

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

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

**En** : Electrotechnique

**Spécialité** : Commandes Electriques

**Par** : BOUREGBA ABDELHAK & BOUREGBA AYMEN

**Sujet**

**Commande prédictive avec contraintes d'un moteur Brushless  
À partir de données expérimentales**

Soutenu publiquement, le 30 / 09 / 2021 devant le jury composé de :

Mr Mechernene Abdelkader	MCA	Univ. Tlemcen	Président
Mr Loucif Mourad	MCB	Univ. Tlemcen	Examineur
M. Benyahia Boumediene	Professeur	Univ. Tlemcen	Encadreur
M.Meliani sidi Mohammed	Professeur	Univ. Tlemcen	Co- Encadreur

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## **DÉDICACES**

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes chers parents pour leur soutien  
Inconditionnel, leurs encouragements, et bien  
sûr pour m'avoir permis de réaliser mes études  
Dans les meilleures conditions.*

*A toute ma famille.*

*A tous mes amis.*

*A tous les enseignants qui m'ont aidé  
De proche ou de loin pour être un jour  
Un Master.*

*A ceux qui m'ont soutenu pendant  
Toute la durée de mes études.*

# **Remerciement**

Avant toute chose, on remercie Allah le tout puissant de m'avoir données le courage, la patience et la force durant toutes ces années d'étude.

Je suis très reconnaissant à Mr Benyahia Boumediene & Mr Mélanie Sidi Mohammed et mon remerciement pour m'avoir encadré et en particulier pour son soutien, sa gentillesse, son encouragement, ses conseils et sa patience pendant la période de la réalisation de ce travail.

Mes sincère remerciement aux messieurs les membres de jury qui j'ai fait l'honneur en acceptant d'examiner ce travail.

Enfin, un remerciement spécial aux étudiants de la 2 -ème année Master de la spécialité de génie électrique spécifiquement la spécialité Electrotechnique.

## *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 sans balais 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 brushless, moteur courant continu sans balais, fonction transfert, modèle d'état.

## *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), brushless motor, brushless direct current motor, transfer function, state model.

## *ملخص*

التحكم التنبئي هو تقنية تحكم متقدمة للتحكم الآلي. لقد ولدت من رحم حاجة حقيقية في العالم الصناعي. يتم تحقيق التحكم الدقيق في تباين سرعة محرك التيار المستمر بدون فرش في هذا العمل من خلال التحكم في النموذج والذي يعمل على تقليل الخطأ الثابت من خلال وظيفة التكلفة. تم التحقق من أداء وحدة التحكم هذه (MPC) التنبئي عن طريق المحاكاة باستخدام برنامج

## *MATLAB-SIMULINK*

الكلمات المفتاحية : نموذج التحكم التنبئي محرك بدون فرش ، محرك تيار مباشر بدون فرش وظيفته النقل ، نموذج الحال،

# Table des Matière

Introduction Générale .....	10
I. Principe et Modélisation du Moteur BLDC.....	12
I.1 Origine du Moteur BLDC .....	12
I.2 Introduction.....	12
I.3 Définition .....	13
I.4 Description .....	14
I.5 Principe de fonctionnement de Moteurs BLDC.....	15
I.6 Caractéristique du BLDC.....	15
I.7 Domaines d'application du BLDC .....	16
I.8 Comparaison entre les moteurs BLDC et MCC : .....	16
I.9 Modèle mathématique du Moteur BLDC.....	17
I.9.1 Equations Électriques .....	17
I.9.2 Equations Mécaniques .....	20
I.10 Conclusion .....	21
II. BLDC avec Régulateur PI.....	23
II.1 Introduction.....	23
II.2 Principe général d'un correcteur PI.....	23
II.3 Différentes caractéristiques d'une réponse d'un système .....	24
II.4 Réglage d'un PI .....	25
Paramètres du PI influençant sur la réponse du système de la manière suivante .....	25
II.5 Actions PI .....	26
II.6 Détermination des paramètres du correcteur .....	26
II.7 Application PI au contrôle de vitesse du BLDC.....	26
II.7.1 Introduction.....	26
II.7.2 Analyse du moteur en boucle ouvert a l'aide de Simulink : .....	27
II.7.3 Analyse du moteur BLDC avec un correcteur PI en boucle fermé l'aide de Simulink ...	28
II.7.4 Test du système : .....	29
II.8 Conclusion .....	30
III. BLDC avec commande prédictive .....	32
III.1 Introduction.....	32
III.2 Principe de la commande prédictive .....	32
III.3 Stratégie générale de la commande prédictive .....	32
III.4 Élément de la commande prédictive.....	34
III.4.1 Trajectoire de référence .....	36
III.4.2 Principe de l'horizon fuyant.....	38

III.5	Avantages de la commande prédictive .....	38
III.6	Application de la commande prédictive au contrôle de vitesse du BLDC .....	39
III.6.1	Introduction.....	39
III.6.2	Le système de commande MPC proposé .....	39
III.6.3	Test du système :.....	42
III.7	Conclusion .....	47
	Conclusion Général .....	45

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre I : Moteur BLDC (Principe & Modélisation)

Figure I. 1 : Capteur à effet Hall. ....	15
Figure I. 2 : Conversion d'énergie de la machine à courant continu .....	16
Figure I. 3 : Structure d'un moteur à courant continue sans balais.....	17
Figure I. 4 : : Principe de fonctionnement d'un moteur BLDC triphasé.....	17
Figure I. 6 : Modèle électrique simplifié du BLDCM.....	20
Figure I. 7 : Structure d'un contrôleur de BLDCM .....	21
Figure I. 8 : Formes typiques des courants et des FEMs .....	22

## Chapitre II : BLDC avec Régulateur PI

Figure II. 1: Correcteur PI théorique .....	23
Figure II. 2: Réponse d'un système du second ordre.....	25
Figure II. 3 : Schéma Simulink du moteur BLDC en boucle ouvert.....	27
Figure II. 4 : L'entrée et la réponse à un échelon en boucle ouverte sur $t = 0,4$ s.....	27
Figure II. 5 : Schéma Simulink du moteur BLDC avec un contrôleur PI en BO .....	28
Figure II. 6 : la réponse en boucle fermé du correcteur PI .....	28
Figure II. 7: Allure de la vitesse face à une variation de consigne .....	29
Figure II. 8 : Allure de la vitesse face à une variation de la charge .....	30

## Chapitre III : BLDC avec commande prédictive

Figure III. 1: Stratégie de la commande prédictive .....	33
Figure III. 2: La structure de base de la commande prédictive .....	34
Figure III. 3: Le schéma fonctionnel de la structure de base des algorithmes MPC .....	35
Figure III. 4: Trajectoire de référence et horizon de prédiction.....	37
Figure III. 5 : Modèle du contrôle MPC appliqué à la BLDC sous SIMULINK .....	39
Figure III. 6 : Le block interne de la BLDC .....	40
Figure III. 7 : Paramétrage du contrôleur prédictif .....	40
La Figure III. 8 : montre l'allure de la vitesse imposée par le contrôleur MPC avec.....	40
Figure III. 9 : Vitesse moteur BLDC avec échelon de 0 à 2000 tr/min.....	41

Figure III. 10: Signale MPC de contrôle vitesse échelon .....	41
Figure III. 11: Réponse de la vitesse de moteur BLDC avec une entrée variable.....	42
Figure III. 12 : Signale MPC de contrôle vitesse une entrée variable.....	43
Figure III. 13 : Réponse BLDC avec bruit de mesure .....	43
Figure III.14 : Couple résistive appliquée.....	40
Figure III.15 : Réponse de la vitesse perturbée par un couple de 5 N.m à l'instant 2 seconde.....	41
Figure III.16 : Signale MPC de contrôle vitesse échelon .....	41
Figure III.17 : Réponse de vitesse avec un couple variable .....	42
Figure III.18: Signale MPC de contrôle vitesse un couple variable.....	43

## ***LISTE DES TABLEAUX***

**Tableau 1 : Avantages et inconvénient des deux moteurs..... 19**

### Introduction Générale

---

La technologie moderne des systèmes d'entraînement nécessite de plus en plus un contrôle précis et continu de la vitesse, du couple et de la position, tout en garantissant la stabilité, la vitesse et l'efficacité la plus élevée possible.

La fragilité du système *balais-collecteur* a toujours été un *grand inconvénient* de la MCC, ce qui limite la *puissance* et la *vitesse maximale*. C'est pour cette raison qu'on a cherché à les remplacer par des machines qui utilisent un *commutateur électronique* à la place du *commutateur mécanique* : ce sont les moteur BLDC. Les commutateurs électroniques sont remplacés par des *capteurs* [1] qui détectent à tout moment la position du rotor par rapport au stator. Les capteurs les plus utilisés sont : le capteur électromagnétique, codeur de position et le plus intéressant le capteur à effet Hall.

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 [2]. 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 est consacré à la définition et au principe de fonctionnement du BLDC tout en citant ses caractéristiques et sa composition.
- Le deuxième chapitre introduit les principes généraux de la commande PI et son application sous Matlab Simulink.
- Le troisième chapitre nous avons étudié sur le modèle de la commande prédictive (MPC) et donné les concepts de base et son application sous Matlab Simulink.

Le présent mémoire s'achève par une conclusion qui résume tous les résultats obtenus dans cette étude et qui présente quelques perspectives.

# **Chapitre I**

## **Moteur BLDC (Principe & Modélisation)**

# **I. Principe et Modélisation du Moteur BLDC**

## **I.1 Origine du Moteur BLDC**

La porte du moteur sans balais s'est ouverte au début des années 1960 avec l'arrivée de gradateur de puissance pouvant convertir le courant alternatif (AC) en courant continu (DC). En 1962, T. G. Wilson et P. H. Trickey ont publié un article décrivant un moteur sans balais fonctionnant sur le courant continu et doté d'une technologie où le magnétisme d'aimants est mis en opposition successivement par un dispositif électrique. La grande trouvaille dans le concept du moteur sans balais était évidemment l'absence d'un commutateur physique servant à transmettre le courant.

Si on les retrouve aujourd'hui dans plusieurs outils électroportatifs, c'est tout simplement parce que la miniaturisation du contrôle électronique et le perfectionnement des méthodes de la fabrication industrielle permettent aujourd'hui de produire ces outils à un coût somme toute raisonnable. Les outils avec moteur sans balais sont pour le moment considérés comme des produits hauts de gamme chez les fabricants d'outillage, mais rien n'indique que d'ici quelques années, ils ne deviennent pas la norme.

## **I.2 Introduction**

Les moteurs à courant continu sont tout à fait adaptés aux fonctionnements en régime variable, mais ils présentent de gros inconvénients liés à la présence du contact mobile entre balais et collecteur (entretien, problème de commutation...) [3] On a donc cherché à les remplacer par des machines qui utilisent un commutateur électronique à la place du commutateur mécanique : ce sont les moteurs sans balais et est devenue, aujourd'hui, un outil indispensable dans diverses applications grâce à ses performances supérieures.

