la figure III-7 représente la commande qui va permettre ce comportement.

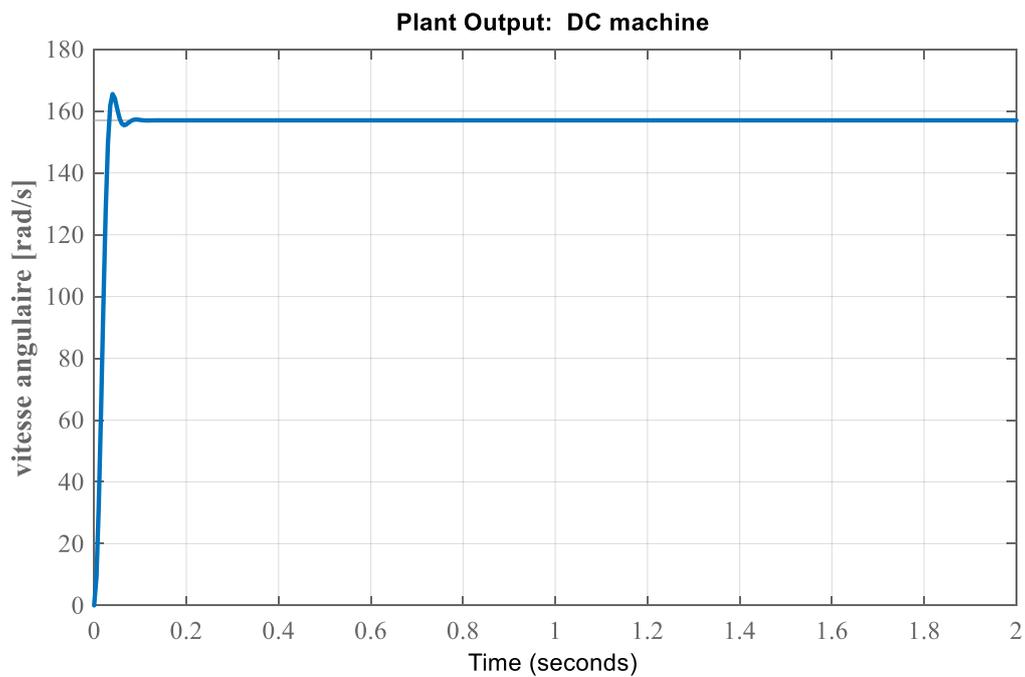


Figure III-6: Comportement temporelle de la vitesse

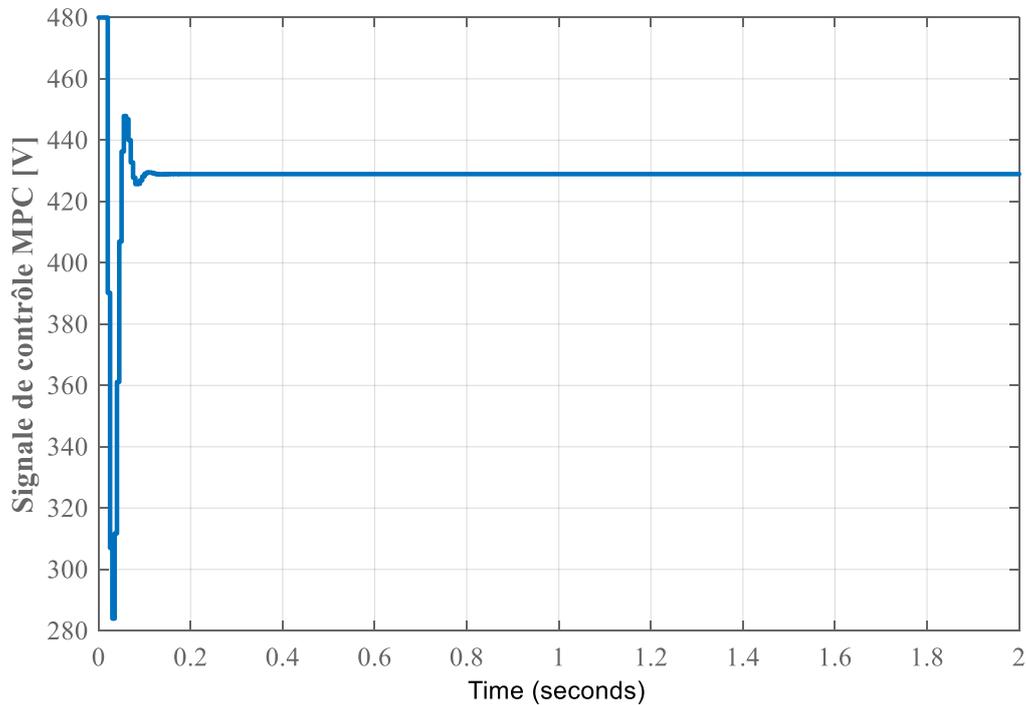


Figure III-7 : Contrôle qui assure la sortie déterminée

III.3 Test du système :

