

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة

العلم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département électromécanique

## MÉMOIRE

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

En : Electrotechnique

Spécialité : Commande électrique

Par : - OUAHDI AYOUB

- OTMANI SOHAIB

### Sujet

**Implémentation d'une commande trapézoïdale d'un moteur BLDC**

Soutenu publiquement, le 29 / 06 /2024 , devant le jury composé de :

Mr A. BENHENICHE

MCA

Univ-BBA

Président

Mr E. MERABET

Pr

Univ-BBA

Examineur

Mr F. ZEBIRI

MCB

Univ-BBA

Encadrant

# *Remerciement*

*Nous voudrions remercier Allah de nous avoir accordé la santé, le courage, la patience et de nous avoir aidés à terminer ce travail.*

*Et de nous avoir accordé la volonté durant toutes ces années d'études.*

*Nous remercions notre encadreur **Fouad Zebiri** pour ses orientations et assistances avant et durant l'accomplissement de ce travail proposé par ses soins. Il nous a été d'un grand secours pour le côté théorique et pratiques. Nos vifs remerciements vont à l'égard de toute l'équipe du laboratoire de recherche de l'université de Bordj Bou-Arréridj « Bachir Ibrahimi ». Nous souhaitons la réussite pour la promotion Master 2 de l'année 2023-2024*

*Nous sommes reconnaissant à tous l'enseignants du département de l'électromécanique pour leurs compréhensions et patiences devant notre curiosité intellectuelle.*

*Pour tous les membres de jury 'du président aux autres membres ' recevez nos respects et considérations pour avoir accepté le jugement de ce mémoire et des remarques fondées qui nous ont formulées dans un esprit purement scientifique et des conseils prodigués pour l'amélioration de ce travail et d'éventuels engagement dans la voie de la recherche.*

*Nos remerciements encore une fois nos familles et nos amis et ceux qui nous ont accordés toute leurs attentions.*

# *Dédicaces*

*Au nom de Dieu le tout puissant le miséricordieux,*

*Je tiens à dédie ce travail :*

*A Mes chers parents en particulier ma très chère maman qui est une source d'inspirations infini dont je lui dois l'oeuvre de tous mes succès et de mes qualités, elle a su faire de moi ce que je suis aujourd'hui et ce que je vais apporter demain.*

*A Mon très cher père qui m'a été d'une grande aide durant mes études un soutien très précieux qui m'a appris à ne jamais reculer devant les défis.*

*A mes chers frères et soeurs :*

*Nor el houda, Diaedinne, Tassnim,*

*Et je dédie également ce travail à mes chers grands-parents, en leur souhaitant tout le bonheur et la santé.*

*À mes chers oncles et tantes, Je vous dédie ce mémoire avec toute ma gratitude et mon affection. Votre soutien indéfectible et vos encouragements constants ont été une source de motivation inestimable tout au long de mon parcours académique. Votre présence dans ma vie a été un véritable enrichissement, et je suis reconnaissant pour votre amour et votre sagesse.*

*A mes meilleurs amis les plus fous que j'ai connus Pour leur présence et pour tous ce qu'on partager dans notre vie*

*Je le dédié enfin à mon binôme Otmani Sohaib*

***Ayoub Ouahdi***

# *Dédicaces*

*Je voudrais dédier cet humble travail à mon père.*

*Je n'oublierai pas non plus la gentillesse de ma mère, que Dieu ait pitié d'elle.*

*Ainsi que de mon frère, de ma femme et de mes précieux enfants, Naim et Naima.  
J'adresse mes sincères remerciements à tous mes amis et collègues, ainsi qu'à tous ceux qui  
ont contribué directement ou indirectement à ce projet.*

*En conclusion, je souhaite à toute la promotion 2024 un avenir brillant, caractérisé par la  
réussite et des progrès continus.*

*Pour terminer, je souhaite dédier ce travail à mon collègue Ayoub Ouahdi et lui adresser  
mes meilleurs vœux.*

***Sohaib Otmani***

## Listes des abréviations

<b>BLDCM</b>	Brushless direct current motor (Moteur à courant continu sans balais)
<b>PI</b>	Proportionnel intégrale
<b>F.e.m</b>	Force électromotrice
<b>F.c.e.m</b>	Force contre électromotrice
<b>CC</b>	Courant continue
<b>DC</b>	Direct current
<b>MCC</b>	Moteur à courant continue
<b>AC</b>	Alternative Current
<b>PWM</b>	Pulse Width Modulation
<b>H<sub>a</sub> H<sub>b</sub> H<sub>c</sub></b>	Les capteurs de effet de Hall (a,b et c)

# *Sommaire*

Introduction générale .....	1
1 Etat de l'art sur le moteur BLDC .....	3
1.1 Introduction .....	3
1.2 Historique de moteur BLDC .....	3
1.3 Composition d'un moteur BLDC .....	4
1.4 Principe de fonctionnement de Moteurs BLDC .....	5
1.4.1 Principe de L'autopilotage .....	6
1.4.2 Capteur à effet Hall .....	6
1.5 Les avantages et les inconvénients de moteur BLDC .....	8
1.5.1 Les avantages .....	8
1.5.2 Les inconvénients.....	8
1.6 Comparaison du moteur BLDC et le moteur avec balais.....	9
1.7 Technologie des moteurs BLDC .....	9
1.7.1 Moteur BLDC à rotor extérieur .....	9
1.7.2 Moteur BLDC à rotor intérieur.....	10
1.8 Domaines d'application des machines BLDC .....	11
1.8.1 Les moteurs BLDC dans la bureautique.....	11
1.8.2 Les moteurs BLDC dans l'Automobile .....	11
1.8.3 Moteur BLDC dans l'aérospatiale.....	11
1.8.4 Moteur BLDC dans l'industrie.....	12
1.9 Conclusion.....	12
2 Modélisation, simulation et l'autopiloté trapézoïdale de moteur BLDC .....	13
2.1 Introduction .....	13
2.2 Modèle mathématique du Moteur BLDC .....	13
2.2.1 Hypothèses.....	13
2.2.2 Les Équations Électriques .....	14

2.2.3	Les équations des flux magnétiques .....	15
2.2.4	L'Équation Mécanique du Mouvement .....	18
2.2.5	Les relations de la force contre-électromotrice en fonction de position de rotor .....	18
2.2.6	Le couple électromagnétique .....	19
2.3	Autopilotage du BLDC (Commutation trapézoïdale) .....	19
2.3.1	Logique de commutation .....	19
2.4	Mise en œuvre de la commande .....	20
2.4.1	Tableau de commutation .....	22
2.5	Résultat de Simulation .....	24
2.5.1	L'Analyse des résultats .....	25
2.6	Conclusion .....	26
3	Commande en vitesse du moteur BLDC .....	27
3.1	Introduction .....	27
3.2	Commande de vitesse du moteur BLDC .....	26
3.2.1	Régulation de vitesse par PI .....	28
3.2.2	Calcul des paramètres du régulateur : .....	29
3.3	Contrôle du courant .....	31
3.4	Résultat de Simulation .....	34
3.4.1	Interprétation des résultats : .....	35
3.5	Conclusion .....	36
4	Conception et réalisation d'un banc d'essai expérimental pour la commande du moteur BLDC .....	38
4.1	Introduction .....	38
4.2	Présentation générale de la maquette .....	38
4.3	La carte commande DS1104 .....	39
4.4	L'onduleur triphasé .....	41
4.5	Carte d'interface (Commande Rapprochée) .....	41
4.6	Moteur BLDC .....	42

4.7	Résultats expérimentaux.....	43
4.7.1	Résultats expérimentaux d'autopilotage.....	43
4.8	Résultats expérimentaux de la commande en vitesse du BLDC.....	45
4.8.1	Variation de consigne de vitesse.....	45
4.8.2	L'inversion le sens de rotation.....	47
4.9	Conclusion.....	48
	Conclusion générale.....	49



## Listes des figures

Figure 1.1 Les Composant d'un moteur BLDC.....	5
Figure 1.2 Constitution du Moteur BLDC .....	6
Figure 1.3 Capteur à effet Hall dans le moteur BLDC .....	7
Figure 1.4 Moteur BLDC à rotor extérieur .....	10
Figure 1.5 Moteur BLDC à rotor interne .....	10
Figure 2.1 Types des rotors à inducteur bobiné (ici P=1).....	13
Figure 2.2 Enroulements rotorique et statorique du BLDC.....	14
Figure 2.6 Topologie d'inverseur pour la commande de BLDC.....	20
Figure 2.7 Séquences de commutation du circuit de commande d'un moteur BLDC .....	22
Figure 2.8 Les courant des phases du BLDC en fonction des signaux Hall "a", "b" et "c" .	23
Figure 2.9 la vitesse de moteur.....	24
Figure 2.10 le couple électromagnétique de moteur .....	24
Figure 2.11 les courants de moteur (Ia, Ib, Ic) .....	25
Figure 3.1 Le schéma synoptique de commande de vitesse pour un moteur BLDC .....	27
Figure 3.2 Boucle de régulation de la vitesse du moteur BLDC. ....	29
Figure 3.3 Coefficient d'amortissement du second ordre.....	31
Figure 3.4 Schéma fonctionnel à contrôle a vitesse du BLDC .....	32
Figure 3.5 Principe de génération des ordres de commande. ....	32
Figure 3.6 principe du régulateur de courant à Hystérésis.....	33
Figure 3.7 La vitesse du moteur .....	34
Figure 3.8 Les courants(ia,ib,ic) .....	35
Figure 3.9 Le couple électromagnétique de moteur.....	35
Figure 4.1 Présentation générale de la maquette.....	39
Figure 4.2 Carte dSPACE DS1104.....	40
Figure 4.3 Panel d'interface CLP1104 .....	40
Figure 4.4 L'onduleur triphasé .....	41
Figure 4.5 Le moteur BLDC utilisé .....	42
Figure 4.6 Le banc d'essai .....	43
Figure 4.7 La vitesse .....	44
Figure 4.8 la tension entre phase 1 et 2.....	44
Figure 4.9 Les signaux de capteur a effet Hall.....	44
Figure 4.10 Schéma block de la commande PI. ....	45
Figure 4.11 Résultats de la variation de vitesse .....	46
Figure 4.12 les courants dans l'essai de variation de vitesse .....	46
Figure 4.13 résultats de vitesse dans le cas de l'inversion du sens de rotation de moteur	47
Figure 4.14 les courants dans l'essai de l'inversion de rotation.....	48



## Listes des tableaux

Tableau 1.1 comparaison entre le moteur BLDC et le moteur avec balais.....	9
Tableau 2.1 tableau de commutation.....	23
Tableau 3.2 Les courants de références .....	33

**Introduction**

**Générale**

## Introduction générale

### Introduction générale

Les moteurs à courant continu sans balais (BLDC) se distinguent par leur performance et leur polyvalence, les rendant incontournables dans une multitude d'applications, notamment les systèmes de contrôle de mouvement, les variateurs de vitesse, les actionneurs d'aviation, les périphériques informatiques, les compresseurs, les applications automobiles, les appareils photo numériques, les scanners médicaux, les petits ventilateurs et les pompes. Leur popularité croissante s'explique par plusieurs avantages par rapport aux moteurs à induction traditionnels, tels qu'une densité de puissance élevée, un rendement élevé, un contrôle aisé, un fonctionnement silencieux, une forme compacte, une fiabilité accrue et une maintenance réduite. De plus, la dissipation thermique est optimisée grâce à la disposition des bobines de puissance dans le stator, tandis que les pertes au rotor sont considérablement diminuées. [1]

Les moteurs BLDC sont classés selon le type de distribution de flux : sinusoïdale et trapézoïdale. Ceux à champ électromagnétique trapézoïdal présentent un intérêt particulier pour les entraînements électriques sans capteur, car ils activent uniquement deux enroulements du moteur à chaque cycle. Cependant, leur fonctionnement exige une connaissance précise de la position du rotor (comme pour les moteurs synchrones) afin de fournir la puissance adéquate aux phases correspondantes et d'obtenir un couple maximal.