La fragilité du système balais-collecteur a toujours été un grand inconvénient de la MCC, ce qui limite la puissance et la vitesse maximale. C'est pour cette raison qu'on a cherché à les remplacer par des machines qui utilisent un commutateur électronique à la place du commutateur mécanique : ce sont les moteur BLDC. Les commutateurs électroniques

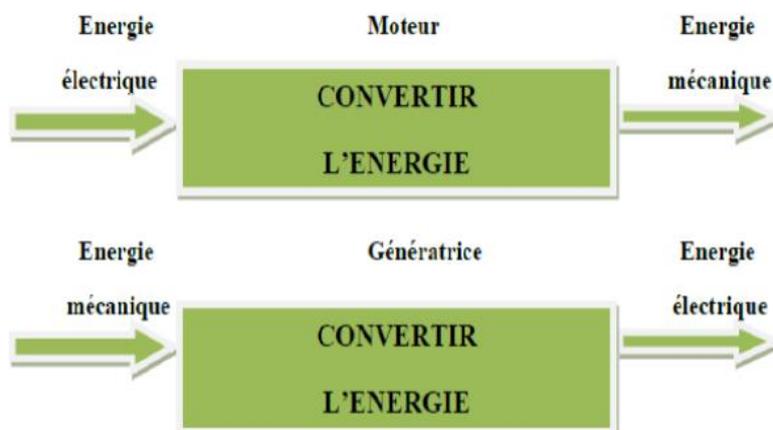
sont remplacés par des capteurs de position du rotor (capteur électromagnétique, codeur de position et le plus intéressant le capteur à effet Hall qui est la partie essentielle qui remplace le commutateur mécanique et est utilisée pour connaître à tout moment la position du rotor). [4]



**Figure I. 1 : Capteur à effet Hall.**

### I.3 Définition

Les moteurs à courant continu sont des transducteurs électromécaniques. Lorsqu'ils peuvent fournir suffisamment de puissance mécanique pour démarrer et entraîner une charge en mouvement, ils convertissent l'énergie électrique absorbée en énergie mécanique, et on dit alors qu'ils ont un fonctionnement moteur. Ou ils convertissent l'énergie mécanique reçue en énergie électrique lorsqu'ils sont entraînés par la charge. Ensuite, nous disons qu'ils ont un fonctionnement de générateur.



**Figure I. 2 : Conversion d'énergie de la machine à courant continu**

## I.4 Description

Le stator est constitué de bobines d'excitation qui sont généralement au nombre de 3 ou de 6. Celles-ci sont le plus souvent connectées en étoile, mais elles peuvent également être connectées en triangle.

Le rotor est constitué d'aimants permanents comportant 2 à 8 pôles avec une alternance des pôles Nord et Sud.

La plupart des moteurs BLDC comprennent également un ensemble de trois capteurs à effet Hall qui, positionné à  $60^\circ$  ou à  $120^\circ$  l'un de l'autre, permettent de connaître la position du rotor. La connaissance de la position du rotor permet à un circuit électronique auxiliaire d'effectuer les commutations de l'alimentation.

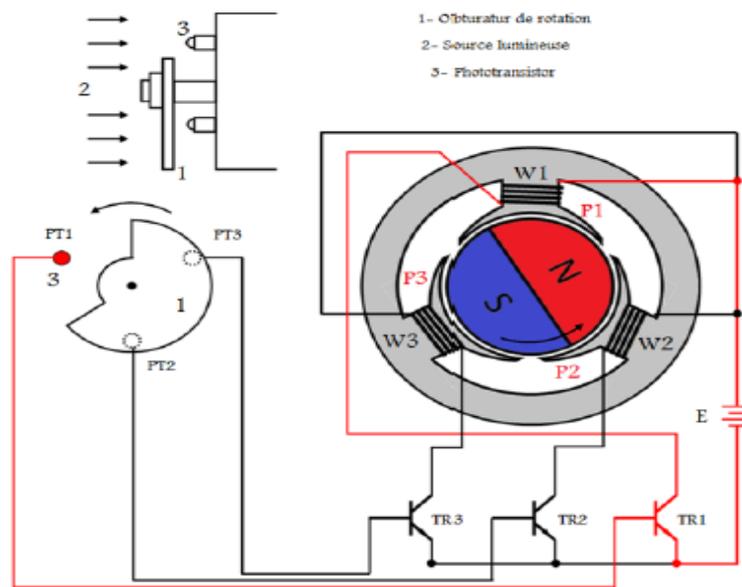
Il comporte les mêmes éléments qu'un moteur à courant continu, excepté le collecteur. Par ailleurs, l'emplacement des bobines et des aimants permanents est inversé.

**À savoir** - Le rotor est composé d'un ou plusieurs aimants permanents, et le stator de plusieurs bobinages



**Figure I. 3 : Structure d'un moteur à courant continue sans balais**

## I.5 Principe de fonctionnement de Moteurs BLDC



**Figure I. 4 : : Principe de fonctionnement d'un moteur BLDC triphasé**

Le moteur brushless fonctionne à partir de trois sources de tensions variables, fournies par un onduleur, et permettant de générer un champ magnétique tournant. Le rotor, généralement équipé d'un aimant permanent, tend à suivre le champ magnétique tournant. La *Figure I. 5* **montre** l'architecture du moteur et de son onduleur.

## I.6 Caractéristique du BLDC

En général, la machine BDLC se caractérise par :

- Une fiabilité, rendement et couple élevée
- Meilleure vitesse par rapport à la réponse de couple
- Haute efficacité
- Durée de vie longue
- Une dissipation thermique améliorée
- Fonctionnement silencieux

## I.7 Domaines d'application du BLDC

Les moteurs brushless sont largement utilisés dans l'industrie, en particulier dans les **servomécanismes des machines-outils et en robotique** où ils ont remplacé les machines à courant continu. Ils équipent en particulier **les disques durs et les graveurs de DVD des ordinateurs**. Ils sont également très utilisés en **modélisme pour faire mouvoir des modèles réduits d'avions**, d'hélicoptères (aéromodélisme et voitures). Une forme simplifiée et populaire de ces technologies est utilisée dans les ventilateurs assurant le refroidissement des micro- ordinateurs. Toutefois leur domaine d'utilisation privilégié reste les puissances à quelques dizaines de kilowatts où l'aimant permanent permet d'obtenir à taille égale, une induction dans l'entrefer plus élevée que les machines à rotor bobiné [5].

## I.8 Comparaison entre les moteurs BLDC et MCC :

*Tableau 1 : Avantages et inconvénient des deux moteurs*

<i>Type de moteurs</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
<b><i>Moteur à courant Continu sans balais</i></b>	Le rendement est bien supérieur. Ne demande pas de Maintenance. Faible consommation d'énergie.	La nécessité de piloter le moteur avec un dispositif électronique.

<b>Moteur à courant Continu</b>	Simple et efficace Faible charge.  Pas besoin d'un Circuit de contrôle complexe.	Les balais doivent être Remplacé périodiquement.
---------------------------------	---	--

## I.9 Modèle mathématique du Moteur BLDC

### I.9.1 Equations Électriques

Les Équations Électriques qui régissent le fonctionnement du moteur BLDC sont

données par :

$$\vec{v} = [R] \vec{I} + \frac{d\vec{\varphi}}{dt} \quad (I.1)$$

$$\vec{\varphi} = [L] \vec{I} + \vec{\varphi}_M \quad (I.2)$$

Où :

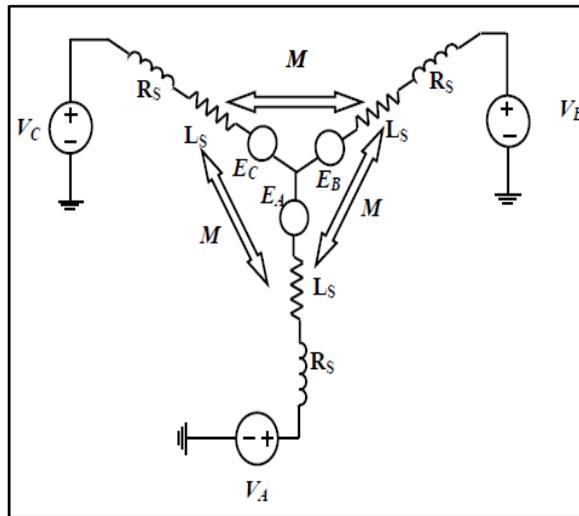
$\vec{v}$ ,  $\vec{I}$  et  $\vec{\varphi}$  Sont des vecteurs représentant la tension, le courant et le flux magnétique pour chaque phase respectivement.

$\vec{\varphi}_M$  est le vecteur du flux magnétique créé par l'aimant permanent;

$[R]$  et  $[L]$  sont les matrices résistances et inductances de la machine données par les matrices.

$$[R] = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \quad (I.3)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} l_{aa} & l_{ab} & l_{ac} \\ l_{ba} & l_{bb} & l_{bc} \\ l_{ca} & l_{cb} & l_{cc} \end{bmatrix} \quad (I.4)$$



**Figure 1. 6 : Modèle électrique simplifié du BLDCM**

Lorsque le moteur est couplé en étoile, les tensions de phase prennent la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L - M & 0 & 0 \\ 0 & L - M & 0 \\ 0 & 0 & L - M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (I.5)$$

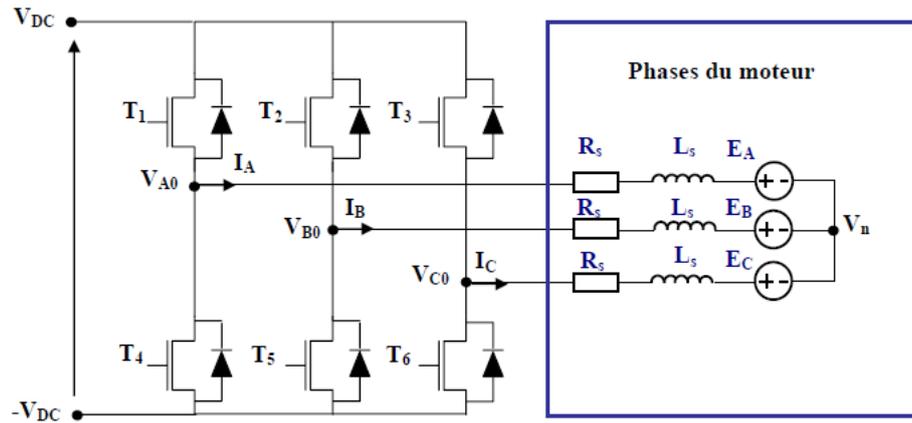
Où  $e_a$ ,  $e_b$  et  $e_c$  sont respectivement la fcm de la phase a, b et c respectivement

$$\begin{aligned} e_a &= f_a(\theta) \cdot k_e \cdot \omega_r \\ e_b &= f_b(\theta) \cdot k_e \cdot \omega_r \quad (I.6) \\ e_c &= f_c(\theta) \cdot k_e \cdot \omega_r \end{aligned}$$

Avec

$k_e$  : Coefficient de proportionnalité

$f_a(\theta)$ ,  $f_b(\theta)$  et  $f_c(\theta)$  sont des fonctions dépendant uniquement de la position du rotor.



**Figure I. 7 : Structure d'un contrôleur de BLDCM**

### Force électromotrice

La fcem induite (Fcem) est déterminée par la position angulaire de L'aimant du rotor. Il est très important de faire attention à cette fcem qui est proportionnelle à la vitesse angulaire du rotor.

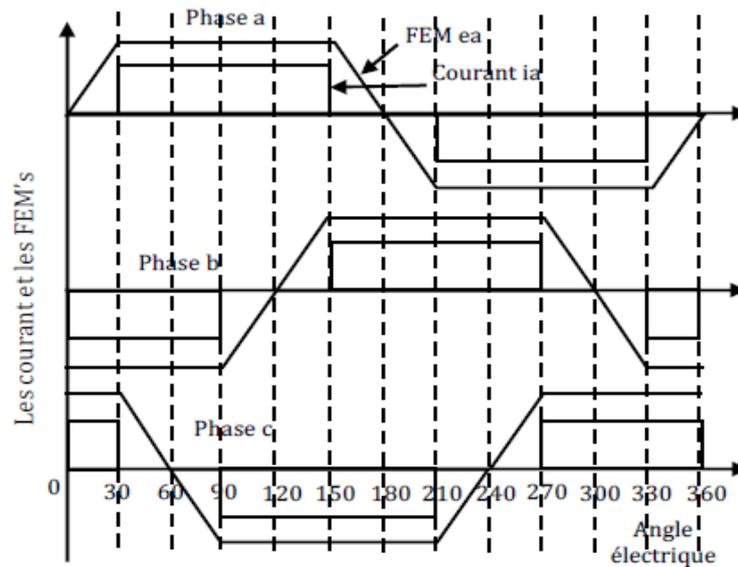
Les fcem de la phase a, b et c sont données par les équations suivantes :

$$e_a = k_a w_m \cos(\theta t) \quad (I. 7)$$

$$e_b = k_b w_m \cos\left(\theta t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (I. 8)$$

$$e_c = k_c w_m \cos\left(\theta t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (I. 9)$$

Supposons que la fcem est trapézoïdale et Le courant de phase commence à 30° (angle électrique). Les formes typiques de la fcem induite triphasée et du courant sont illustrées sur la figure ci-dessous.