Ce système est testé par deux variations importantes :

III.3.1 Variation de consigne de vitesse :

Nous avons imposé une diminution de vitesse du moteur à partir de la troisième seconde figure III-8.

Nous voulons que notre moteur tourne à 157rad/s (valeur de référence), à la troisième seconde, une nouvelle consigne a été imposée de l'ordre de 130rad/s.

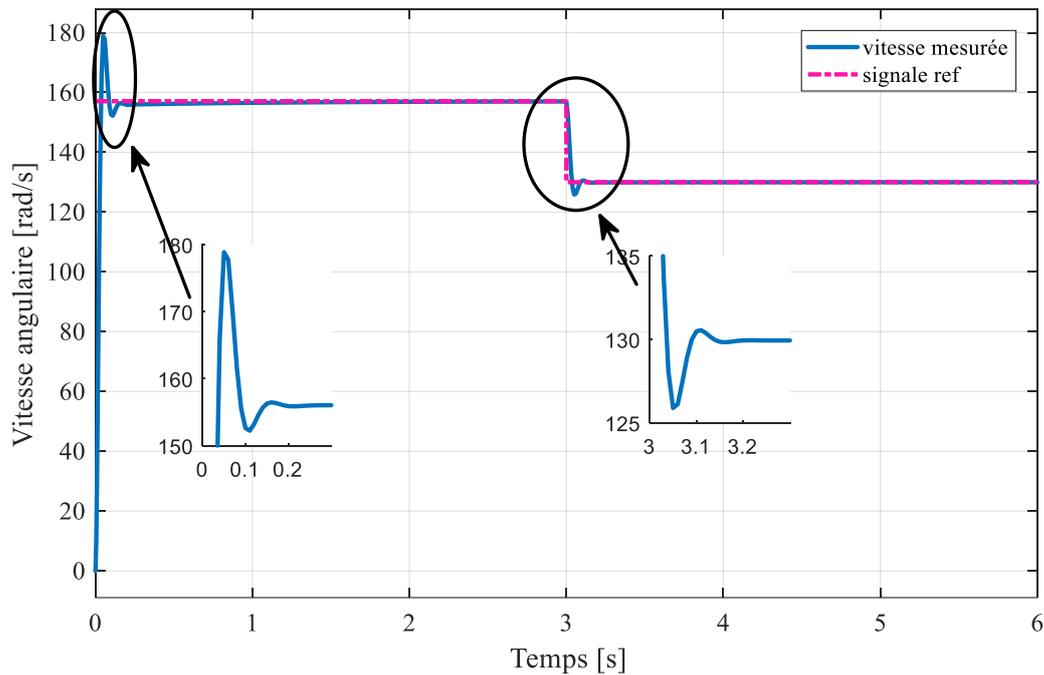


Figure III-8: Allure de la vitesse face à une variation de consigne

Interprétation :

On remarque qu'au démarrage du moteur, il y a une légère perturbation de 0.15s avec un dépassement maximal de 14% (régime transitoire) avant que le signal réel en bleu suit la valeur de référence en rouge (régime permanent).

Après le changement de consigne à la troisième seconde, il y a une légère perturbation de 0.15s avec un dépassement maximal de 3.8% dû au changement brusque de la consigne avant que le signal réel en bleu suit la valeur de référence en rouge.

III.3.2 Variation de couple résistant :

En premier lieu, le couple résistant est maintenu à 5Nm, à la troisième seconde, on a augmenté le couple à 10Nm.