Ce mémoire vise à concrétiser deux objectifs majeurs :

- **Le développement d'un banc d'essai pratique pour le contrôle trapézoïdal d'un moteur BLDC**

Ce banc d'essai permettra de tester et d'évaluer les performances de différentes stratégies de commande.

- **L'évaluation des performances d'un régulateur de vitesse PI avec contrôle trapézoïdal d'un BLDC.** Cette évaluation permettra de déterminer l'efficacité de la commande PI dans son pilotage à l'aide d'une commande trapézoïdale.

## **Introduction générale**

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres bien distincts :

### **Chapitre 1 : Etat de l'art des moteurs BLDC**

Ce dernier présente une revue approfondie des moteurs BLDC, en détaillant leurs composants, leur principe de fonctionnement, leurs différentes typologies et en même temps les comparer aux autres types de moteurs.

### **Chapitre 2 : Modélisation, simulation et pilotage automatique trapézoïdal des moteurs BLDC**

Il est basé essentiellement sur la modélisation, la simulation et le pilotage automatique trapézoïdal des BLDC. Il formule la modélisation du stator et du rotor, et énonce les différentes techniques de pilotage trapézoïdal.

### **Chapitre 3 : Etude des régulateurs de vitesse PI pour le moteur BLDC**

Il est consacré à l'étude des régulateurs de vitesse PI pour le moteur BLDC. Il analyse les principes de base de la régulation PI, de sa mise en œuvre pour le contrôle de sa vitesse et les techniques d'optimisation des paramètres du régulateur.

### **Chapitre 4 : Implémentation et évaluation expérimentale du contrôle trapézoïdal d'un moteur BLDC**

Il décrit la phase pratique du projet. Il présente l'implantation du contrôle trapézoïdal sur un cas réel disponible au niveau des laboratoires, le suivi de l'application du contrôle PI à l'aide d'une carte dSPACE. Les résultats obtenus sont analysés et discutés, en faisant ressortir les performances du système de contrôle implémenté.

---

# Chapitre 1

---

Etat de l'art sur le moteur à courant continu  
sans balais ( Brushless DC Motor)

## 1 Etat de l'art sur le moteur BLDC

### 1.1 Introduction

Les moteurs à courant continu sans balais (BLDC) ont révolutionné le domaine de la propulsion électrique au cours des dernières décennies. Contrairement aux moteurs à courant continu traditionnels qui utilisent des balais et un collecteur pour la commutation, les moteurs BLDC utilisent des aimants permanents et une commande électronique pour générer un champ magnétique rotatif. Cette conception offre de nombreux avantages, notamment une plus grande efficacité, une meilleure fiabilité et une durée de vie plus longue.

Les moteurs BLDC sont largement utilisés dans les domaines de l'automobile, de l'électronique, de l'industrie aéronautique et de l'industrie des appareils électroménagers. Leur conception sans balais réduit le frottement et augmente l'efficacité, ce qui les rend idéaux pour les applications nécessitant une puissance élevée et une longue durée de vie.

Dans ce chapitre, on va présenter ce moteur d'une manière générale, on discutera de son historique et de son principe de fonctionnement, de ses avantages et inconvénients et les autres informations nécessaires.

### 1.2 Historique de moteur BLDC [2] [3]

Le moteur BLDC est développé sur la base de moteurs (brushed DC). La théorie de la machine moderne a été établie lorsque Faraday a découvert le phénomène de l'induction électromagnétique en 1831. Suite à cela, le premier moteur à courant continu a vu le jour dans les années 1840. Près d'un siècle plus tard, en 1915, un Américain du nom de Langmuir, a inventé le redresseur en mercure pour commander la grille de l'électrode et a conçu le convertisseur DC/AC. Contraignant les inconvénients des moteurs traditionnels, dans les années 1930, certains chercheurs ont commencé à développer des moteurs BLDC (sans balais) dans lesquels la commutation électronique a été mise en œuvre. À cause de leur non-fiabilité et de leurs faibles performances à cette époque, les moteurs BLDC n'étaient utilisés qu'au niveau des laboratoires de recherche. En 1955, Harrison et Rye ont fait la première demande de brevet pour un circuit de commutation à thyristors afin de remplacer l'équipement de commutation mécanique. Cela s'est avéré à être exactement le premier



prototype du moteur BLDC. Suite aux nombreuses expériences, le moteur à courant continu sans balais à commutation électronique a été développé à l'aide des éléments de Hall en 1962, ce qui a abouti au lancement de sa production, quelques temps plus tard. Dans les années 70, une diode à détection magnétique, dont la sensibilité était presque mille fois supérieure à ces derniers, a été utilisée avec succès pour la commande du moteur BLDC. Ces moteurs ont connu une utilisation plus vaste au fur et à mesure que l'industrie électrique et électronique se développait.

En 1978, la branche Indramat de Mannesmann Corporation de la République Fédérale d'Allemagne a officiellement lancé le moteur à courant continu sans balais et son système d'entraînement dans un salon d'exposition à Hanover, ce qui a permis au moteur BLDC d'entrer dans la phase pratique. Depuis, d'autres recherches ont été menées conduisant au développement successif des moteurs BLDC à forme d'ondes trapézoïdales et sinusoïdales. Avec la découverte des nouveaux matériaux magnétiques et le développement acquis dans la microélectronique, l'électronique de puissance, les techniques de détection, l'automatisation et la technologie de commande à la fin des années 90, les moteurs à courant continu sans balais sont devenus très attractifs. Ils ont pu s'intégrer dans plusieurs domaines et connaître un plus grand champ d'utilisation.

### 1.3 Composition d'un moteur BLDC

Les composants d'un moteur BLDC sont identiques à ceux d'un moteur à courant continu, à l'exception du collecteur [4]. Il contient :

- **D'un Stator** : Une partie fixe, le stator, muni de trois groupes de bobines, appelées les trois phases du moteur. Ces bobines fonctionnent comme des électro-aimants et permettent de générer diverses orientations du champ magnétique régulièrement réparties autour de l'axe central du moteur.[5]
- **D'un rotor** : Une partie tournante, le rotor, muni d'aimants permanents. Comme l'aiguille d'une boussole, ces aimants vont en permanence entraîner le rotor pour tenter de s'aligner sur le champ magnétique du stator. Pour une durée de vie optimale du moteur, le rotor est monté sur roulements à billes.[5]

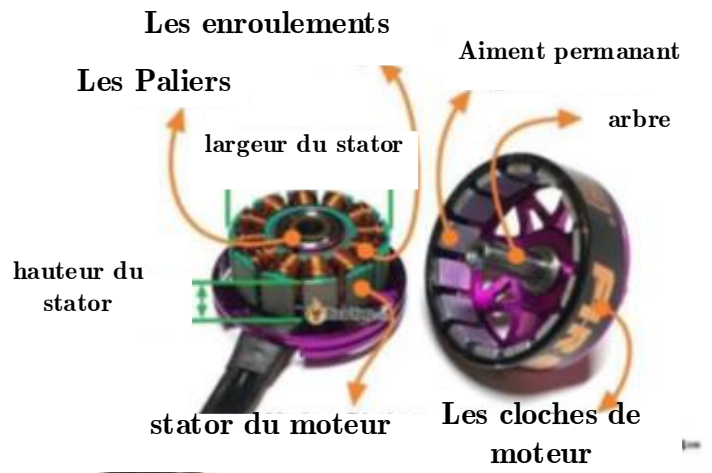


Figure 1.1 Les Composant d'un moteur BLDC [6]

#### 1.4 Principe de fonctionnement de Moteurs BLDC [1]

Théoriquement, la machine BLDC fonctionne sur le même principe que celui de la machine à courant continu conventionnel, sauf que son collecteur est remplacé par un commutateur électronique.

Dans un moteur BLDC, la commutation des enroulements est faite non pas mécaniquement comme précédemment mais de manière électronique par un système complexe appelé "contrôleur". Celui-ci transforme le courant continu en courant triphasé à fréquence variable et va alimenter successivement les bobines du moteur pour créer le champ tournant et donc la rotation qui nous intéresse. On comprend aisément qu'avec ce principe d'alimentation, il est impératif que les bobines soient fixes dans le moteur, et non pas en rotation comme dans un moteur à charbons. Tous les moteurs BLDC ont donc la même architecture de construction : un stator fixe qui porte les bobines, et un rotor mobile sur lequel les aimants permanents sont collés. Les bobinages peuvent être réalisés de manières différentes : en étoile ou en triangle (appelé également delta), mais vous trouverez toujours trois fils à la sortie du moteur, qui réunissent les bobinages.

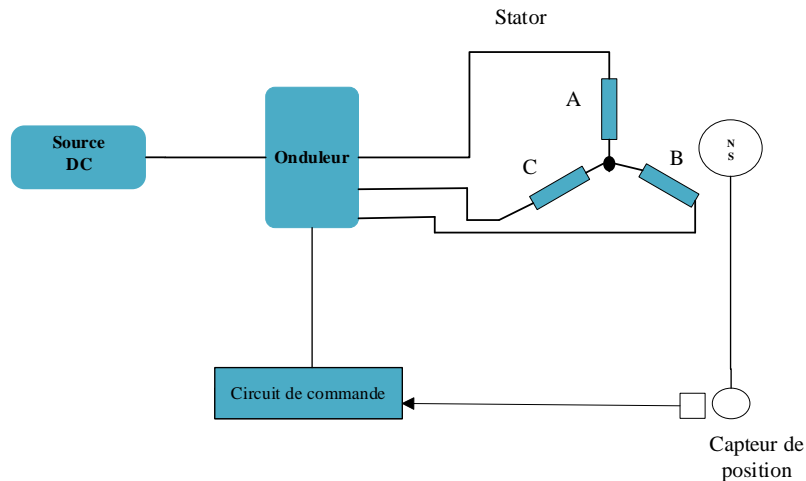


Figure 1.2 Constitution du Moteur BLDC

### 1.4.1 Principe de L'autopilotage [6]

Quel que soit le type du moteur BLDC et d'alimentation associée, le principe d'autopilotage nécessite la synchronisation des grandeurs électriques d'alimentation avec la vitesse de rotation. Les technologies utilisables passent par la mesure de la position du rotor qui peut être optique ou électromagnétique. Le capteur de position du rotor est une partie intégrée au moteur BLDC. La détection de la position du rotor peut être réalisée par deux méthodes :

- Sans capteur (sensorless)
- Avec le capteur

Pour la dernière méthode, les capteurs d'effet de Hall est le dispositif le plus généralement utilisé.

### 1.4.2 Capteur à effet Hall [7]

#### A. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du capteur Hall est basé sur l'effet Hall. Lorsque le courant traversant l'élément Hall est affecté par un champ magnétique dans la direction verticale, il sera affecté par la force de Lorentz, provoquant un déplacement latéral des charges, entraînant un déséquilibre dans la répartition des charges. Ce déséquilibre crée une différence potentielle de part et d'autre de la salle, appelée « Tension de Hall ».

La figure (1.3) montre la structure interne d'un système de base 3-pôle Moteur à courant continu sans balais. Les moteurs BLDC triphasés sont généralement équipés de trois capteurs Hall disposés à des intervalles angulaires physiques de 120 degrés pour surveiller en permanence la position du rotor.