**Figure 1. 8 : Formes typiques des courants et des FEMs**

### I.9.2 Equations Mécaniques

Le modèle mécanique du moteur BLDC est plus simple que le modèle électrique. En effet, la modélisation de la dynamique du rotor est la norme dans le domaine des moteurs électriques.

- **Équation dynamique**

Le modèle mécanique du moteur BLDC est donné par l'équation :

$$j \frac{d\omega_r}{dt} = C_e - f\omega_r - C_r \quad (I.10)$$

$\omega_r$  : Vitesse angulaire en  $rad/s$

$C_e$  : Couple électromagnétique développé en  $N/m$

$C_r$  : Couple de charge en  $N/m$

$f$  : Coefficient de frottement en  $N.(m/rad).s^{-1}$

- **Équations du Couple Électromagnétique**

Le couple généré dans BLDCM est dû à l'alignement de l'aimant. L'aimant est disposé à une position où la force électromotrice est nulle. Afin d'obtenir le couple dans BLDCM, le courant doit être fourni dans chaque phase lorsque la force électromotrice est présente.

Donc le couple électrique développé par le moteur BLDCM est donné par :

Donc le couple électrique développé par le moteur BLDCM est donné par :

$$C_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_r} \quad (\text{I. 11})$$

## I.10 Conclusion

Les efforts déployés pour rédiger le premier chapitre, incluant la recherche bibliographique et l'extraction des concepts de base du moteur BLDC, nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Le moteur BLDC est un moteur qui utilise du courant continu et n'a pas de balais. Par conséquent, les faiblesses (coût et maintenance élevés et perte de puissance d'allumage) du MCC en tant que collecteur sont éliminées dans le moteur BLDC, ce qui le rend très avantageux.
- Le principe de fonctionnement des moteurs BLDC est similaire à celui du MSAP. Ce principe est basé sur le champ magnétique tournant généré par la bobine du stator, qui entraîne le rotor à aimant permanent par l'action d'interaction magnétique.
- Les défauts du moteur BLDC que nous avons évoqués à la fin de ce chapitre, notamment les avantages, font de ce type de moteur un choix nécessaire pour pas mal d'applications. Ces applications sont également présentées dans ce chapitre.

# **Chapitre II**

## **BLDC avec Régulateur PI**

## II. BLDC avec Régulateur PI

### II.1 Introduction

La commande PI est dite aussi (correcteur, régulateur, contrôleur), se compose de deux termes P et I où 'P' correspond au terme proportionnel et 'I' pour terme intégral de la commande. Les régulateurs PI sont probablement les plus largement utilisés dans le contrôle industriel. Même les plus complexes systèmes de contrôle industriel peut comporter un réseau de contrôle dont le principal élément de contrôle est un module de contrôle PI.

Le régulateur PI est une simple implémentation de retour d'information (Feedback). Il a la capacité d'éliminer la compensation de l'état d'équilibre grâce à l'action intégrale.

### II.2 Principe général d'un correcteur PI

L'erreur observée est la différence entre la consigne et la mesure. Le PI permet deux actions en fonction de cette erreur :

- Une action Proportionnelle : l'erreur est multipliée par un gain  $K_p$
- Une action Intégrale : l'erreur est intégrée sur un intervalle de temps  $s$ , puis multipliée par un gain  $K_i$ .

Les actions dérivées et intégrales ne s'emploient jamais seules mais en combinaison avec l'action proportionnelle.

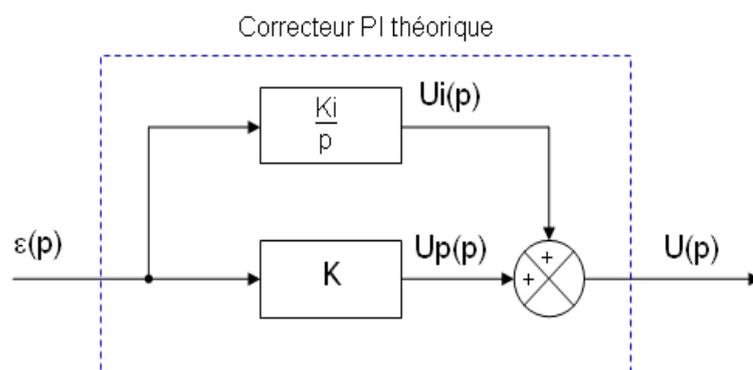


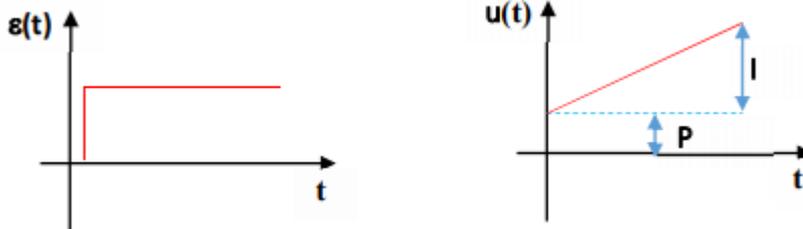
Figure II. 1: Correcteur PI théorique

On présente ici l'architecture de correcteur PI :

**La fonction de transfert :**  $C(s) = k_c + \frac{k_i}{s} = k_c + \frac{K_c}{T_i s}$  (II. 1)

Avec  $T_i$  est la constante d'intégration.

**Commande du système :**  $u(t) = k_c \varepsilon(t) + \frac{K_c}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt$  (II. 2)



Échelon

### II.3 Différentes caractéristiques d'une réponse d'un système

Stabilité : Respect d'une marge de phase d'au moins 30°

Précision : La mesure rejoint-elle la consigne ?

- Dans le cas d'une réponse à un échelon, nécessité d'une intégration  $s^{-1}$  dans la boucle ouverte pour respecter une erreur statique nulle
- Dans le cas d'une réponse à une rampe, nécessité d'une double intégration  $\frac{1}{s^2}$  dans la boucle ouverte pour respecter une erreur de trainage nulle.

Rapidité :

Un correcteur PI possède une intégration, ce qui permet de régler le problème de l'erreur statique. En contrepartie il ralentit le système, on veillera donc à respecter une marge de phase suffisante mais pas trop grande non plus (plus la marge de phase est grande, plus la réponse est lente et les risques de saturation augmentent). [6]

### II.4 Réglage d'un PI

Le réglage d'un PID consiste à déterminer les coefficients  $K_p$ ,  $K_i$  afin d'obtenir une réponse adéquate du procédé et de la régulation. L'objectif est d'être robuste, rapide et précis. Il faut pour cela limiter le/ou les éventuels dépassements (over shoots).[7]

- La robustesse est sans doute le paramètre le plus important et délicat. On dit qu'un système est robuste si la régulation fonctionne toujours même si le modèle change un peu. Un régulateur doit être capable d'assurer sa tâche même avec ces changements afin de s'adapter à des usages non prévus.
- La rapidité du régulateur dépend du temps de montée et du temps d'établissement du régime stationnaire
- Le critère de précision est basé sur l'erreur statique.

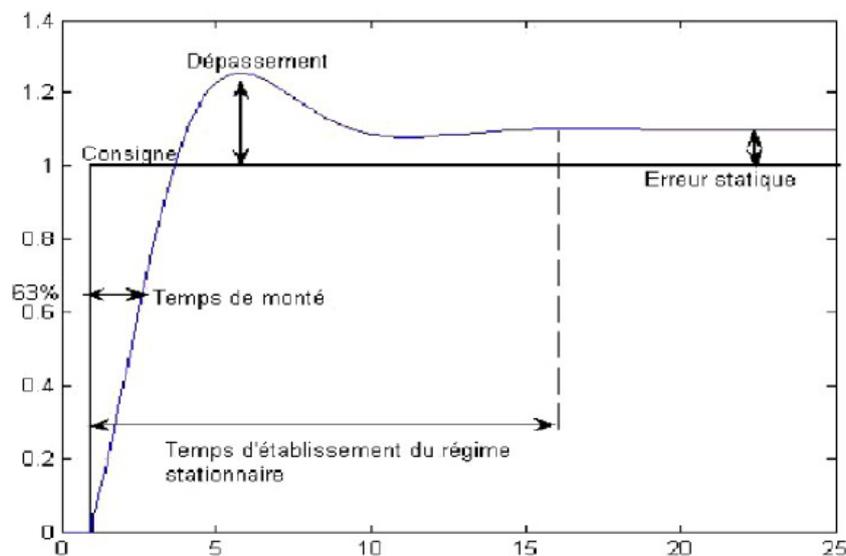


Figure II. 2: Réponse d'un système du second ordre

#### Paramètres du PI influençant sur la réponse du système de la manière suivante

- ✓  $K_p$  : Lorsque  $K_p$  augmente, le temps de montée (rise time) est plus court mais il y a un dépassement plus important. Le temps d'établissement varie peu et l'erreur statique se trouve améliorée.

- ✓  $K_i$  : Lorsqu'il augmente, le temps de montée est plus court mais il y a un dépassement plus important. Le temps d'établissement au régime stationnaire s'allonge mais dans ce cas on assure une erreur statique réduite. Donc plus ce paramètre est élevé, moins l'erreur statique est grande, mais plus la réponse du système est ralentie.

### II.5 Actions PI

Un régulateur PI est obtenu par l'association de ces deux actions et il remplit essentiellement les deux fonctions suivantes :

- ✓ Action I : améliore la précision
- ✓ Action P : améliore la rapidité [8]

### II.6 Détermination des paramètres du correcteur

- ⇒ 1<sup>er</sup> Cas : FTBF est un système du 1<sup>ère</sup> ou 2<sup>ème</sup> ordre : on utilise généralement la méthode de compensation des pôles.
- ⇒ 2<sup>ème</sup> Cas : FTBF un système d'ordre  $> 2$  : on utilise généralement la méthode de ZIEGLER-NICHOLS.

### II.7 Application PI au contrôle de vitesse du BLDC

#### II.7.1 Introduction

La simulation va nous permettre d'étudier les résultats et les performances d'un moteur BLDC, sans réaliser l'expérience et le tester sur un quad-copter réel.

Dans ce chapitre, nous allons simuler, et discuter les différents résultats qu'on a obtenu avec les différentes valeurs.

Les résultats sont présentés à l'aide de l'outil Scope sous Simulink ou la commande plot dans un script Matlab.



## Interprétation :

D'après cette figure en remarque qu'il y a un temps de monté, un grand dépassement et une très grande erreur statique donc le system est instable pour courgée ce système en a utilisé un correcteur PI.