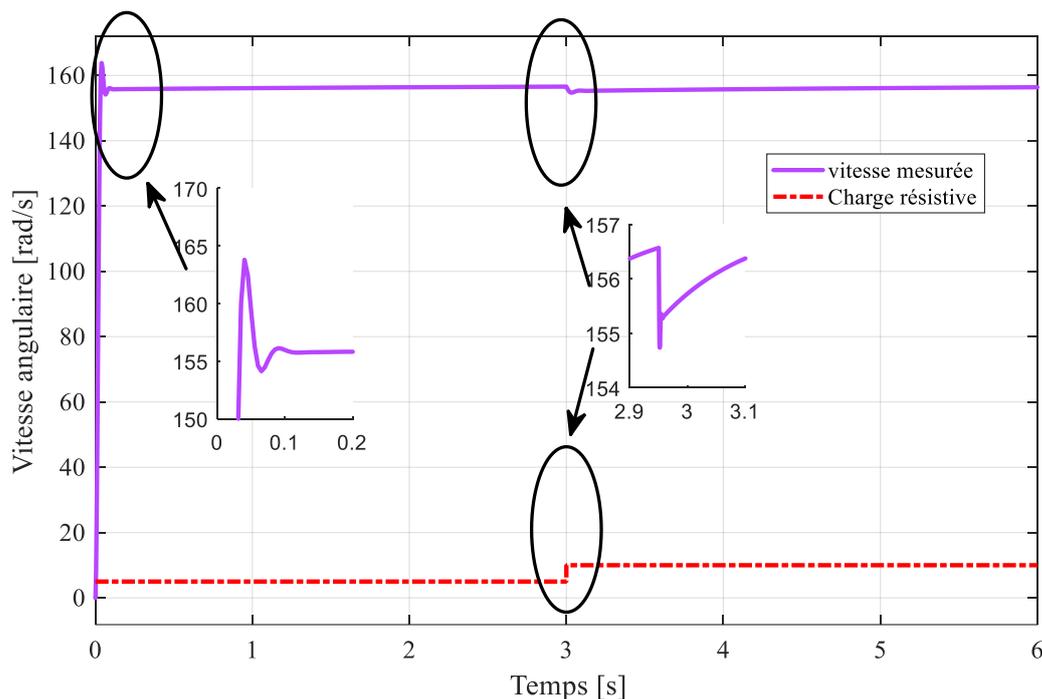


Figure III-9: Allure de la vitesse face à une variation de la charge TL

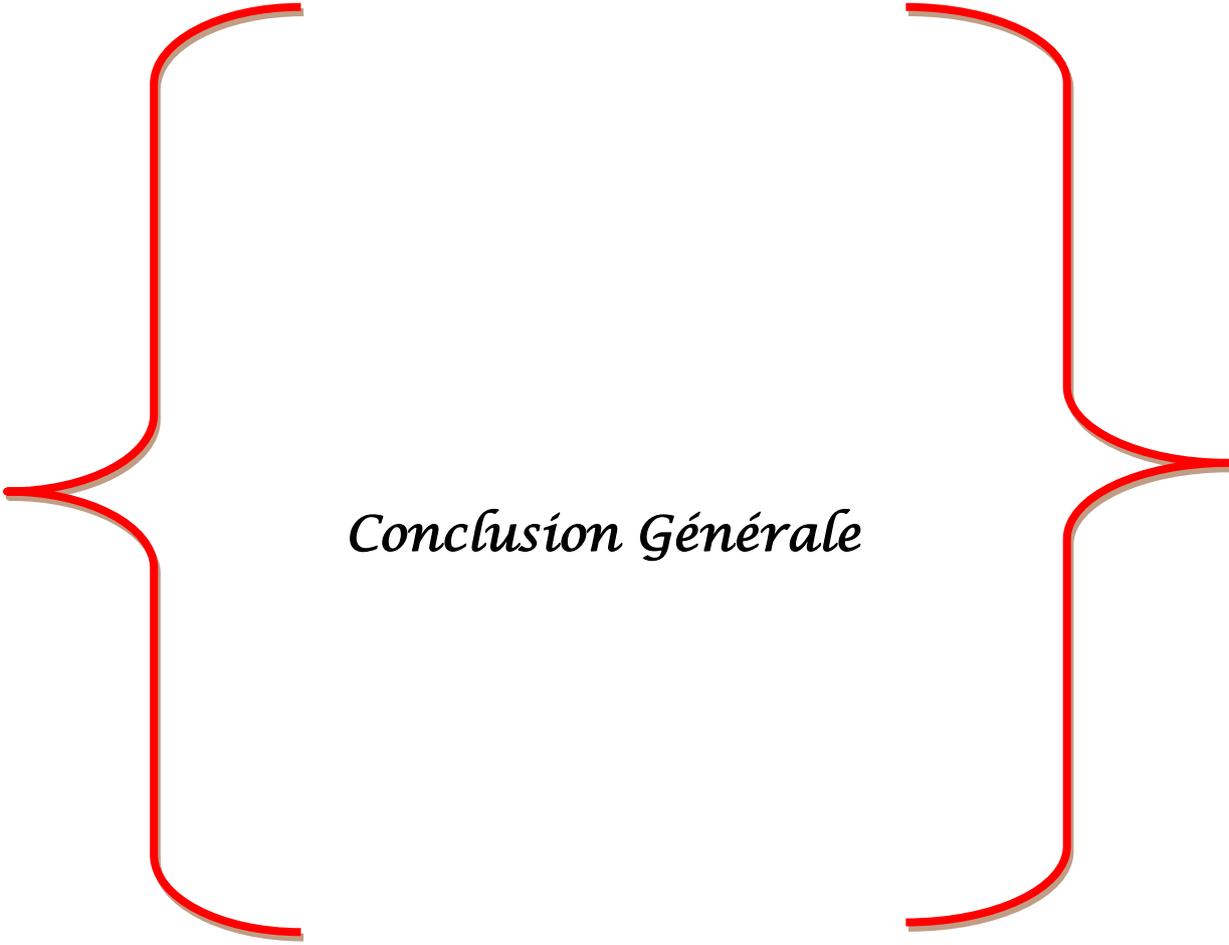
Interprétation :