Pendant la rotation du moteur, chaque capteur Hall produira 2 changements de niveau haut et 2 changements de niveau bas, ce qui signifie que dans une rotation complète de 360 degrés, H1, H2, H3 produira six signaux. La combinaison de ces signaux fournit le Contrôleur BLDC avec des informations précises sur la position du rotor.

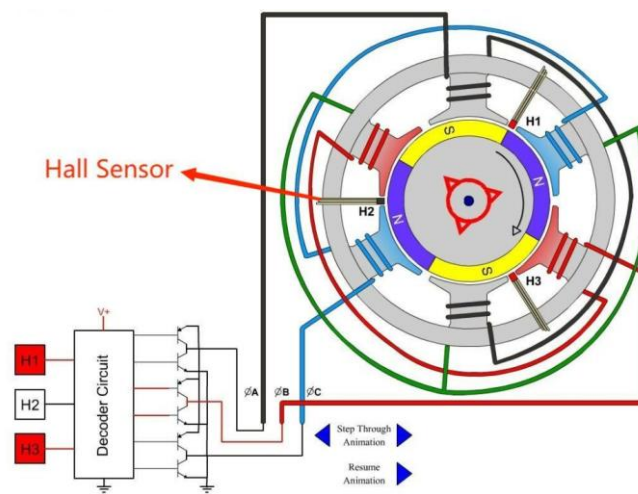


Figure 1.3 Capteur à effet Hall dans le moteur BLDC

## B. Fonction du signal Hall

- **Position des rotors :** Le signal généré par le capteur Hall indique directement la position des pôles magnétiques du rotor. Le contrôleur utilise ces signaux pour déterminer quand et comment changer la direction du courant dans les enroulements du stator pour pousser le rotor à continuer de tourner.
- **Point d'inversion :** Chaque changement du signal Hall marque un point d'inversion, le moment où la direction du courant doit être changée.
- **Informations sur la vitesse :** En mesurant la fréquence du signal du capteur Hall, la vitesse du moteur peut être dérivée.

## 1.5 Les avantages et les inconvénients de moteur BLDC

### 1.5.1 Les avantages [8]

- **Durée de vie et fiabilité :** La durée de fonctionnement (environ 20000 heures) est similaire aux moteurs AC et jusqu'à 4 fois plus longue qu'un moteur DC avec balais. Les problèmes liés à l'impact des charbons sur le collecteur sont résolus : moins de parasites, moins d'échauffement du collecteur et de pertes causées par l'étincelage, moins d'usure mécanique (à l'exception des roulements).
- **Encombrement et poids :** Plus petit que les moteurs AC et DC, un moteur sans balai présente également une légèreté de 2 à 3 fois supérieure à celle d'un moteur DC classique. Le moteur BLDC sera donc bien plus performant en termes de puissance, même avec un poids et un encombrement identique.
- **Consommation électrique :** Le rendement est nettement supérieur à celle d'un moteur DC classique à balais (sans chute de tension au niveau du collecteur et sans friction). La gestion électronique vise à maximiser le rendement.
- **Niveau sonore :** Le moteur sans balai produit moins de bruit et de vibrations que les autres types de moteur. La facilité de modification de vitesse facilite également la recherche du point de fonctionnement le plus silencieux.

### 1.5.2 Les inconvénients

- **Coût :** Les moteurs BLDC sont généralement plus chers que les moteurs à courant continu avec balais
- **Refroidissement :** Les moteurs BLDC peuvent générer de la chaleur, ce qui peut nécessiter un système de refroidissement.
- **Complexité :** La commande électronique des moteurs BLDC est plus complexe que celle des moteurs à courant continu avec balais

## 1.6 Comparaison du moteur BLDC et le moteur avec balais

Le tableau (1.1) illustre la comparaison entre le moteur à courant continu avec balais et les moteurs BLDC :

Caractéristique	Moteur BLDC	Moteur à courant continu avec balais
Commutation	Électronique	Balais et collecteur
Complexité	Plus complexe	Plus simple
Coût	Plus cher	Moins cher
Efficacité	Plus élevée	Moins élevée
Durée de vie	Plus longue	Plus courte
Bruit	Plus silencieux	Plus bruyant
Maintenance	Moins nécessaire	Plus nécessaire
Sensibilité aux surtensions	Plus sensible	Moins sensible

Tableau 1.1 comparaison entre le moteur BLDC et le moteur avec balais

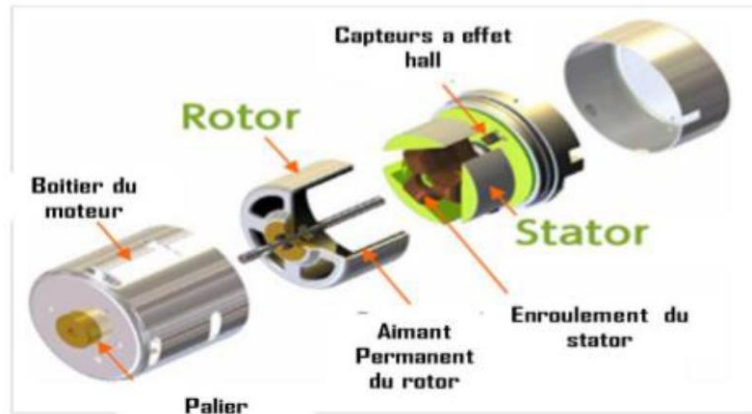
## 1.7 Technologie des moteurs BLDC

### 1.7.1 Moteur BLDC à rotor extérieur [8]

On appelle « à rotor extérieur » les moteurs BLDC dont le rotor est autour du stator. Cette configuration est intéressante en termes de couple moteur, car les aimants sont disposés sur un diamètre important. De plus, cette disposition permet de placer facilement plusieurs séries d'aimants (jusqu'à 32 pôles sur certains moteurs BLDC à rotor extérieur).

Ces moteurs BLDC à rotor extérieur sont souvent utilisés dans des applications qui nécessitent un fort couple, car ils peuvent être reliés à la charge sans nécessiter de dispositif de réduction. Leur coefficient de tension  $K_v$  est relativement faible par rapport aux autres types de moteurs BLDC.

Les principales applications des moteurs BLDC à rotor extérieur sont les suivantes : ventilateurs, moteurs de disques durs, moteurs de vélos électriques.



1.4 Moteur BLDC à rotor extérieur [5]

### 1.7.2 Moteur BLDC à rotor intérieur

Les moteurs à courant continu sans balais (BLDC) à rotor interne sont un type de moteur électrique de plus en plus populaire dans une variété d'applications, y compris l'aéromodélisme. Ils sont connus pour leur rendement élevé, leur couple élevé, leur fonctionnement silencieux et leur longue durée de vie.

Les principales caractéristiques des moteurs BLDC à rotor interne c'est : les aimants permanents sont situés à l'intérieur du rotor, ce qui permet une conception plus compacte et plus légère. Aussi les bobines électromagnétiques sont situées à l'extérieur du stator, ce qui facilite le refroidissement et la maintenance.



Figure 1.5 Moteur BLDC à rotor interne

## **1.8 Domaines d'application des machines BLDC**

### **1.8.1 Les moteurs BLDC dans la bureautique**

Les moteurs BLDC sont largement utilisés dans les équipements bureautiques et périphériques informatiques, améliorant la qualité et la valeur de ces produits. Ils peuvent être utilisés sur disques durs, disques optiques et lecteurs de CD, réduisant le bruit, travaillant à des températures élevées et supportant certains niveaux de vibration. Les moteurs BLDC répondent également aux exigences des ventilateurs de refroidissement informatique, offrant une construction compacte, une longue durée de vie et moins de bruit. Ils sont également utiles dans les duplicateurs, les télécopieurs, les enregistreurs, les lecteurs de DVD LD et les déchiqueteurs de papier. [9]

### **1.8.2 Les moteurs BLDC dans l'Automobile**

L'automobile est un bien indispensable et très demandée, et les chercheurs cherchent à développer et rendre plus confortable. Les moteurs à aimants permanents, en particulier les moteurs BLDC, sont utilisés pour l'entraînement automobile, climatiseurs, balais d'essuie-glaces, airbags, portes électriques, sièges électriques, vitres électriques, etc. Les moteurs BLDC obtiennent une plus grande portée d'application et sont dominants en techniques de régulation de vitesse. La stratégie de commande sans capteurs permettra de développer des systèmes d'entraînement à moteur BLDC pour automobiles, car ils occupent un volume important et augmentent le coût des moteurs. [9]

### **1.8.3 Moteur BLDC dans l'aérospatiale**

Les dispositifs de transmission pneumatiques et hydrauliques sont remplacés par des entraînements motorisés équipements, ce qui est une tendance dans l'industrie aérospatiale. En raison de son application particulière, dans l'industrie aérospatiale, les moteurs doivent être de petite taille avec une structure simple. Le spécial, la structure et la méthode de contrôle sans capteur de position des moteurs BLDC leur permettent d'être largement utilisés dans l'industrie aérospatiale. Dans cette condition, Le moteur BLDC fonctionne souvent à charge variable, qui demande une bonne régulation à haute vitesse et une réponse dynamique. Dans l'aérospatiale, certains moteurs BLDC, tels que les moteurs utilisés dans les pompes centrifuges à grande vitesse et caméras à grande vitesse, pourraient atteindre la



vitesse de dizaines de milliers de tr/min ou plus. Dès lors, il est nécessaire de considérer les exigences et les solutions de performances mécaniques et électriques lorsqu'il fonctionne à grande vitesse. [10]

#### 1.8.4 Moteur BLDC dans l'industrie

Un système de commande de moteur BLDC est un produit d'intégration électromécanique qui combine les avantages des systèmes de commande de moteurs à courant continu à balais et de moteurs asynchrones à courant alternatif. Compte tenu des performances et du coût du produit. De nos jours les moteurs BLDC occupent une grande place part dans les robots. La place des moteurs pas à pas et des servomoteurs à courant continu traditionnels entraînant des robots haute puissance. Les moteurs BLDC ont également une bonne perspective d'application dans certaines occasions, telles que les basses vitesses, des circonstances défavorables. Pour exemple, dans les applications des entraînements de moteur de traction d'ascenseur sans engrenage, Transmission des laminoirs, ils ont les avantages d'une réponse 24 de vitesse dynamique rapide, petite erreur de suivi et rapport de différence statique, et large gamme de régulation de vitesse. [10]

### 1.9 Conclusion

Ce chapitre a présenté étude détaillée du moteur BLDC, en couvrant son principe de fonctionnement, son évolution historique, ses différentes typologies, ses domaines d'application et sa comparaison détaillée avec les moteurs à courant continu à balais (MCC). Nous avons mis l'accent sur les caractéristiques distinctives du moteur BLDC, notamment sa robustesse, sa fiabilité électromécanique, son rendement élevé, son couple important et son potentiel d'amélioration de la vitesse. Ces caractéristiques remarquables font du moteur BLDC un choix privilégié pour une large gamme d'applications. Le chapitre suivant a approfondi nos connaissances sur le fonctionnement du moteur BLDC en explorant en détail la commande trapézoïdale, qui joue un rôle crucial dans le contrôle efficace de ce type de moteur.

---

# Chapitre 02

---

Modélisation, simulation et l'autopilote

Trapézoïdale de moteur BLDC

## 2 Modélisation, simulation et l'autopiloté trapézoïdale de moteur BLDC

### 2.1 Introduction

La conception d'un moteur BLDC nécessite une attention particulière. Effectivement, la tension générée par les aimants n'est pas sinusoïdale, ce qui rend impossible l'utilisation de la transformée de Park dans la modélisation. Pour représenter cette machine, il est indispensable d'utiliser les variables de phase (abc). Cette modélisation entraînera une légère augmentation du temps de simulation.[11]. L'objectif de cette partie est de détailler la modélisation de la BLDC. En fin, nous donnons les résultats de la simulation en boucle ouverte pour le régime statique et de démarrage du moteur.