### II.7.3 Analyse du moteur BLDC avec un correcteur PI en boucle fermé l'aide de Simulink

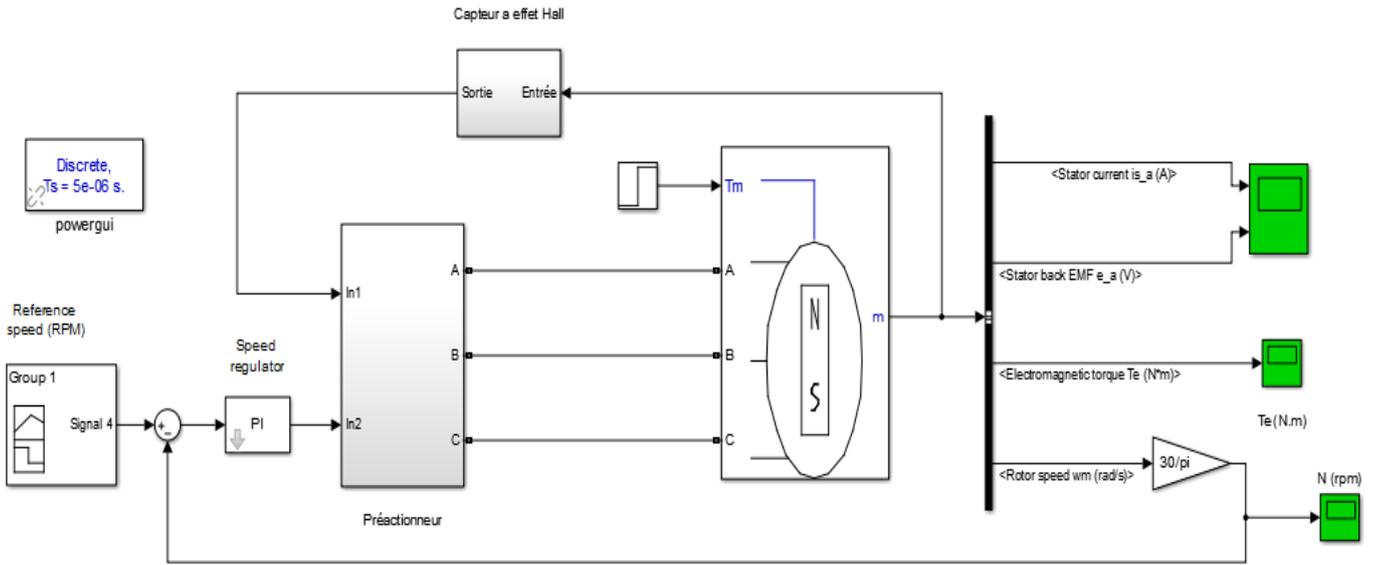


Figure II. 5 : Schéma Simulink du moteur BLDC avec un contrôleur PI en BO

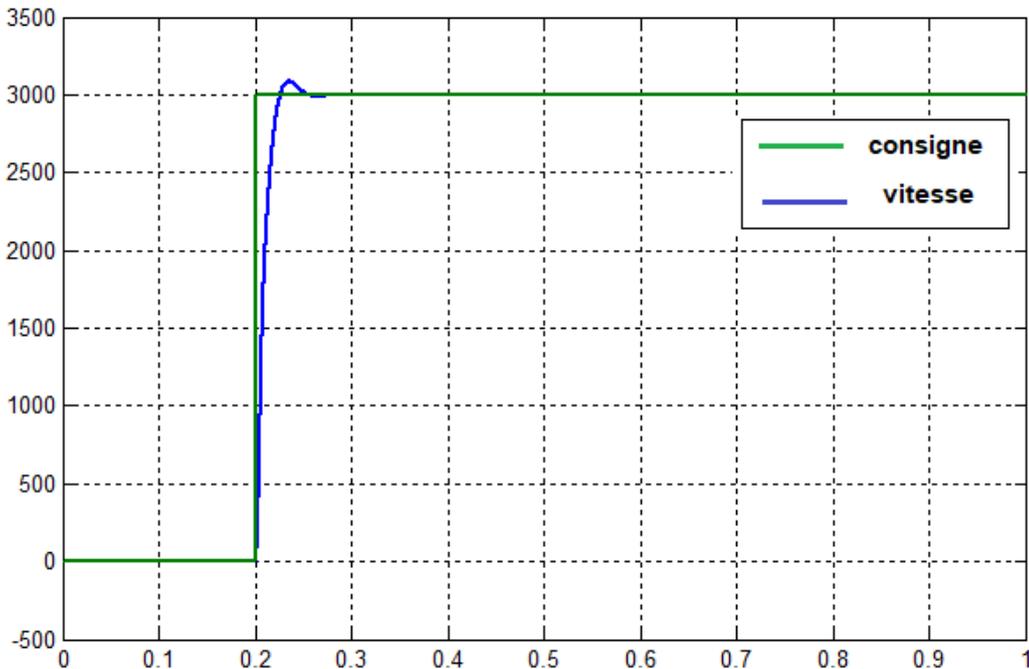


Figure II. 6 : la réponse en boucle fermé du correcteur PI

### II.7.4 Test du système :

Ce système est testé par deux variations importantes :

- **Variation de consigne de vitesse**

Nous avons imposé une diminution de vitesse du moteur à partir 0.2 (s)

Nous voulons que notre moteur tourne à 3000 rad/s (valeur de référence), à 0.2 (s) seconde, une nouvelle consigne a été imposée de l'ordre de 2000 rad/s.

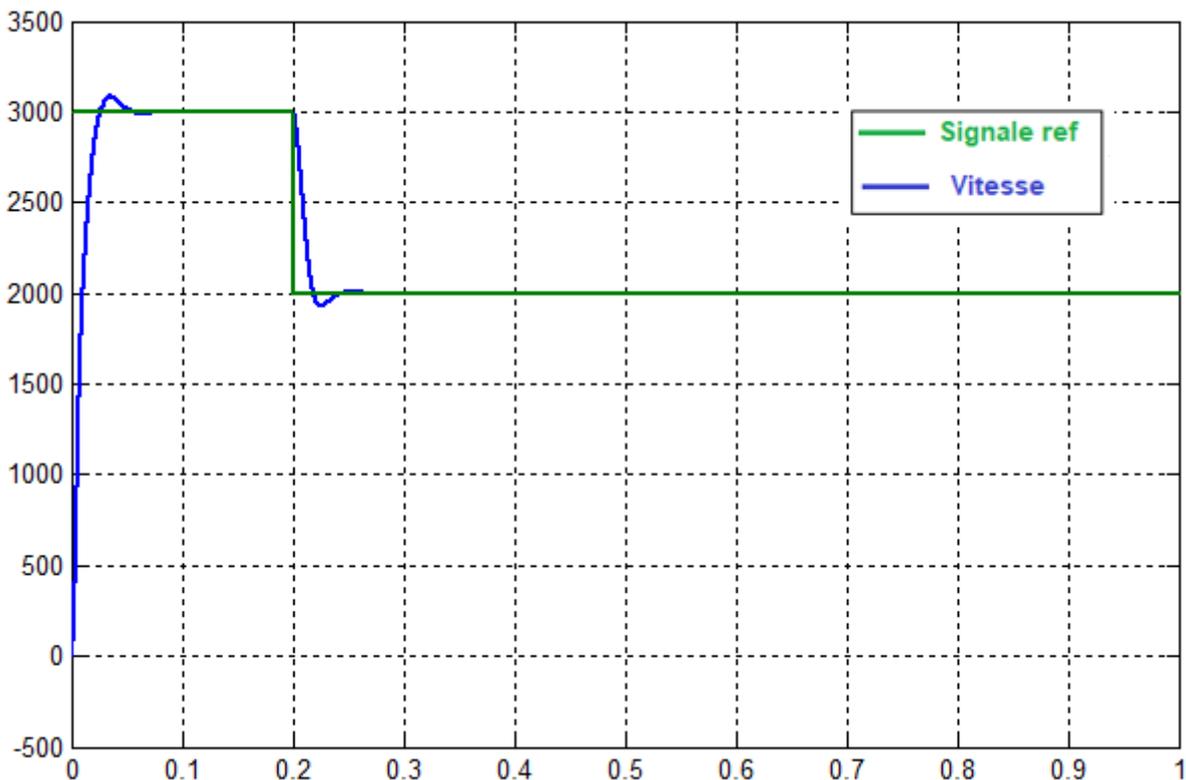


Figure II. 7: Allure de la vitesse face à une variation de consigne

#### **Interprétation :**

On remarque qu'au démarrage du moteur, il y a un léger dépassement de de 8% à 0.03s (régime transitoire) avant que le signal réel en bleu suive la valeur de référence en rouge (régime permanent).

Après le changement de consigne à 0.2(s), il y a un dépassement de 4.6 % dû au changement brusque de la consigne avant que le signal réel en bleu suive la valeur de référence en rouge.

- **Variation de couple résistant**

En premier lieu, le couple résistant est maintenu à 5Nm, à 0.6 seconde, on a augmenté le couple à 10Nm.

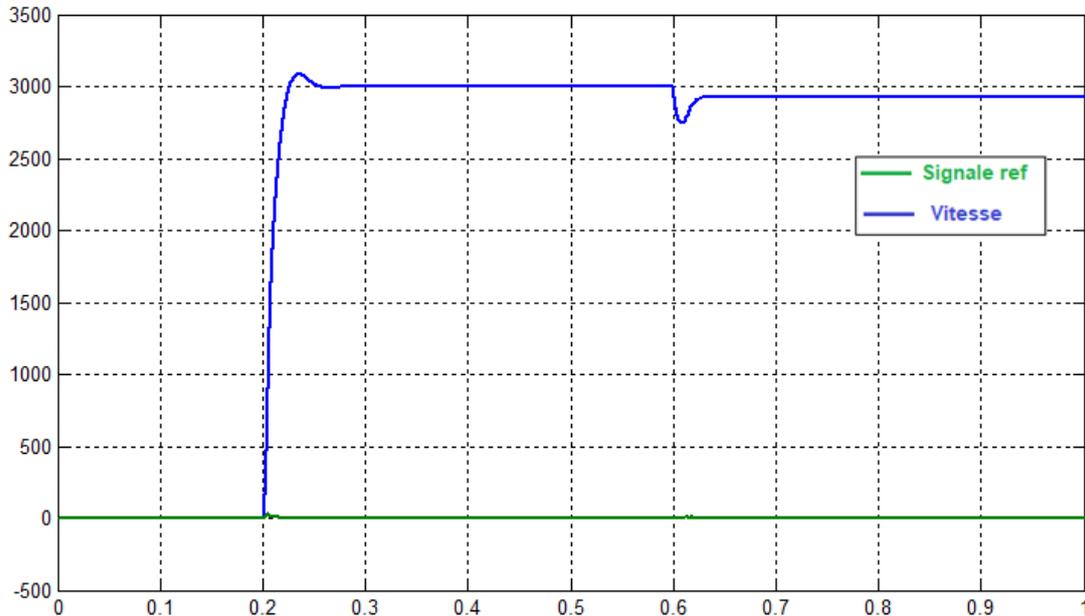


Figure II. 8 : Allure de la vitesse face à une variation de la charge

### **Interprétation :**

On remarque qu'au démarrage du moteur, il y a un léger dépassement de 0.03 s avec un maximal de 4.46% avant stabilisation de la vitesse.

Après augmentation de la charge résistive, nous remarquons une légère diminution de vitesse.

## II.8 Conclusion

Régulateur PI permet de piloter le moteur brushless tout en s'assurant que l'erreur permanente de la longueur de pas de la sortie de régulation par rapport à l'entrée de consigne est éliminée. Cette caractéristique de précision est due à l'existence d'une action intégrale. L'ajout d'une action dérivée ne fera qu'augmenter la stabilité du moteur, comme le contrôle de la vitesse du moteur. La réalisation de l'action différentielle s'effectue de préférence à l'échelle pour éviter la saturation de la commande.

## **Chapitre III**

### **BLDC avec commande prédictive**

### III. BLDC avec commande prédictive

#### III.1 Introduction

La commande prédictive est une technologie de contrôle avancée pour le contrôle automatique. Il constitue un domaine large et diversifié et intègre des disciplines telles que l'ordonnancement Contrôle optimal, multivariable et contrôle contraint. Elle a pour objectif de commander des systèmes industriels complexes. C'est utilisé dans diverses applications, y compris les systèmes robotiques, les machines Surveillance et contrôle des procédés de génie électrique et de biotechnologie. [9]

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).