On remarque qu'au démarrage du moteur, il y a une légère perturbation de 0.05s avec un dépassement maximal de 4.46% avant stabilisation de la vitesse.

Après augmentation de la charge résistive, nous remarquons une légère diminution de vitesse. Le signal de référence étant maintenu à 157rad/s, cette diminution de vitesse (signal réel) entraîne donc un déphasage entre les deux signaux. Le signal réel tente de rattraper son retard vis à vis du signal de référence d'où l'allure oblique progressive de la vitesse quand on zoome sur le signal à la troisième seconde.

III.4 Conclusion

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



Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans ce mémoire, on a étudié la régulation de vitesse d'un moteur électrique à courant continu à excitation séparée par le contrôle du modèle prédictif (MPC). Cette méthode conduit à des lois de commande optimale, donc la garantie de stabilité du système linéaire bouclé est obtenue de façon optimale.

Le travail présenté porte sur la stabilisation par la commande prédictive d'un système linéaire. La méthode proposée est basée sur la minimisation d'un critère quadratique.

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.

Les techniques prédictives permettent de satisfaire des spécifications très contraignantes, en termes de stabilité et précision.

Tous les avantages listés ci-dessus font que ces techniques prédictives sont implantées dans de nombreuses applications industrielles, dans des domaines très variés, mais de préférence lorsque la trajectoire à suivre dans le futur est connue à l'avance, de façon à bénéficier pleinement de l'aspect anticipatif de cette loi de commande.

Ce type de contrôle est une solution qui offre des bonnes performances, que ce soit, au niveau de la précision, du temps de réaction, du dépassement, ou de la stabilité.

Référence bibliographique

- [1] Bekkouche Charaf Eddine, «Étude et simulation d'un variateur de vitesse commande un moteur à courant continu», Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2016.
- [2] Lycée polyvalent Jean Monet « Etude des systèmes techniques », document de cours.
- [3] Physique Appliquée, terminale électrotechnique - collection R. Mérat et R. Moreau – édition Nathan technique 1994.
- [4] <https://www.rs-online.com/designspark/different-types-of-motors-and-their-use-fr>
- [5] Papio BAYALA, «formation continue Ingénieur électrotechniciens» , cour publier, Edition 2010.
- [6] <http://moteurindustrie.com/brushless/technique.html>
- [7] Physique appliquée, terminale génie électrotechnique - Delva, Leclercq, Trannoy – édition Hachette éducation 1994.
- [8] Dr.ing Adama Fahiri Sangare, « Etude d'un laboratoire virtuel de simulation des machine MCC »,2007.
- [9] ABB Automation Technology Products AB DC Motors S-721 70 Västerås Sweden, www.abb.com/motors&drives.
- [10] Nouala et cheikh MEZOUAR (commande numérique de la MCC) mémoire d'ingénieur de sidi bel abbes, 2009.
- [11] A. Ramdani, «Commande Prédictive Des Systèmes Dynamiques : Etude Comparative Avec Les Régulateurs Classiques», Mémoire De Magister, Université M'hamed Bougara-Boumerdes, 2013.
- [12] 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.
- [13] A. Benbrahim, « Commande Prédictive Généralisée D'une Machine Synchrone A Aimants Permanents», Mémoire De Magistère, Université De Batna, 2009.