### 2.2 Modèle mathématique du Moteur BLDC

Les machines électriques synchrones se compose, d'un stator et d'un rotor séparés par un entrefer. La figure 2.1 montre un rotor à pôles saillants et à pôle lisse constitué d'aimants permanents ou d'électro-aimants alimentés en courant continu.[12]

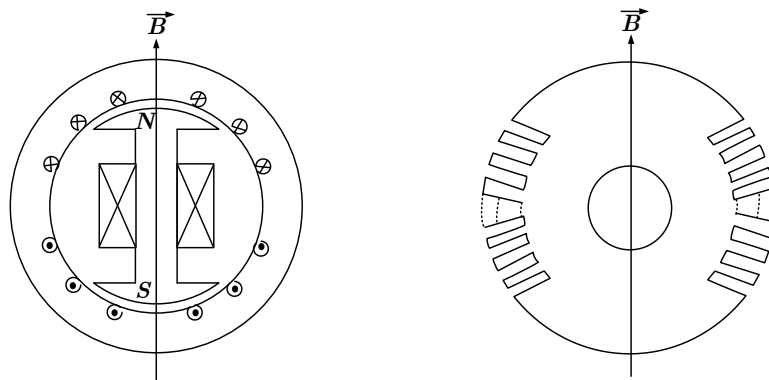


Figure 2.1 Types des rotors à inducteur bobiné (ici  $P=1$ ).

Pôles saillants  $L_d > L_q$

pôles lisses  $L_d = L_q$

Dans notre cas le moteur BLDC à aimant permanent se modélise comme une machine à pôle lisse.

#### 2.2.1 Hypothèses [12]

Pour mener à bien l'objectif assigné à cette section, il est nécessaire d'adopter certaines hypothèses simplificatrices :

- Le circuit magnétique de la machine n'est pas saturé, ce qui conduit à exprimer les flux magnétiques comme fonction linéaire des courants de phase. La saturation magnétique ne sera pas considérée dans nos équations ;
- La symétrie des trois bobines du stator sera considérée.
- La densité du flux magnétique créée par les pôles du rotor est trapézoïdale
- Les trois phases du stator sont raccordées en étoile et le neutre est inaccessible
- L'effet de la température sur les résistances est négligeable ;
- Les effets des courants induits ou courant de Foucault sont considérés comme négligeables.

### 2.2.2 Les Équations Électriques [11] [6]

La figure suivante montre le schéma électrique du BLDC :

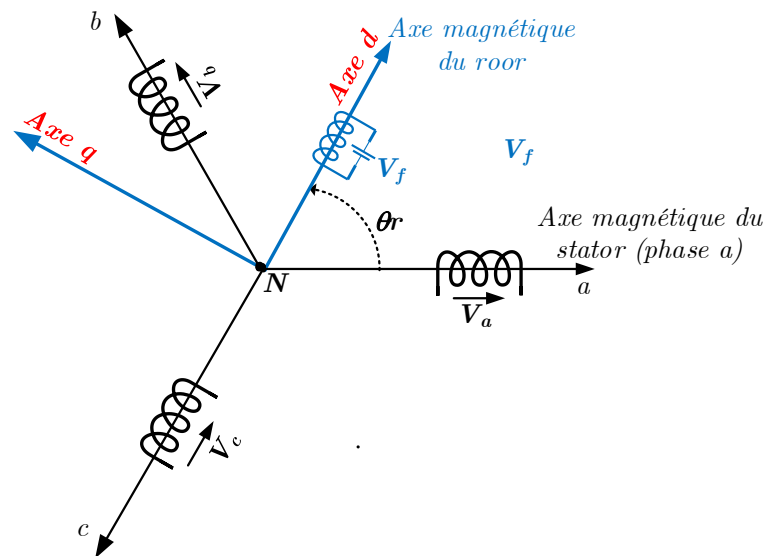


Figure 2.2 Enroulements rotorique et statorique du BLDC [12]

Partant de la définition de l'équation de la tension aux bornes d'une bobine et par application de la loi de Faraday, on a les tensions aux bornes des différents enroulements :

- **Les équations des tensions statoriques et rotoriques en fonction des flux magnétiques :**

$$\begin{cases} V_{an} = Ri_a + \frac{d\phi_a}{dt} \\ V_{bn} = Ri_b + \frac{d\phi_b}{dt} \\ V_{cn} = Ri_c + \frac{d\phi_c}{dt} \\ V_r = R_r i^F + \frac{d\phi_r}{dt} \end{cases} \quad (2.1)$$

### 2.2.3 Les équations des flux magnétiques

Les flux totalisés dans les bobines sont la somme des influences des courants circulant dans ces dernières.

$$\begin{cases} \varphi_a = L_{aa}i_a + L_{ab}i_b + L_{ac}i_c + L_{sr,af}i^F \\ \varphi_b = L_{ab}i_a + L_{bb}i_b + L_{bc}i_c + L_{sr,bf}i^F \\ \varphi_c = L_{ac}i_a + L_{bc}i_b + L_{cc}i_c + L_{sr,cf}i^F \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\begin{cases} \phi_{Ma} = L_{sr,af}i^F \\ \phi_{Mb} = L_{sr,bf}i^F \\ \phi_{Mc} = L_{sr,cf}i^F \end{cases} \quad (2.3)$$

A partir des équations (2.1), (2.2) et (2.3) et pour un enroulement triphasé symétrique équilibré ; le vecteur des tensions aux bornes des trois phases est donné par :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{pmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ab} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{bc} & L_{cc} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Où  $[e_{abc}] = \frac{d[\phi_{M,abc}]}{dt}$  représente la force électromotrice,  $[e_{abc}] = \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$  et  $[\phi_{M,abc}] = \begin{bmatrix} \phi_{Ma} \\ \phi_{Mb} \\ \phi_{Mc} \end{bmatrix}$

Les inductances et les mutuelles sont constantes pour les aimants permanents montés sur la surface du rotor cylindrique, lorsque les enroulements sont symétriques, les inductances propres sont identiques, données par :

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L \quad (2.5)$$

Et les inductances mutuelles sont également identiques, données par :

$$L_{ac} = L_{ab} = L_{ba} = L_{bc} = L_{ca} = L_{cb} = M \quad (2.6)$$

Les équations sous la forme matricielle (2.4) deviennent :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{pmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{pmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Où  $V_n$  : tension ligne-neutre appliquée au stator,  $R$  : résistance statorique de phase,  $i$  : courant de phase,  $L$  : inductance propre,  $M$  : inductance mutuelle et  $e$  : force électromotrice.

Étant donné que la machine est connectée en étoile, il est possible de faire la simplification suivante :

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad \Rightarrow \quad i_b + i_c = -i_a$$

Pour une phase, les inductances peuvent s'écrire :

$$Li_a + Mi_b + Mi_c = Li_a + M(-i_a) = (L - M)i_a \quad (2.8)$$

La méthode est répétée pour les deux autres phases et le modèle prend la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{pmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} L' & 0 & 0 \\ 0 & L' & 0 \\ 0 & 0 & L' \end{pmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Où  $L' = (L - M)$  représente l'inductance équivalente d'une phase.

Le problème avec cette représentation est qu'il est nécessaire de mesurer la tension ligne-neutre qui est appliquée à la machine. Cette tension n'est pas mesurable sur cette machine car le neutre est généralement inaccessible. De plus, étant donné que les tensions sont non sinusoïdales, la composante homopolaire n'est pas nulle, donc la tension du neutre de la machine varie dans le temps. Pour corriger ce problème, le modèle sera transformé afin d'accepter les tensions ligne-ligne. [1]

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn} = R(i_a - i_b) + L' \left( \frac{di_a}{dt} - \frac{di_b}{dt} \right) + e_a - e_b \quad (2.10)$$

$$V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} = R(i_b - i_c) + L' \left( \frac{di_b}{dt} - \frac{di_c}{dt} \right) + e_b - e_c \quad (2.11)$$

Mais  $i_c = -(i_a + i_b)$  donc, l'équation (2.11) devient :

$$V_{bc} = R(i_b + i_a + i_b) + L\left(\frac{di_b}{dt} + \frac{d i_a}{dt} + \frac{d i_b}{dt}\right) + e_b - e_c \quad (2.12)$$

Le modèle peut donc s'écrire sous la forme :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} R & -R \\ R & 2R \end{pmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left( \begin{pmatrix} L' & -L' \\ L' & 2L' \end{pmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \right) + \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

A partir des équations (2.10) et (2.12), il est possible de transformer le modèle :

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L'} \left[ V_{ab} - (R(i_a - i_b)) - L' \frac{di_b}{dt} + e_a - e_b \right] \quad (2.14)$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{2L'} \left[ V_{bc} - (R(i_a + 2i_b)) - L' \frac{di_a}{dt} + e_a - e_b \right] \quad (2.15)$$

Il suffit maintenant de découpler les deux équations pour les mettre sous une forme de représentation d'état. Pour ce faire, l'équation (2.15) est remplacée dans l'équation (2.10) et (2.14) dans (2.12). La représentation d'état est donc la suivante :

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{3L'} [2V_{ab} + V_{bc} - 3Ri_a - 2e_a + e_b + e_c] \quad (2.16)$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{3L'} [-V_{ab} + V_{bc} - 3Ri_b + e_a - 2e_b + e_c] \quad (2.17)$$

Le modèle d'état peut alors s'écrire comme suit :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = \left( \frac{1}{3L'} \right) \left( \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \end{bmatrix} - \begin{pmatrix} 3R & 0 \\ 0 & 3R \end{pmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \right) \quad (2.18)$$

Les paramètres " $L_s$ ", " $R_s$ " et " $V_{ab}, V_{bc}$ " sont généralement connus. De plus, la valeur crête de la tension interne " $e_{abc}$ " est facilement mesurable. Par contre, étant donné que la distribution spatiale des enroulements est non sinusoïdale, il est difficile d'obtenir la forme analytique de la tension induite. La section qui suit traitera des hypothèses faites afin de déterminer  $e_{abc}$ .

#### 2.2.4 L'Équation Mécanique du Mouvement [6]

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

$$J \frac{d\omega}{dt} = C_e - C_r - f\omega \quad (2.19)$$

Où :

$\omega$  : est la vitesse angulaire du moteur en rad/s.

$C_e$  : est le couple électromagnétique développé en N/m.

$C_r$  : est le couple de charge en N/m.

$J$  : est le moment d'inertie des parties tournantes de la machine en  $N.m.s^2 / rad$ .