#### III.2 Principe de la commande prédictive

Le principe de la commande prédictive est de créer une maîtrise du système et de l'effet attendu lié à la trajectoire connue à l'avance. [13]

Par des prédictions basées sur le comportement futur du système, et en minimisant l'écart de ces prédictions par rapport à la trajectoire au sens d'une certaine fonction de coût, tout en respectant les contraintes opérationnelles. L'idée est très simple, et elle est assez systématiquement pratiquée dans la vie quotidienne. [10]

#### III.3 Stratégie générale de la commande prédictive

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

La méthodologie de cette commande à base de modèle se caractérise par les étapes suivantes :

## Chapitre III : BLDC avec commande prédictive

- Prédire les sorties futures du processus sur l'horizon de prédiction défini, en utilisant le modèle de prédiction. On dénote  $y\left(t + \frac{k}{t}\right), k = 0 \dots \dots (N)$ , 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.
- Calculer la séquence de signaux de commande, dénote par  $u\left(t + \frac{k}{t}\right), k = 0 \dots \dots , (N - 1)$ , en minimisant un critère de performance afin de mener la sortie du processus vers une sortie de référence. On dénote par  $\omega\left(t + \frac{k}{t}\right), k = 0 \dots \dots (N)$ , d'habitude le critère de performance à minimiser est un compromis entre une fonction quadratique des erreurs entre  $y\left(t + \frac{k}{t}\right)$  et  $\omega\left(t + \frac{k}{t}\right)$  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.
- Le signal de commande  $u(t)$  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. [11]

L'ensemble est résumé sur la figure suivante :

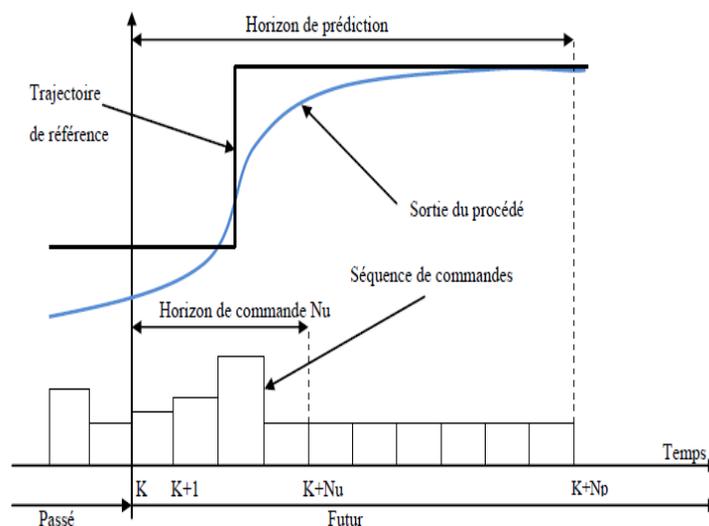


Figure III. 1: Stratégie de la commande prédictive

### III.4 Élément de la commande prédictive

Tous les algorithmes de la commande prédictive possèdent les mêmes éléments

Figure III.1 et différentes options peuvent être considérées pour chaque élément, ce qui donne une multitude d'algorithmes. Ces éléments sont :

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

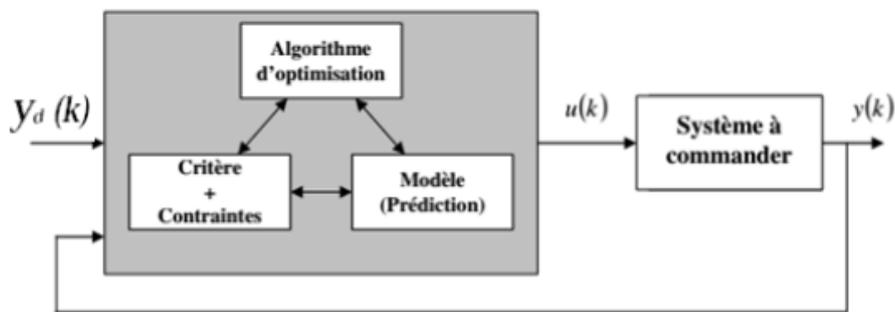


Figure III. 2: La structure de base de la commande prédictive

Afin de réaliser la stratégie de prévision, la structure de base de la figure II-3 est réalisée. Un modèle est utilisé pour prédire la sortie future du système en fonction des valeurs des commandes actuelles et passées et des meilleures commandes futures. Ce dernier est calculé par une méthode d'optimisation qui prend en compte la fonction de coût (qui dépend aussi des instructions futures) et les contraintes éventuelles. Par conséquent, le modèle du système contrôlé joue un rôle central dans le contrôle prédictif. Le modèle sélectionné doit être capable de prendre en compte la dynamique du processus pour prédire avec précision la sortie future.[12]

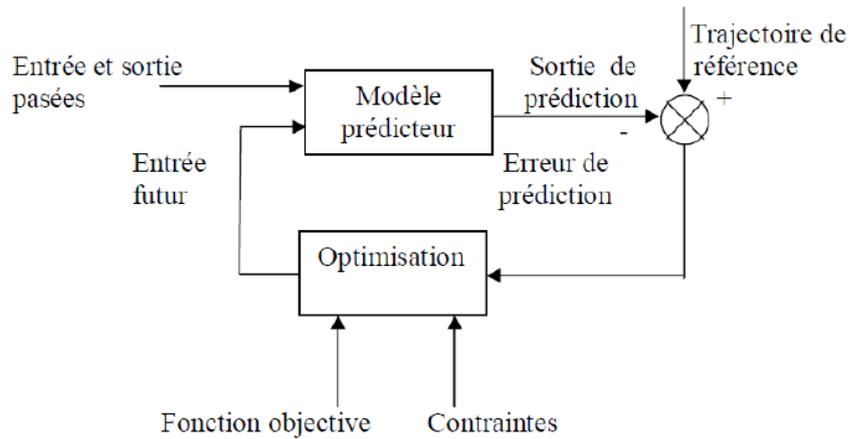


Figure III. 3: Le schéma fonctionnel de la structure de base des algorithmes MPC

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 [13]

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

### ***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 ordinateur. 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.

#### III.4.1 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 :

$$C(t + j) - y_r(t + j) = \lambda^j [C(t) - y_p(t)] \quad (\text{II.3})$$

Avec  $C$ ,  $y_r$ ,  $y_p$  sont la consigne, la trajectoire de référence, la sortie réelle du processus, respectivement. Ainsi que la variable  $\lambda$  est définie par  $\lambda = \exp\left(\frac{-3Te}{Tr}\right)$

où  $Te$  est la période d'échantillonnage et  $Tr$  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 (H1, H2) 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 H1 et H2.

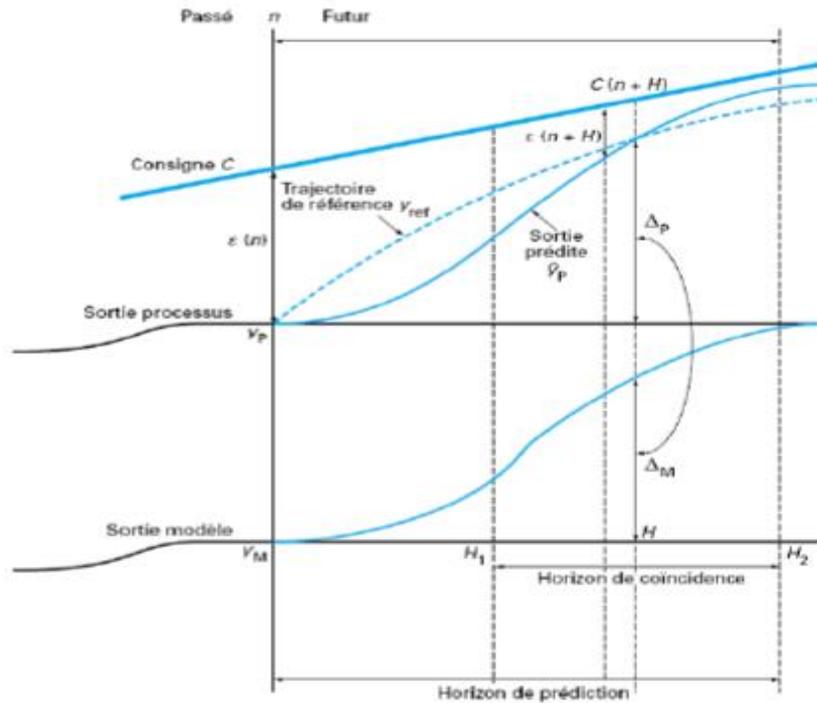


Figure III. 4: Trajectoire de référence et horizon de prédiction

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,  $\Delta_p$  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.

$$\Delta_p = \Delta_m \quad (\text{II. 4})$$

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 :

$$y_r(k + H) = y_p(k + H) \quad (\text{II. 5})$$

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

$$\Delta_p (C_0 - y_p(k)) (1 - \lambda h) = \Delta_m = y_m(k + H) - y_m(k) \quad (\text{II. 6})$$

### III.4.2 Principe de l'horizon fuyant

Seul le 1<sup>er</sup> 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.

$$U_k = \sum_{j=1}^{nb} u_{j,k} uB(0) \quad (\text{II. 7})$$

Le 1<sup>er</sup> 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

### III.5 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.

### III.6 Application de la commande prédictive au contrôle de vitesse du BLDC

#### III.6.1 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 PI.

Ce chapitre a pour but, d'implémenter le réglage de la vitesse d'un BLDC 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.6.2 Le système de commande MPC proposé

Le schéma de la commande prédictive appliquée au BLDC sous SIMULINK est illustré par la

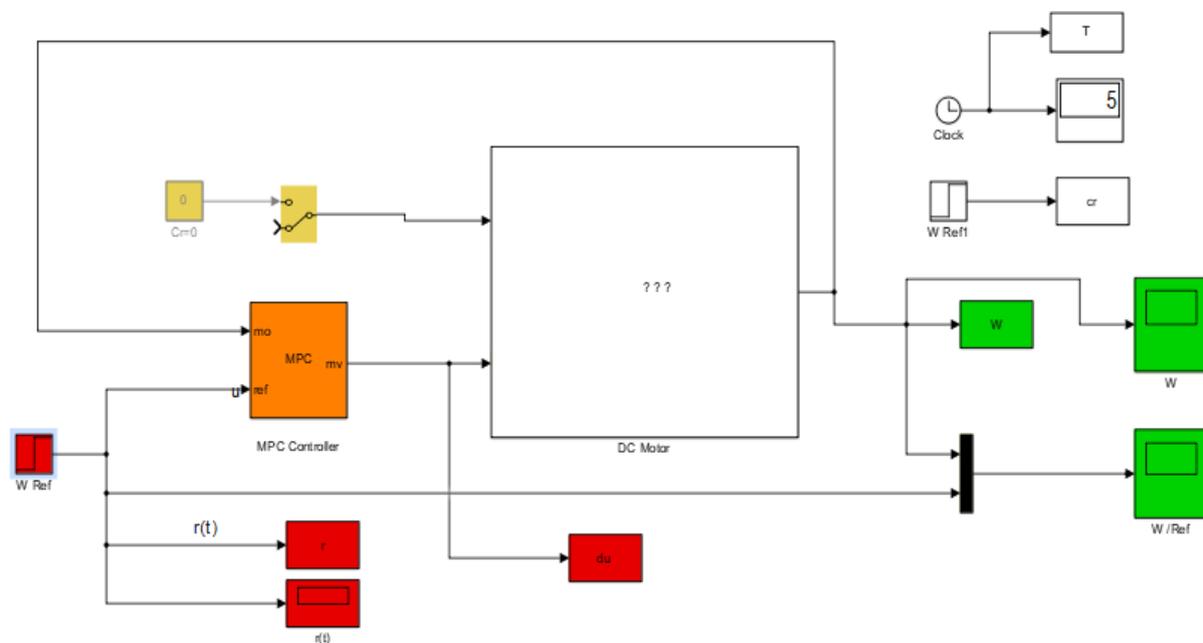


Figure III. 5 : Modèle du contrôle MPC appliqué à la BLDC sous SIMULINK

Le block interne de la BLDC est présenté à la Figure III.6

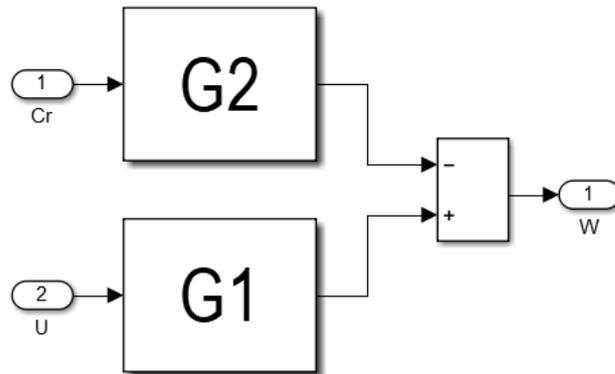


Figure III. 6 : Le block interne de la BLDC

Le bloc qui réalise le contrôle prédictif sous SIMULINK est le MPC contrôleur figure III.5

La configuration des paramètres de ce bloc est illustrée à la figure III.7 Le programme qui régit le contrôleur MPC1 est donné dans l'annexe.