- [14] M. C. LOZADA, " Sur les Modèle Flous Adaptatifs Dynamiques ", Thèse de doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse,
- [15] O. Bourebia, « Commande Prédictive Floue Des Systèmes Non Linéaires», Thèse De Doctorat, Université Mentouri De Constantine, 2011.
- [16] S. Meziane, « Commandes Adaptative Et Prédictive De La Machine Asynchrone », Thèse De Doctorat, Université De Constantine, 2009.
- [17] ITEEM1_02_mcc.
- [18] E. Granado, « Commande Prédictive A Base De Programmation Semi Définie », Thèse De Doctorat, Institut National Des Sciences Appliquées, Toulouse, France, 2004.
- [19] S. Aouaouda, «Modélisation Multimodèle Et Commande Prédictive D'une Station D'épuration », Thèse De Doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba (Ubma) ,2012.
- [20] E. G. MIGLIORE, " Commande Prédictive à Base de Programmation Semi Définie", thèse de doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2004.
- [21] J. Bouchard, « Commande Prédictive Basée Sur La Simulation Application A La Flottation En Colonne », Thèse De Doctorat, Université Laval Quebec, 2007.

ANNEXE

Le programme de la commande prédictive générée par MATLAB :

```
% create MPC controller object with sample time
mpc1 = mpc(plant_C, 0.005);
%% specify prediction horizon
mpc1.PredictionHorizon = 5;
%% specify control horizon
mpc1.ControlHorizon = 2;
%% specify nominal values for inputs and outputs
mpc1.Model.Nominal.U = 0;
mpc1.Model.Nominal.Y = 0;
%% specify constraints for MV and MV Rate
mpc1.MV(1).Min = 0;
mpc1.MV(1).Max = 480;
%% specify constraints for OV
mpc1.OV(1).Min = 0;
mpc1.OV(1).Max = 200;
%% specify weights
mpc1.Weights.MV = 0;
mpc1.Weights.MVRate = 0.1;
mpc1.Weights.OV = 1;
mpc1.Weights.ECR = 100000;
%% specify overall adjustment factor applied to estimation model gains
alpha = 0.57544;
%% adjust default output disturbance model gains
setoutdist(mpc1, 'model', getoutdist(mpc1)*alpha);
%% adjust default measurement noise model gains
mpc1.Model.Noise = mpc1.Model.Noise/alpha;
%% specify simulation options
options = mpcsimopt();
options.RefLookAhead = 'off';
options.MDLookAhead = 'off';
options.Constraints = 'on';
options.OpenLoop = 'off';
%% run simulation
sim(mpc1, 2001, mpc1_RefSignal, mpc1_MDSignal, options);
```

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 contrôle précis de la variation de vitesse du moteur à courant continu à excitation séparée est réalisé dans ce travail par le contrôle du modèle prédictif (MPC), qui sert à minimiser l'erreur statique grâce à une fonction coût. Les performances de ce contrôleur ont été vérifiées par simulation à l'aide du logiciel MATLAB-SIMULINK.

Mots Clefs : Modèle de commande prédictif (MPC), moteur à courant continu à excitation séparée, fonction transfert, modèle d'état.

ملخص

السيطرة التنبؤية هي تقنية تحكم متقدمة للأوتوماتيكية. ولدت من حاجة حقيقية في العالم الصناعي. تتحقق في هذا العمل التحكم الدقيق في تباين السرعة لمحرك DC المثير بشكل منفصل عن طريق التحكم في النموذج التنبؤي، (MPC)، والذي يعمل على تقليل الخطأ الثابت إلى الحد الأدنى بفضل دالة التكلفة. تم التحقق من أداء وحدة التحكم هذه عن طريق المحاكاة باستخدام برنامج MATLAB-SIMULINK.

الكلمات المفتاحية: نموذج التحكم التنبؤي (MPC)، محرك كهربائي ذو التيار المستمر ذو الإثارة المنفصلة، معادلة الانتقال، نموذج المحرك.

Abstract

Predictive control is an advanced control technique of the automatic. It was born of a real need in the industrial world. The precise control of the speed variation of the separately excited DC motor is realized in this work by the control of the predictive model (MPC), which serves to minimize the static error thanks to a cost function. The performance of this controller was verified by simulation using the MATLAB-SIMULINK software.

Keywords: Predictive control model (MPC), DC motor with separate excitation, transfer function, state mode.