$f$  : est le coefficient de frottement  $N.m.s / rad$

### 2.2.5 Les relations de la force contre-électromotrice en fonction de position du rotor

La force contre-électromotrice produite par phase peut être donnée par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} e_a &= k_v \omega_r F(\theta) \\ e_b &= k_v \omega_r F\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_c &= k_v \omega_r F\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (2.20)$$

où les fonctions  $F(\theta)$ ,  $F\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)$  et  $F\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right)$  c'est les force de champ magnétique ont la même forme que les forces contre-électromotrices d'amplitude maximale de 1 ou -1. Ces formes d'onde peuvent être générées par les équations suivantes :

$$F(\theta) = \begin{cases} 1 & 0 \leq \theta < \frac{2\pi}{3} \\ 1 - \frac{6}{\pi} \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{2\pi}{3} \leq \theta < \pi \\ -1 & \pi \leq \theta < \frac{5\pi}{3} \\ -1 + \frac{6}{\pi} \left( \theta - \frac{5\pi}{3} \right) & \frac{5\pi}{3} \leq \theta < 2\pi \end{cases} \quad (2.21)$$

### 2.2.6 Le couple électromagnétique

La puissance électromagnétique en fonction des forces contre-électromotrices donne :



$$P_{em} = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (2.22)$$

Et on peut l'écrire la puissance en fonction du couple et de la vitesse :

$$P_{em} = \omega_r * C_e \quad (2.23)$$

A travers les équations (2.24) et (2.25) on obtient :

$$\omega_r * C_e = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (2.24)$$

Alors l'expression de couple électromagnétique est :

$$C_e = k_v \left[ F(\theta) i_a + F\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) i_b + F\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) i_c \right] \quad (2.25)$$

### 2.3 Autopilotage du BLDC (Commutation trapézoïdale)

La méthode en 6 étapes est l'une des méthodes les plus simples pour piloter des moteurs BLDC triphasés. Il est également appelé trapézoïdal à 120°, car il entraîne chaque enroulement sur 120° de rotation électrique et laisse l'enroulement non entraîné sur 60°. Notez que bien que la méthode d'entraînement soit simple, ce manque d'entraînement à 60° entraîne également une ondulation de couple plus élevée dans l'application finale. [13]

#### 2.3.1 Logique de commutation

Pour faire tourner un moteur constitué de trois bobines au stator, six étapes distinctes sont nécessaires pour que le champ fasse un tour complet dans chacune d'elles, avec le courant passant à travers deux bobines tandis que la troisième a un potentiel flottant. Pour assurer un fonctionnement fluide du moteur, les commutations doivent être synchronisées avec la position précise du rotor, souvent détectée par des capteurs à effet Hall. Typiquement, trois de ces capteurs sont utilisés dans les moteurs BLDC pour leurs trois phases connectées en étoile, permettant ainsi huit combinaisons de signaux différents. Parmi celles-ci, les combinaisons 000 et 111 ne se forment jamais, laissant six combinaisons pour les six positions de rotor ou étapes fondamentales d'une rotation de moteur BLDC.

On résume tout ça dans la figure (2.6) qui explique l'autopilotage de moteur BLDC.

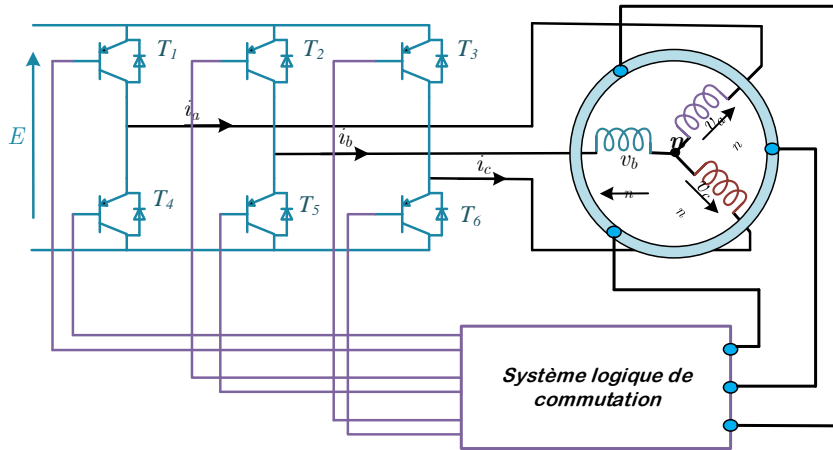


Figure 2.6 Topologie d'inverseur pour la commande de BLDC

## 2.4 Mise en œuvre de la commande

Le système électronique de commande doit assurer la commutation du courant dans les enroulements statoriques ce dispositif peut être, soit intégré au moteur de petite puissance, soit à l'extérieur sous la forme d'un convertisseur de puissance.

Le rôle de l'ensemble capteur électronique de commande est d'assurer l'autopilotage du moteur Nous supposons que :

- les trois phases du moteur sont entièrement symétriques et produisent des FEMs induites
- périodiques de formes trapézoïdales ;
- les paramètres du moteur sont constants ;
- le temps de commutation entre les phases est séparé avec  $60^\circ$  électrique ;
- le circuit magnétique est linéaire (absence de saturation) ;
- les six transistors T1, T2, T3 et T4, T5, T6 ont des caractéristiques identiques, Dans l'état "OFF" ils sont modélisés comme des impédances infinies et dans l'état "ON" ils sont représentés respectivement par une tension de seuil  $V_t$ . [6]

Un moteur triphasé BLDC nécessite trois capteurs à effet Hall pour détecter la position du rotor. Dans cette figure la position physique des capteurs à effet Hall est telle que les signaux captés sont déphasés de  $120^\circ$ . La combinaison de ces trois signaux de capteur à effet Hall peut déterminer la séquence exacte de commutation. [1]

La figure (2.7) montre la séquence de commutation d'un circuit pilote de moteur BLDC triphasé pour une rotation dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Trois capteurs Hall « a », « b » et « c » sont montés sur le stator à des intervalles de  $120^\circ$ , tandis que les enroulements triphasés sont couplés en étoiles. Pour chaque rotation de  $60^\circ$ , l'un des capteurs Hall change d'état ; il faut six étapes pour compléter un cycle électrique complet. En mode synchrone, la commutation du courant de phase est mise à jour tous les  $60^\circ$ . Pour chaque étape, il y a une borne du moteur entraînée en haut, une autre borne du moteur entraînée en bas, la troisième étant laissée flottante. Les commandes d'entraînement individuelles pour les pilotes haut et bas permettent un entraînement haut, un entraînement bas et un entraînement flottant à chaque borne du moteur. [14]

Cependant, un cycle de signal peut ne pas correspondre à un tour mécanique complet. Le nombre de cycles de signal pour effectuer une rotation mécanique est déterminé par le nombre de paires de pôles du rotor. Chaque paire de pôles du rotor nécessite un cycle de signal en une rotation mécanique. Ainsi, le nombre de cycles de signal est égal aux paires de pôles du rotor. [14]

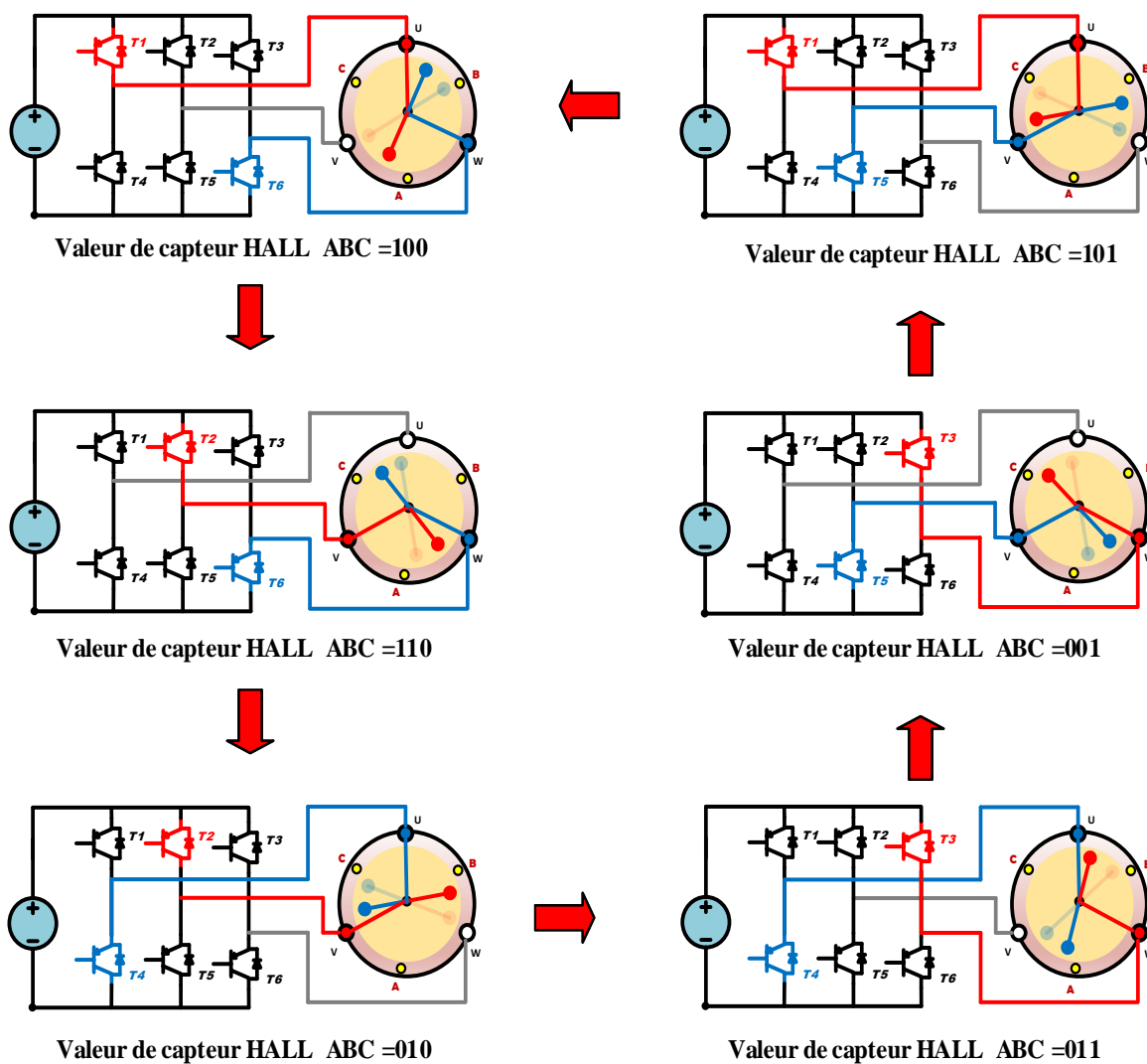


Figure 2.7 Séquences de commutation du circuit de commande d'un moteur BLDC

### 2.4.1 Tableau de commutation

Le tableau (2.1) montre l'ordre dans lequel les interrupteurs d'alimentation doivent être commutés en fonction des entrées de capteur Hall, a, b et c. Ceci est un exemple de signaux de capteur Hall ayant un déphasage de 120 degrés les uns par rapport aux autres. Les capteurs à effet Hall peuvent être à 60 degrés ou 120 degrés de déphasage les uns par rapport aux autres. Lors de la dérivation d'un contrôleur pour un moteur particulier, la séquence définie par le fabricant du moteur doit être suivie.

$H_a$	$H_b$	$H_c$	$T_1$	$T_4$	$T_2$	$T_5$	$T_3$	$T_6$
1	0	0	1	0	0	0	0	1
1	1	0	0	0	1	0	0	1
0	1	0	0	1	1	0	0	0
0	1	1	0	1	0	0	1	0
0	0	1	0	0	0	1	1	0
1	0	1	1	0	0	1	0	0

Tableau 2.1 tableau de commutation

Simplification de système :

$$\begin{cases} T_1 = H_a \bar{H}_b \\ T_4 = \bar{H}_a H_b \end{cases}, \quad \begin{cases} T_2 = H_b \bar{H}_c \\ T_5 = \bar{H}_b H_c \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} T_3 = \bar{H}_a H_c \\ T_6 = H_a \bar{H}_c \end{cases}$$

La figure (2.8), montre les courants qui parcourus entre les phases du BLDC en fonction des signaux de sorties des trois capteurs à effet Hall "a", "b" et "c". Les enroulements de phase U, V et W sont soit sous tension soit flottant en fonction des signaux du capteur à effet de Hall qui présentent un déphasage de 120° les uns par rapport aux autres, lorsque le moteur tourne dans le sens antihoraire.