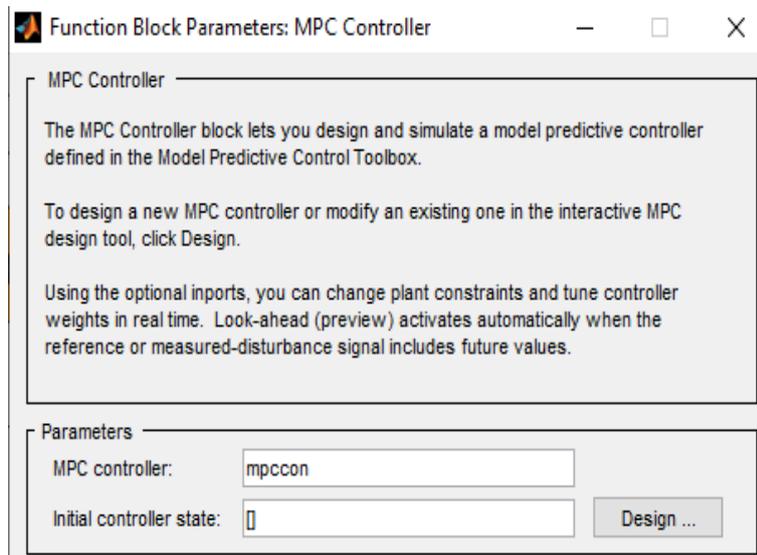


Figure III.7: Paramétrage du contrôleur prédictif

La Figure III. 7 montre l'allure de la vitesse imposée par le contrôleur MPC avec Échelon 0 à 2000 tr /min à l'instant 1 seconde.

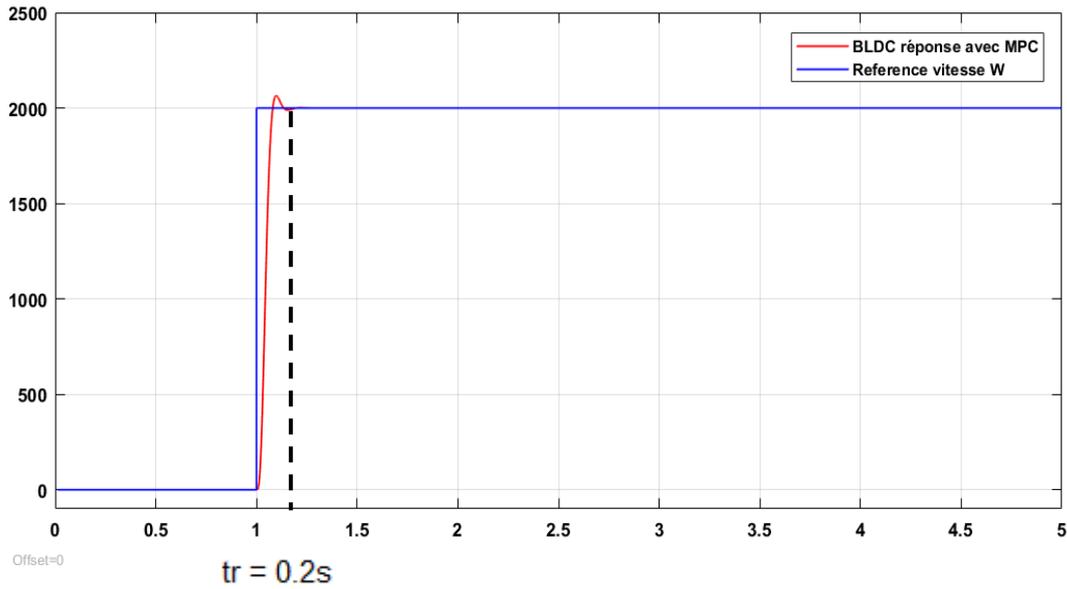


Figure III.8: Vitesse moteur BLDC avec échelon de 0 à 2000 tr/min

### Interprétation :

On remarque que la vitesse rotorique suit parfaitement sa consigne et atteint sa valeur maximale de 2000 pour un temps de réponse 0.2s. On constate un léger dépassement de 3% (régime transitoire) avant que la vitesse suive la référence (régime permanent).

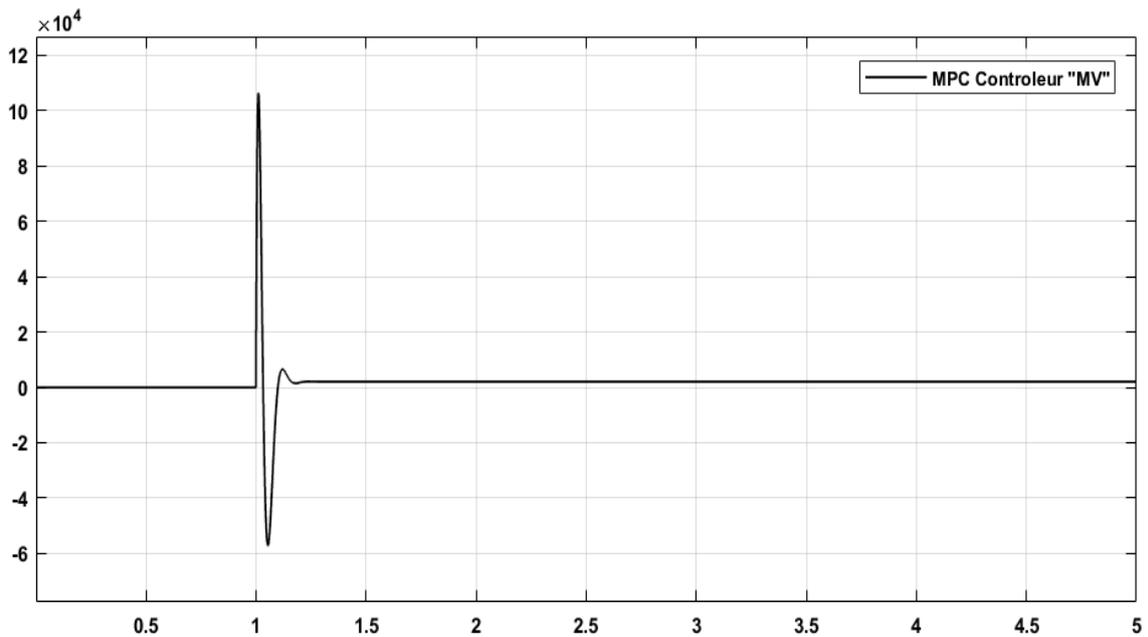


Figure III.9 : Signale MPC de contrôle vitesse échelon

### III.6.3 Test du système :

Ce système est testé par deux variations importantes :

- **Variation de consigne de vitesse :**

1. Nous avons imposé une entrée variable (pente de 0 à 2000tr/min, puis palier constant à 2000, puis échelon de 2000 à 1000, puis palier constant à 1000, puis échelon de 1000 à 500).

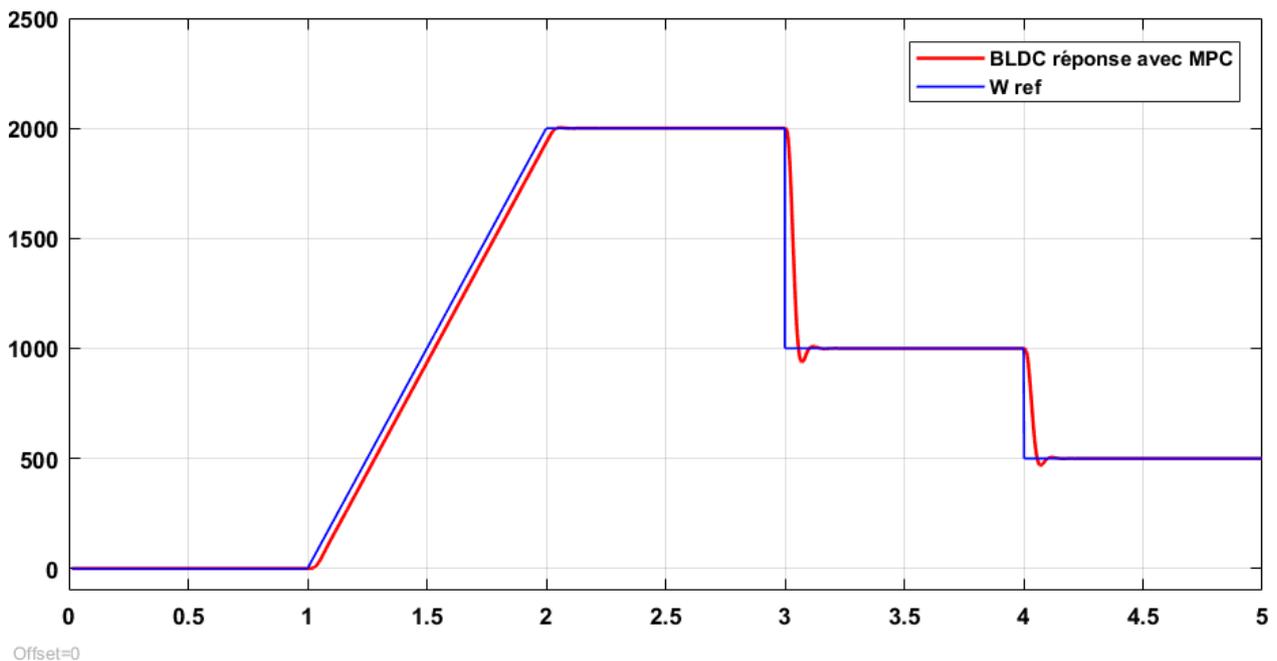


Figure III. 10 : Réponse de la vitesse de moteur BLDC avec une entrée variable

### **Interprétation :**

On a choisi une entrée variable et on remarque que la vitesse de moteur BLDC suit le signal de consigne jusqu'à 3 s où il y a une dépassement de 8% et une autre de 11% à 4 s lors du changement de consigne.