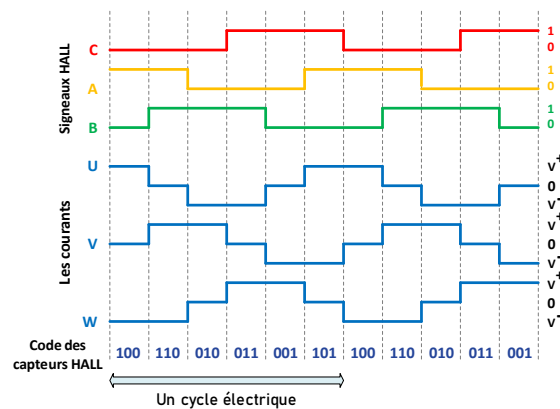


Figure 2.8 Les courant des phases du BLDC en fonction des signaux Hall "a", "b" et "c"

À partir de ces signaux, on peut obtenir la chronologie avec laquelle les enroulements des phases « U », « V » et « W » sont soit excités soit flottés. Il est à noter que, le sens horaire est choisi comme sens de rotation du moteur. [8]

## 2.5 Résultat de Simulation

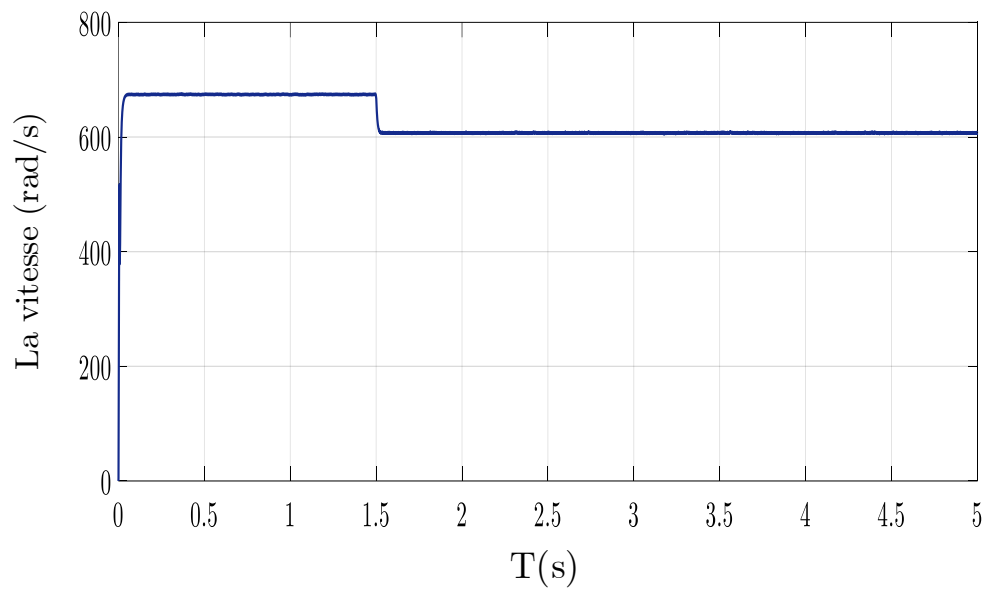


Figure 2.9 la vitesse de moteur

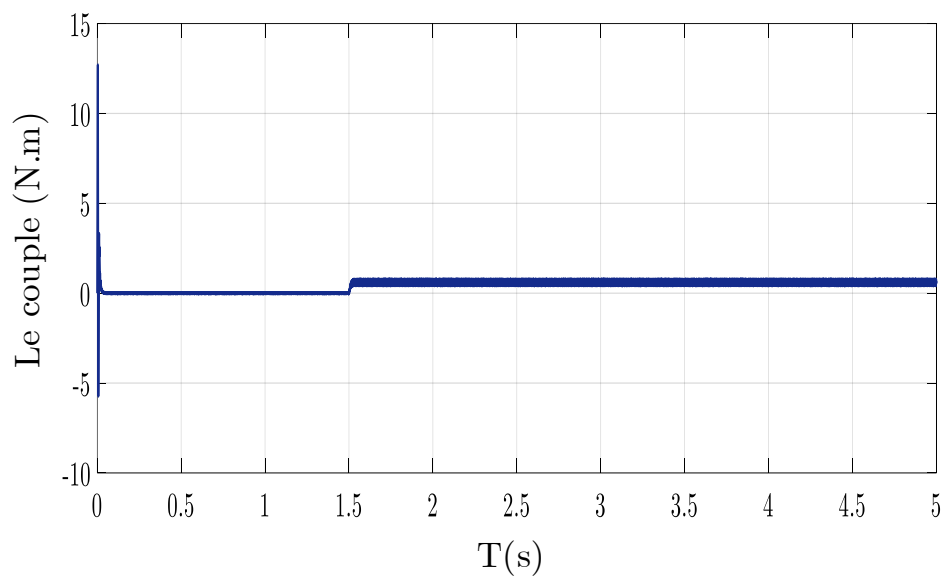
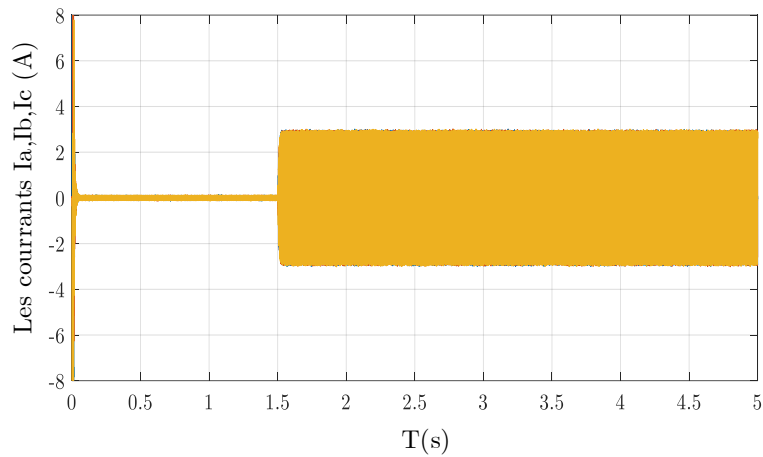
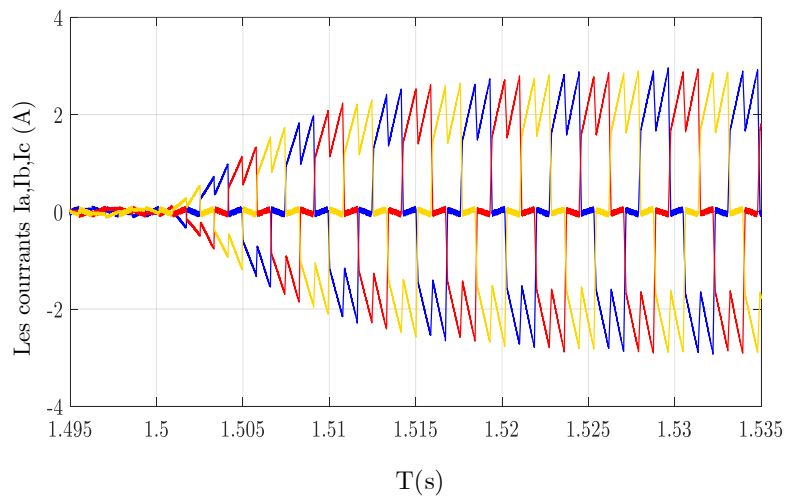


Figure 2.10 le couple électromagnétique de moteur



A : Résultats des courants



B : Zoom des courants Ia,Ib,Ic en charge

Figure 2.11 les courants de moteur ( $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ )

### 2.5.1 L'Analyse des résultats

#### Intervalle 1 : [0 1.5]

La réponse de vitesse pour la BLDC se stabilise à 657 rad/s dans un temps d'établissement de 0.05 s après un régime transitoire à vide où la vitesse augmente linéairement

Le couple électromécanique est pulsatoire dans le régime transitoire atteint 13 Nm comme une valeur maximale à cause des bruits engendrés par les parties mécaniques puis se stabilise à une valeur faible de 0.20 Nm parce que le coefficient de frottement n'est pas nul.

Quant à la courbe du courant on remarque qu'il y a un grand appel de courant son amplitude atteint 8 A (pique de courant) dans la première phase cela montre le besoin du moteur en énergie au démarrage, puis se stabilise à la valeur (0.3 A, -0.3 A).

**Intervalle 2 : [1.5 4.5]**

En appliquant un couple de charge de 0,6 Nm 1,5 seconde après le démarrage du moteur, on constate ce qui suit :

La vitesse diminue de 657 rad/s à 605 rad/s lorsque ce couple de charge est appliqué.

Le couple se stabilise après la première étape à une valeur de couple résistant de 0,6 Nm (après application du couple résistant).

Le courant dépasse les valeurs de test à vide de (0,3A, -0,3A) à (3A, -3A) en raison des charges.

Enfin, nous concluons que le couple résistant et la vitesse ont une relation directe et que, à mesure que le couple résistant augmente, le courant électrique augmente.

**2.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons procédé à la modélisation mathématique et à la construction du modèle Simulink d'un moteur BLDC. Nous avons représenté l'onduleur de tension ainsi que les différents composants de la structure de l'autopilotage.

Ce modèle sera appliqué dans le troisième chapitre pour examiner comment un contrôleur PI en commande trapézoïdale régule la vitesse d'un moteur BLDC.



---

# Chapitre 03

---

Commande en vitesse du moteur BLDC

### 3 Commande en vitesse du moteur BLDC

#### 3.1 Introduction

Les moteurs à courant continu sans balais (BLDC) se démarquent par leur efficacité énergétique, leur faible maintenance et leur précision, ce qui les rend incontournables dans une multitude d'applications industrielles. La maîtrise de leur vitesse est essentielle pour garantir des performances optimales et une adaptabilité à des exigences variées. Parmi les techniques de commande employées, deux grandes catégories se distinguent : les commandes non linéaires et les commandes linéaires. Ce chapitre se focalisera sur la commande de vitesse par régulateur PI, une approche linéaire efficace pour les applications basiques à moyennes exigences.

#### 3.2 Commande de vitesse du moteur BLDC

Les moteurs BLDC (Brushless DC Motor) sont des moteurs à courant continu sans balais, appréciés pour leur précision, leur rendement élevé et leur faible maintenance. Leur commande de vitesse joue un rôle crucial dans leur performance et leur adaptabilité à diverses applications. Parmi les techniques de commande employées, on distingue deux grandes catégories : Commandes non linéaires comme : mode glissant, Lyaponov, logique floue, Commandes linéaires comme régulateur PI, DTC.etc. Dans le cadre de notre étude, nous nous concentrerons sur la commande de vitesse par régulateur PI, Cette technique, bien que linéaire, permet d'obtenir une commande efficace pour des applications basiques à moyennes exigences.

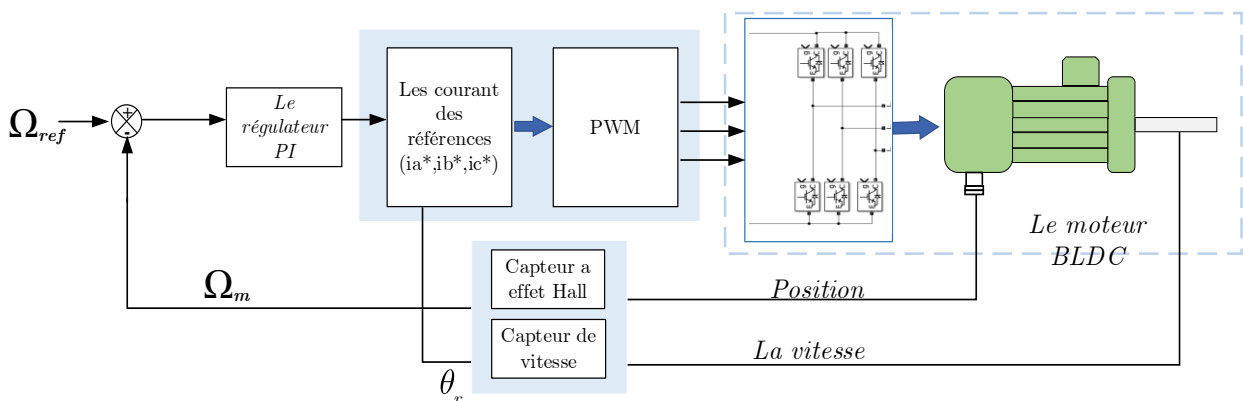


Figure 3.1 Le schéma synoptique de commande de vitesse pour un moteur BLDC

### 3.2.1 Régulation de vitesse par PI

La commande PI (Proportionnel-Intégral) est une stratégie de contrôle largement utilisée dans divers systèmes dynamiques, y compris les moteurs BLDC. Le correcteur de type PI est une régulation de type P auquel on a ajouté un terme intégral, il élabore alors une commande qui peut être donnée par la relation suivante [15] :

$$c(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt \quad (3.1)$$

La fonction de transfert Laplace est :

$$c(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (3.2)$$

$K_p$  : gain proportionnel,  $K_i$  : gain intégré,  $s$  : Opérateur Laplace.  $e(t)$  : signal erreur d'entrée.

La commande PI pour un moteur BLDC s'articule autour de plusieurs étapes cruciales :

- A. **Acquisition de la vitesse de rotation** : Le capteur de vitesse, souvent une génératrice tachymétrique, joue un rôle central en mesurant la variation de la position du rotor sur un intervalle de temps défini. Cette mesure permet de déterminer la vitesse de rotation instantanée du moteur.
- B. **Comparaison à la consigne** : La vitesse mesurée est ensuite confrontée à la vitesse de consigne, définie par l'utilisateur en fonction des besoins de l'application. Cette comparaison génère une erreur de vitesse, élément clé du processus de commande.
- C. **Calcul du couple de référence** : Le régulateur PI entre en action en calculant le couple électromagnétique de référence nécessaire pour corriger l'erreur de vitesse. Pour ce faire, il combine deux composantes :
  - **Composante proportionnelle ( $K_p$ )** : Elle agit proportionnellement à l'erreur de vitesse, générant une correction immédiate pour réduire l'écart entre la vitesse mesurée et la consigne.

- **Composante intégrale (Ki) :** Elle intègre l'erreur de vitesse au fil du temps, permettant d'éliminer toute erreur résiduelle et d'assurer une convergence précise vers la consigne.

### 3.2.2 Calcul des paramètres du régulateur :

À travers l'équation mécanique obtenue dans le chapitre 02 et l'utilisation de transformation de la place ont déterminé la fonction transfert :

$$G(s) = \frac{1}{Js + f} \quad (3.3)$$

Les paramètres du régulateur de vitesse sont calculés par la méthode des placements de pôles. A partir du schéma de la figure (3.3).[10]

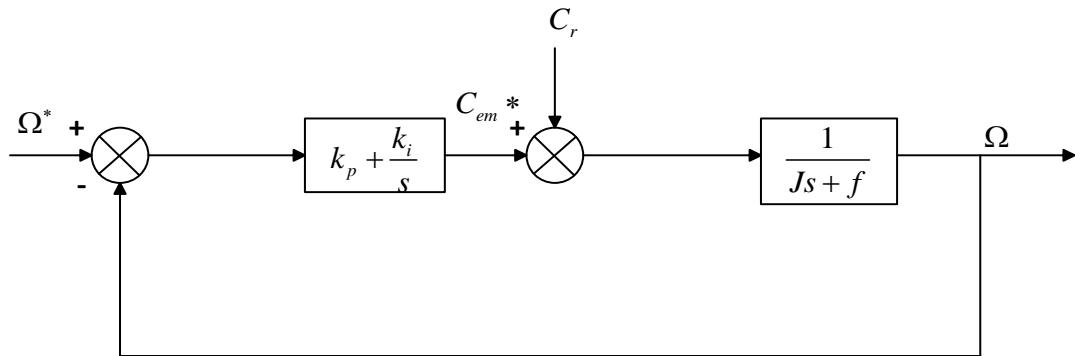


Figure 3.2 Boucle de régulation de la vitesse du moteur BLDC.

Nous savons que la dynamique de la machine, pour le contrôle de la vitesse ou de la position, est donnée par l'équation mécanique (3.4), et sa donne ça :

$$\frac{\omega}{C_e} = \frac{1}{Js + f} \quad (3.4)$$

La fonction de transfert boucle fermée du système corrigé est donnée par :

$$f_{bf} = \frac{G(s)}{1 + G(s)} \quad (3.5)$$

$$f_{bf} = \frac{\omega(s)}{\omega^*} = \frac{\frac{1}{J}(K_p s + K_i)}{s^2 + \frac{K_p + f}{J}s + \frac{K_i}{J}} \quad (3.6)$$

La fonction de transfert dans l'équation 3.6 est comme un système de 2ème ordre ; dans ce cas, les gains P et I du contrôleur de vitesse PI qu'il peut concevoir via la méthode Root-locus, cette dernière dépend du rapport d'amortissement constant ( $\xi$ ) et de la fréquence propre non amortie ( $\omega_n$ ). Dans ce contexte, nous pouvons extraire les gains PI du contrôleur à partir de la fonction de transfert du second ordre :

$$\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.7)$$

$\omega_n$  = la pulsation propre

$\xi$  = coefficient d'amortissement

Le système étant du deuxième ordre on obtient :

$$\begin{cases} K_p = 2J\xi\omega_n - f \\ K_i = J\omega_n^2 \end{cases} \quad (3.8)$$

En se référant à la figure 3.4 ; nous recherchons pour notre système un taux d'amortissement voisin de  $\xi = 0,7$ , que nous avons souvent considéré comme valeur optimale pour les deux raisons suivantes :

→ Le système en boucle fermée est stable (les pôles de ce système se trouvent sur le demi-plan gauche) ;

→ Faible temps de réponse.

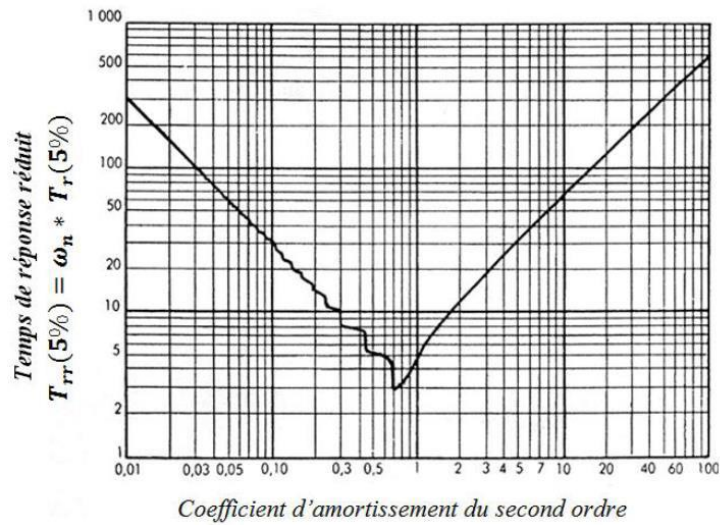


Figure 3.3 Coefficient d'amortissement du second ordre [6]

On obtient les paramètres suivants :

- $K_p$  : 5.2
- $K_i$  : 50

Afin d'atteindre la référence de courant continu  $I^*$  produite par le régulateur de vitesse, les signaux de commutation pour l'onduleur sont généralement générés par une technique de régulation à hystérésis ou par une technique PWM (modulation de largeur d'impulsion) [16].

### 3.3 Contrôle du courant

Il y a différentes méthodes de contrôle des courants qui reposent sur l'autopilotage et la mise en place de courants dans les phases de la machine aussi proches que possible de leurs références en fonction de la position du rotor et des grandeurs électromécaniques souhaitées. Une des techniques utilisées dans l'industrie est le contrôle des courants par hystérésis, qui présente l'avantage d'être autonome par rapport aux valeurs des paramètres de la machine.

La structure générale d'un régulateur de courant pour un moteur BLDC est illustrée à la figure 3.5. Cette méthode agit sur le courant de phase en modulant les impulsions envoyées aux interrupteurs (onduleur) afin de le maintenir égal à la référence. La référence de courant est déterminée par un régulateur PI, qui maintient constante la vitesse angulaire moyenne du rotor.

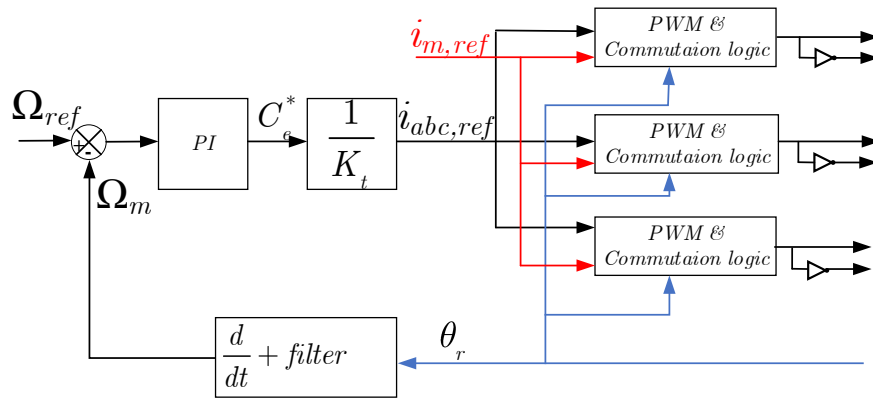


Figure 3.4 Schéma fonctionnel à contrôle de vitesse du BLDC.

Ces courants de référence sont comparés aux courants de phase mesurés réels, comme présenté dans la figure 3.6. Ces erreurs sont appliquées à la bande d'hystérésis de l'onduleur ( $\pm\Delta I$ ) et les signaux de commutation de l'onduleur PWM triphasé sont générés en fonction des états de commutation

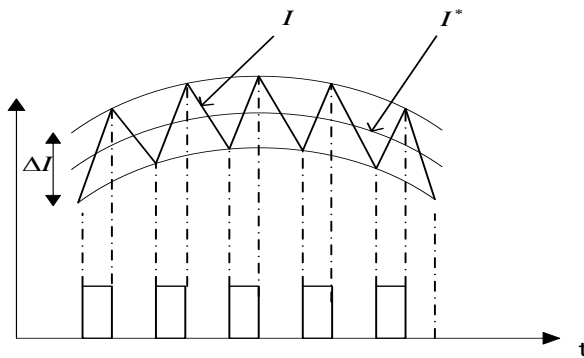


Figure 3.5 Principe de génération des ordres de commande.

Le schéma de principe du régulateur de courant à hystérésis est donné par la figure (3.7) :

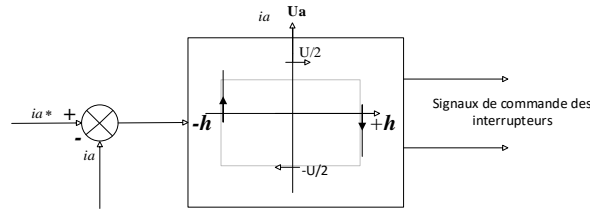


Figure 3.6 principe du régulateur de courant à Hystérésis

L'ouverture logique des interrupteurs du convertisseur (onduleur) est formulée comme suit :

- Si  $i_a < (i_a^* - h)$  : (T1 fermé, T4 ouvert) et ( $V_a = U/2$ ).
- Si  $i_a > (i_a^* + h)$  : (T1 ouvert, T4 fermé) et ( $V_a = -U/2$ ).
- Si  $i_b < (i_b^* - h)$  : (T2 fermé, T5 ouvert) et ( $V_b = U/2$ ).
- Si  $i_b > (i_b^* + h)$  : (T2 ouvert, T5 fermé) et ( $V_b = -U/2$ ).
- Si  $i_c < (i_c^* - h)$  : (T3 fermé, T6 ouvert) et ( $V_c = U/2$ ).
- Si  $i_c > (i_c^* + h)$  : (T3 ouvert, T6 fermé) et ( $V_c = -U/2$ ).