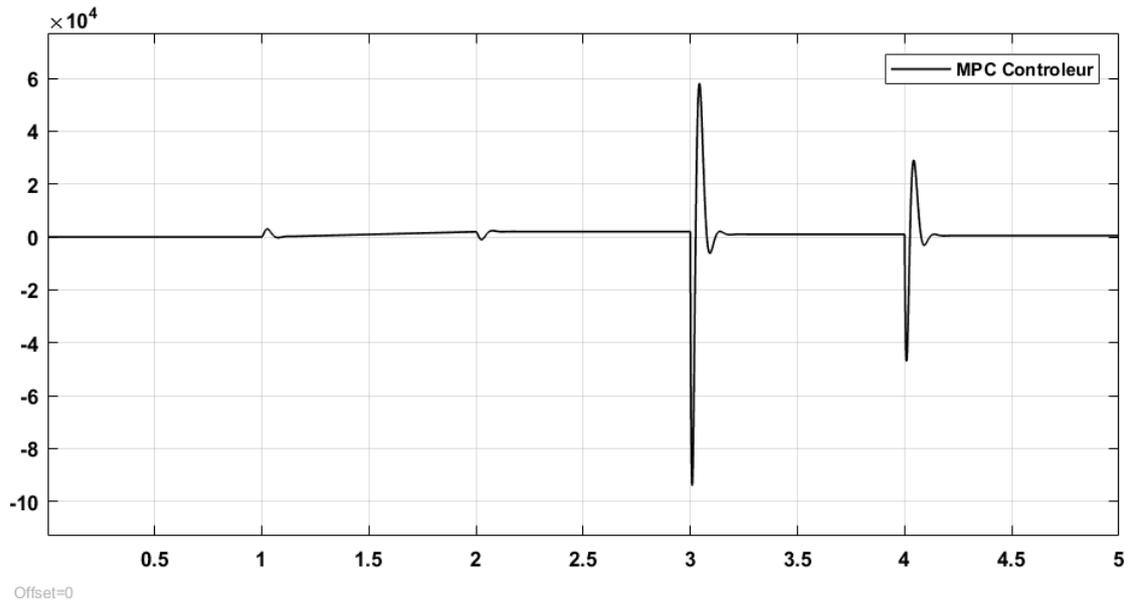


Figure III.11 : Signale MPC de contrôle vitesse une entrée variable

2. Réponse avec de bruit de mesure à la sortie, on applique un signal bruit blanc de faible intensité).

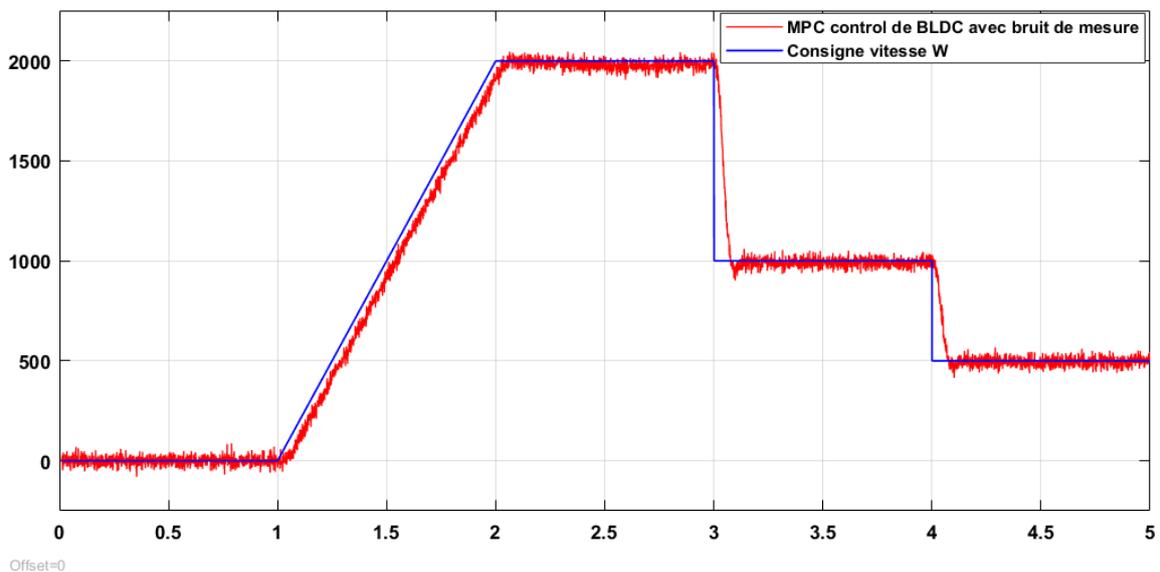


Figure III. 12 : Réponse BLDC avec bruit de mesure

### Interprétation :

La Figure III.12 montre le comportement de la vitesse pour une consigne variable ; A partir de cette figure, on observe de faible oscillation de la vitesse à cause de la consigne qu'on a appliqué.

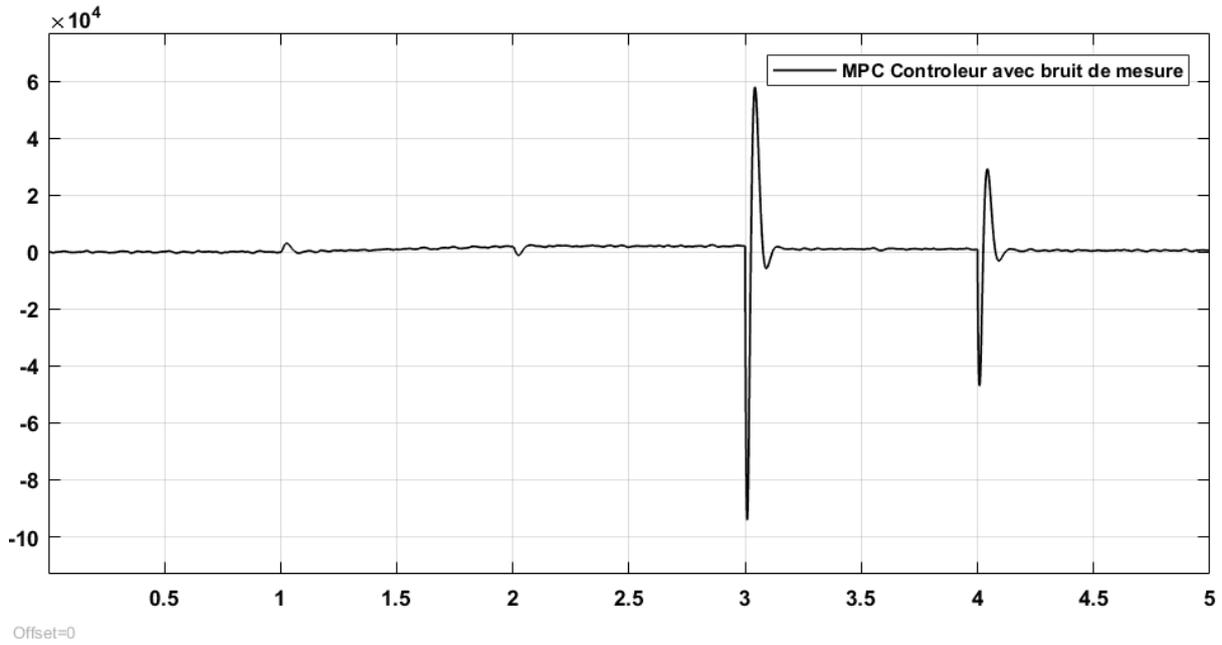


Figure III.13 : Signale MPC de contrôle bruit mesure

- **Variation de couple résistant :**

1. Test de rejet de perturbation du couple résistant pour le cas d'échelon.

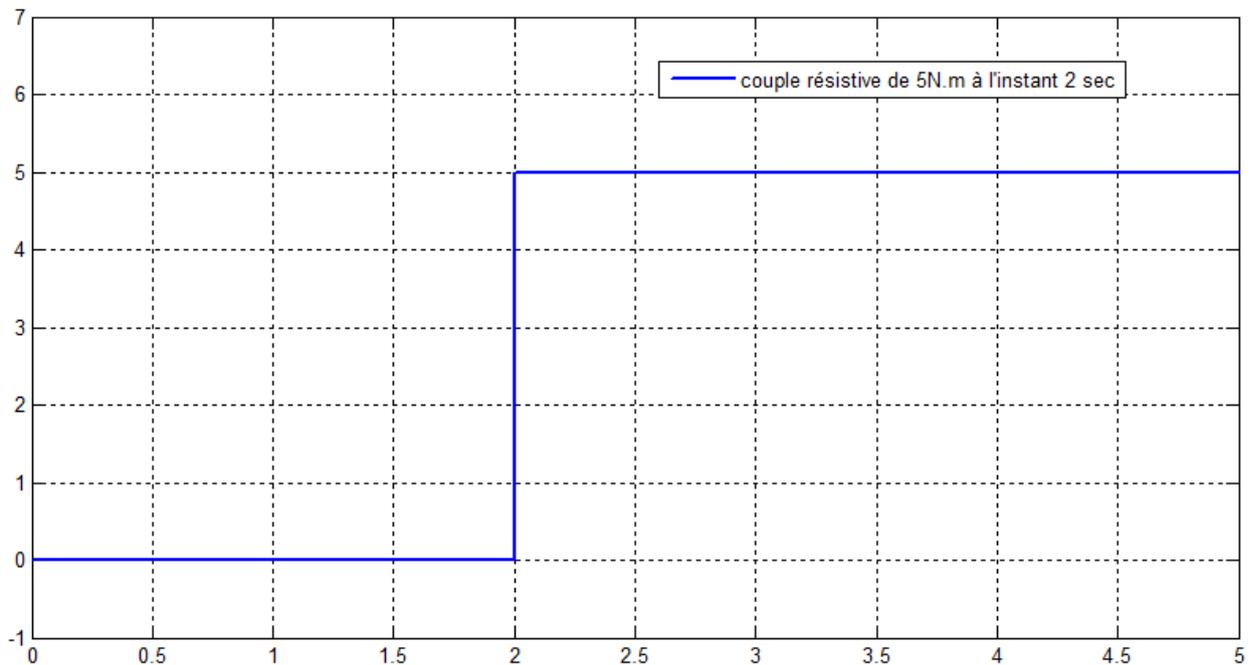


Figure III.14 : Couple résistive appliquée

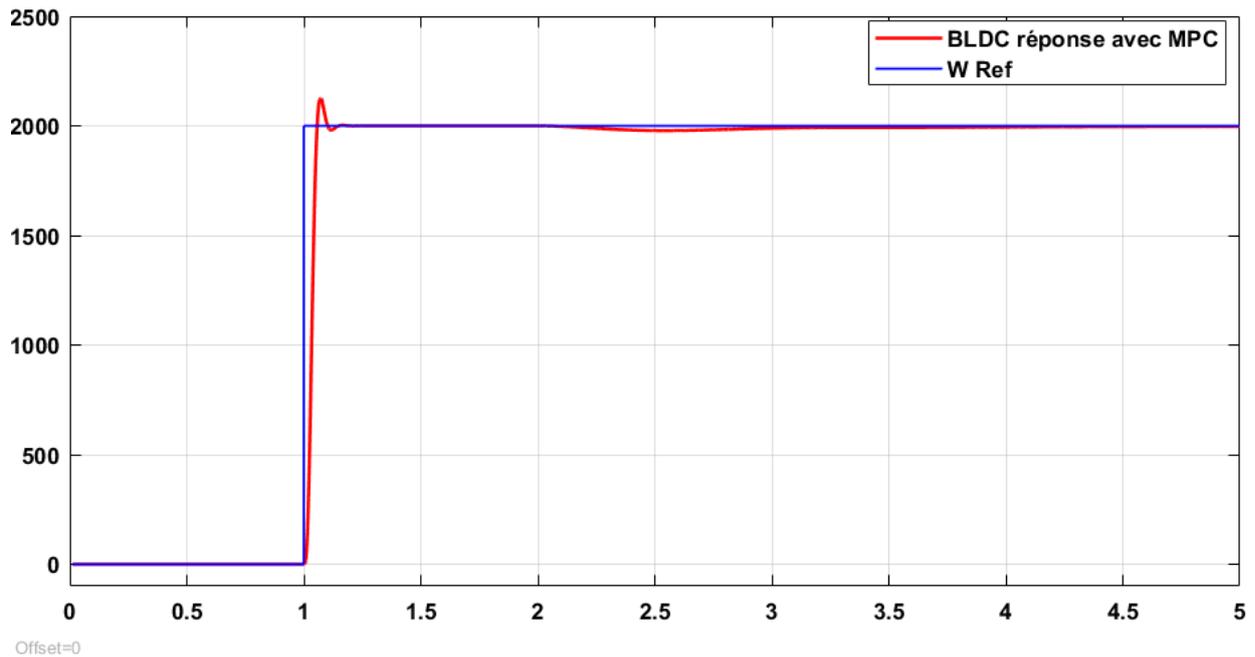


Figure III.15 : Réponse de la vitesse perturbée par un couple de 5 N.m à l'instant 2 seconde

### Interprétation :

La figure montre le comportement de la vitesse pour une consigne 2000 tr/min. A l'instant 1s lors de l'application de la consigne, il y a enregistrement d'un dépassement 6.3 % d'une durée de 0.2s avant stabilisation de la vitesse.

En appliquant une charge résistive de 5 N.m à l'instant 2 s, nous remarquons une légère diminution de vitesse. Le signal de référence étant maintenu à 1980 tr/min, Cette diminution de vitesse (signal réel) entraîne une petite erreur.

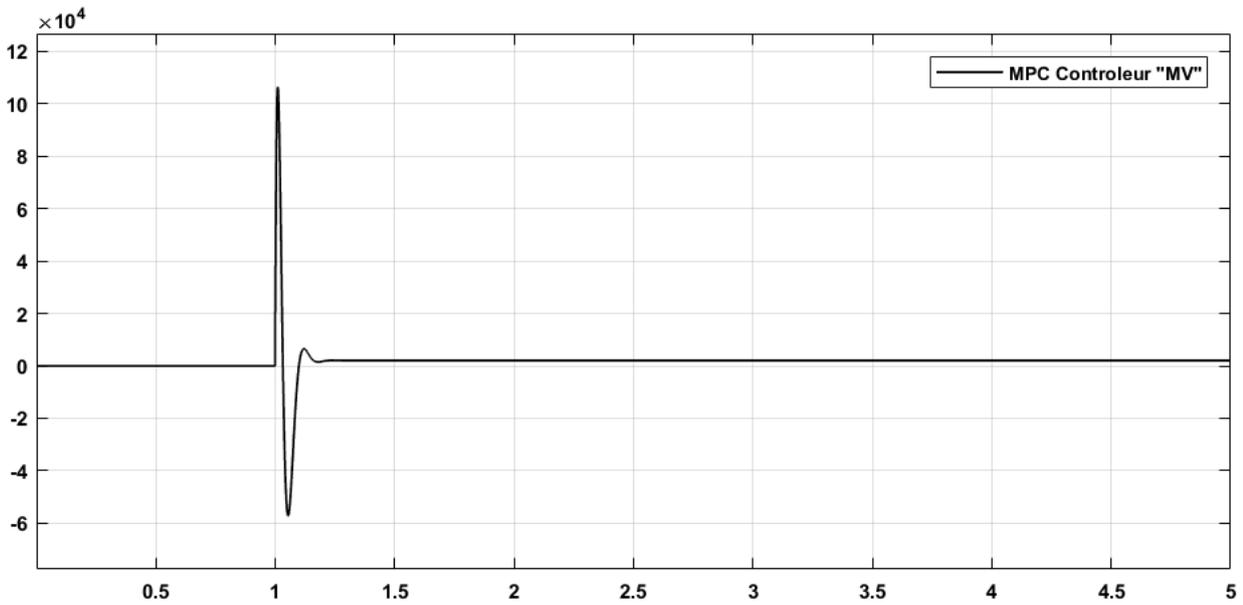


Figure III.16 : Signale MPC de contrôle vitesse échelon

2. Test de rejet de perturbation du couple résistant variable (3N.m à 2 sec et 5N.m à 3 sec) pour le cas d'une consigne variable (test petite vitesse et grande vitesse).

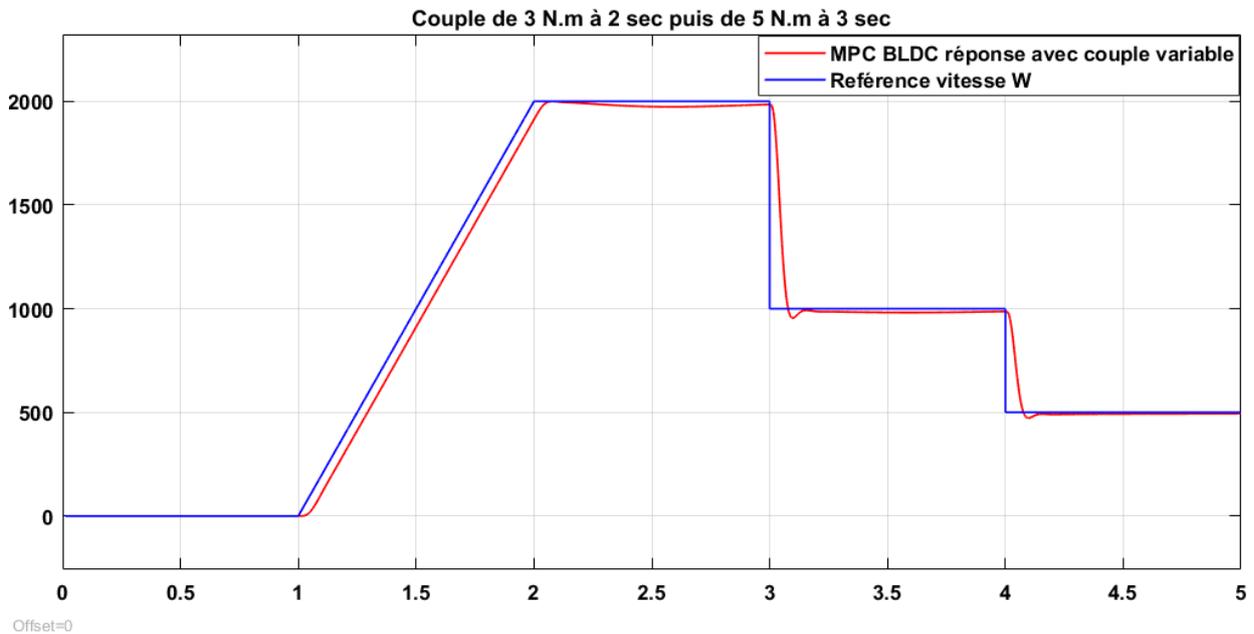


Figure III.17 : Réponse de vitesse avec un couple variable

### Interprétation :

La figure montre le comportement de la vitesse pour une consigne variable

On a appliqué une charge résistive de 3 N.m à l'instant 2 seconde puis 5 N.m à l'instant 3 seconde, nous remarquons une légère diminution de vitesse au palier de 2000tr/min et 1000 tr/min, et on remarque aussi la vitesse suit parfaitement à petite vitesse mais aux grandes vitesses non.

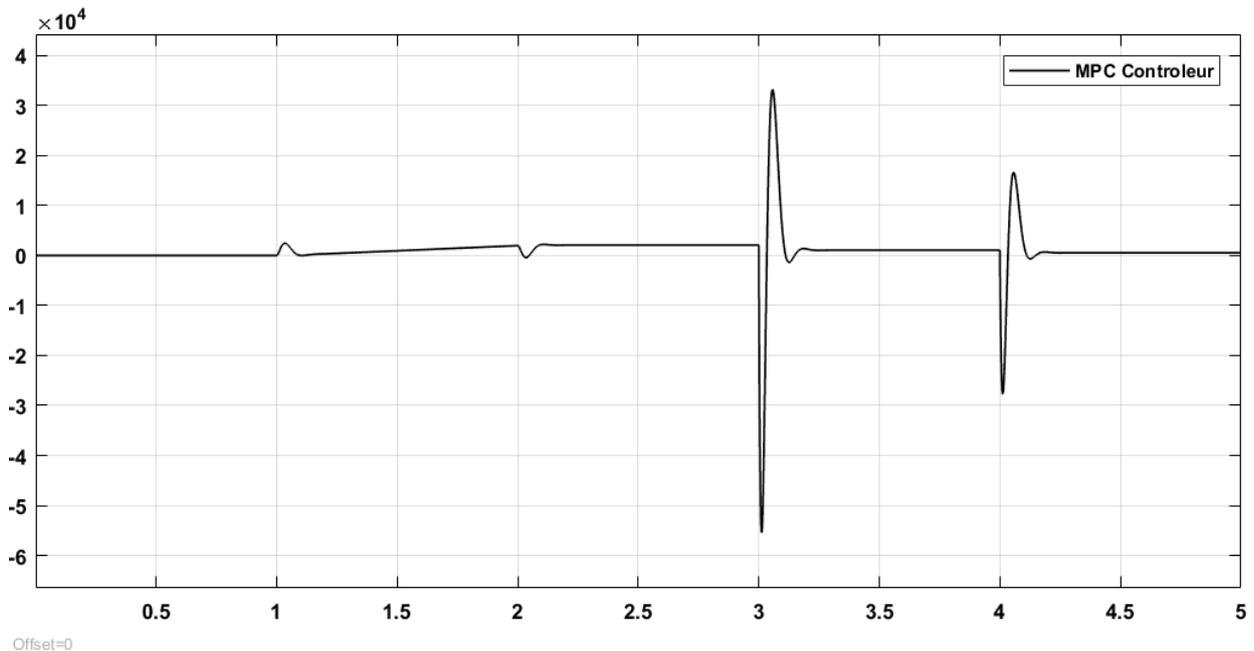


Figure III.18: Signale MPC de contrôle vitesse un couple variable

### III.7 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

---

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.

- [1] M. GOURAA M. DOUAOUDI, " Modélisation d'un moteur BLDC par un réseau de neurones MLP ", Université de Mostaganem,2019
- [2] M SLIMI, " Commande Prédictive d'un système électromécanique ", U.B.M. Annaba,2019
- [3] "Moteur à courant continu - Energie Plus Le Site." <https://energieplus-lesite.be/techniques/ascenseurs7/moteur-a-courant-continu/> (accessed Jul. 11, 2021).
- [4] M. Bousebsi, M. Mordjaoui, and M. Ammar, "Modélisation et simulation du moteur BLDC Application : Commande prédictive," no. 9, 1955, [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/337682358\\_Modelisation\\_et\\_simulation\\_du\\_moteur\\_BLDC\\_Application\\_Commande\\_predictive](https://www.researchgate.net/publication/337682358_Modelisation_et_simulation_du_moteur_BLDC_Application_Commande_predictive).
- [5] D. M. Academique, "Spécialité : Machines électriques Etude de la MSAP alimentée par deux configurations d' onduleur s multiniveaux," 2016.
- [6] "Correcteur PI." [https://www.enib.fr/~kerhoas/correcteur\\_PI.html](https://www.enib.fr/~kerhoas/correcteur_PI.html) (accessed Aug. 01, 2021).
- [7] "Exercices:Calcul des erreurs de position et de vitesse d'un système asservi." <https://genie-electrique.net/exercices-calcul-des-erreurs-de-position-et-de-vitesse-dun-systeme-asservi/> (accessed Aug. 01, 2021).
- [8] M. D. E. Master, "Thème Etude et Synthèse d' un Contrôleur PI et Application R emerciements," 2017.
- [9] M. Annaba, "Commande prédictive généralisée robuste Etude et application," 2006.
- [10] M. Dabo, "Commande prédictive généralisée non linéaire à temps continu des systèmes complexes To cite this version : HAL Id : tel-00497319 Commande prédictive généralisée non linéaire à temps continu des systèmes complexes," 2010.
- [11] M. Bousebsi, M. Mordjaoui, and M. Ammar, "Modélisation et simulation du moteur BLDC Application : Commande prédictive," no. 9, 1955, [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/337682358\\_Modelisation\\_et\\_simulation\\_du\\_moteur\\_BLDC\\_Application\\_Commande\\_predictive](https://www.researchgate.net/publication/337682358_Modelisation_et_simulation_du_moteur_BLDC_Application_Commande_predictive).
- [12] M. D. E. Magister, "Commande prédictive des systèmes non linéaires dynamiques," 2011.
- [13] M. BENCHIHA M. DIABATE "Commande prédictive d'un moteur courant continue," C.U.B.B (Ain Temouchent), 2019.

**ANNEXE**

Le programme de la commande prédictive générée par MATLAB :

```
clear all
clc
R=4.88;
L=0.0384
F=0.0131
J=0.0091
K=0.9533
num1=K;
num2=[L R];
den=[J*L J*R F*L (F*R+K^2)];
sys1=tf(num1,den);
[A1,B1,C1,D1] = tf2ss(num1,den)
sys2=tf(num2,den);
[A2,B2,C2,D2] = tf2ss(num2,den)
Ts=0.001;

MV=struct('Min',-inf,'Max',Inf,'RateMin',-inf,'Rate-
Max',inf);
OV=struct('Min',-inf,'Max',1);

p=120;
m=35;
mpccon=mpc(ss(A1,B1,C1,D1),Ts,p,m,[],MV,OV);
Tstop=5;
xo=[0 0 0]';
```