Avec  $h$  : est la bande d'hystérésis.

L'amplitude des trois phases du courant de références ( $I^*$ ) est déterminée par rapport au couple de référence ( $C^*$ ) et la constante du couple ( $K_t$ ) comme suit :

$$I^* = \frac{C^*}{K_t} \tag{3.9}$$

Les courants de références  $i_a^*$ ,  $i_b^*$  et  $i_c^*$  qui sont en fonction de la position du rotor ( $\theta$ ), prennent les valeurs du courant de référence  $I^*$  et  $-I^*$  ou Zéro. La valeur du courant de référence est modélisée chaque  $60^\circ$  et est montrée dans le tableau [6]

Position	$i_a^*$	$i_b^*$	$i_c^*$
$0^\circ - 60^\circ$	$I^*$	$-I^*$	0
$60^\circ - 120^\circ$	$I^*$	0	$-I^*$
$120^\circ - 180^\circ$	0	$I^*$	$-I^*$
$180^\circ - 240^\circ$	$-I^*$	$I^*$	0
$240^\circ - 300^\circ$	$-I^*$	0	$I^*$
$300^\circ - 360^\circ$	0	$-I^*$	$I^*$

Tableau 3.1 Les courants de références



### 3.4 Résultat de Simulation

Nous allons maintenant présenter les résultats de simulation. Dans un premier temps, nous avons testé la commande sous une variation de la vitesse sous intervalle  $[0 \rightarrow 4]$  de (100 rad/s) jusqu'à (150 rad/s) et puis l'application d'un couple de charge nominale dans l'instant [4s] Les figures 3.7, 3.8, 3.9 représentent les formes des grandeurs obtenues

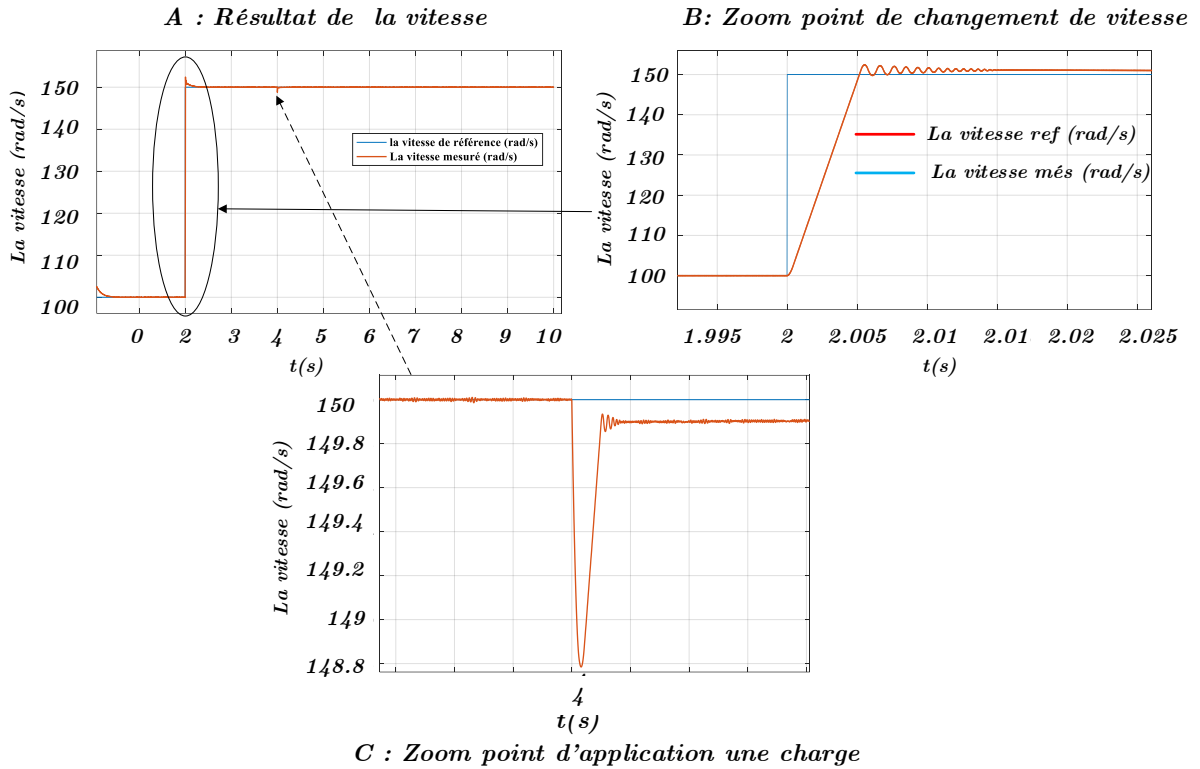


Figure 3.7 La vitesse du moteur

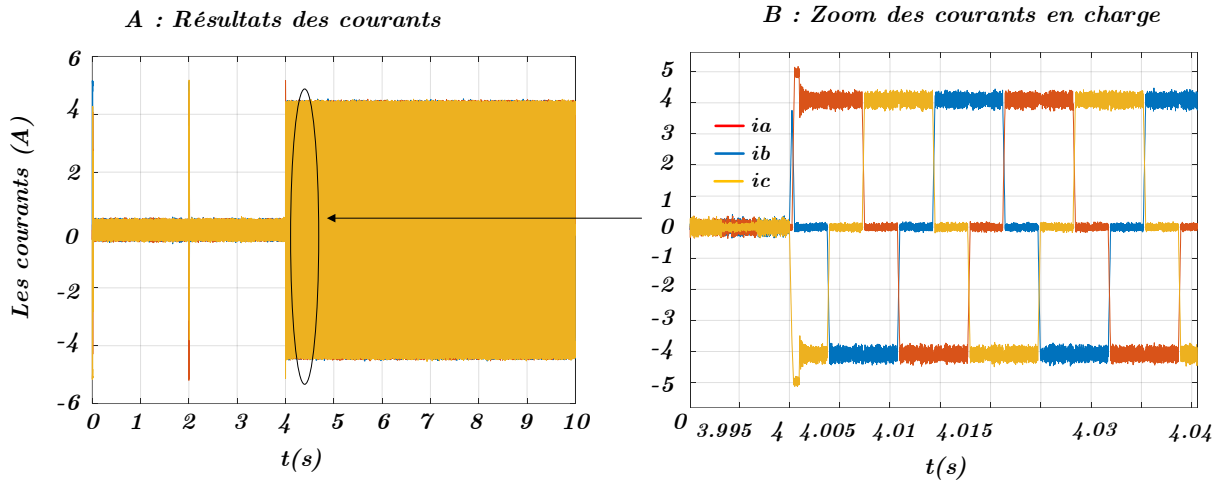


Figure 3.8 Les courants( $i_a, i_b, i_c$ )

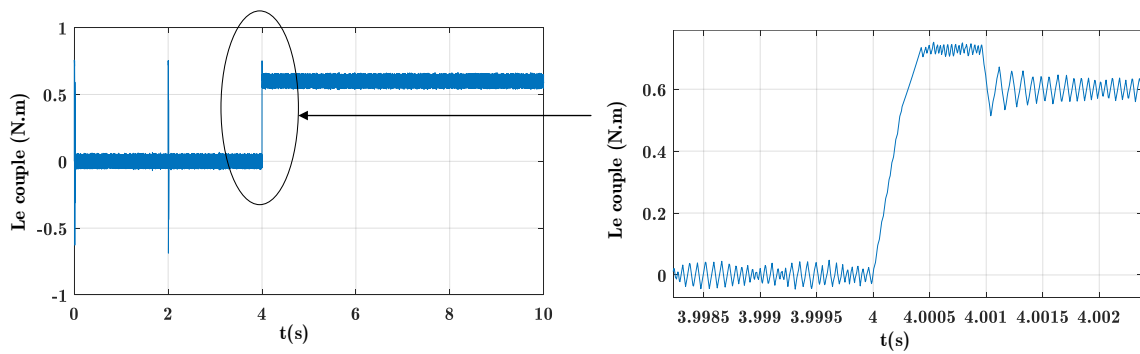


Figure 3.9 Le couple électromagnétique de moteur

### 3.4.1 Interprétation des résultats :

#### a) La vitesse :

À travers les résultats obtenus dans les figures de vitesse, la courbe montre une transition fluide de 100 Rad/s à 150 Rad/s, indiquant que la commande PI maintient efficacement la vitesse souhaitée malgré la variation de consigne.

Le zoom sur le point de changement de vitesse met en évidence la rapidité et la précision de la réponse du moteur, avec un temps de montée court et un dépassement minimal. Avec une légère baisse de vitesse à l'instant 4, correspondant à l'application du couple de charge nominal.

Le zoom sur le point de charge illustre la capacité de la commande PI à maintenir la vitesse du moteur malgré la perturbation du couple de charge.

L'amplitude de la baisse de vitesse est relativement faible, indiquant une bonne régulation du couple par le moteur.

### **b) Les courants**

Par l'observation des courbes de courant, on remarque une variation progressive des courants des phases à mesure que la vitesse du moteur augmente de 100 rad/s à 150 rad/s.

L'application du couple de charge nominal à l'instant 4 entraîne une augmentation soudaine des courants des phases. Cette augmentation est nécessaire pour fournir le couple supplémentaire requis par le moteur afin de maintenir sa vitesse face à la perturbation de charge.

Les courants des phases reviennent ensuite progressivement à leur valeur stationnaire après quelques secondes, indiquant que le moteur a réussi à stabiliser sa vitesse.

### **C) le couple**

La courbe de couple montre une augmentation graduelle du couple lorsque la vitesse du moteur augmente de 100 Rad/s à 150 Rad/s.

L'application du couple de charge nominal à l'instant 4 provoque une augmentation soudaine du couple. Cette augmentation est nécessaire pour fournir le couple supplémentaire requis par le moteur afin de maintenir sa vitesse face à la perturbation de charge.

Le couple revient ensuite progressivement à sa valeur stationnaire après quelques secondes, indiquant que le moteur a réussi à stabiliser sa vitesse.

## **3.5 Conclusion**

En conclusion, ce chapitre a exploré les techniques de commande de vitesse des moteurs BLDC, en mettant l'accent sur la commande par régulateur PI et la commande par hystérésis. Les résultats obtenus par simulation ont démontré l'efficacité de ces approches

dans le contrôle et la variation de la vitesse du moteur, même en présence de charges variables.

La commande PI s'est particulièrement distinguée par sa solidité face aux perturbations et sa capacité à assurer une convergence précise vers la consigne. Cette performance la positionne comme un choix privilégié pour de nombreuses applications, notamment dans le domaine de l'électromécanique et de l'automatisation.

Dans le chapitre suivant, nous poursuivrons notre exploration en concrétisant ces concepts théoriques par la réalisation d'un banc d'essai expérimental. Ce banc d'essai, basé sur la carte dSPACE 1104, nous permettra de valider expérimentalement les performances des techniques de commande étudiées et d'approfondir notre compréhension des interactions entre le moteur BLDC et son environnement de commande.

---

# Chapitre 04

---

Conception et réalisation d'un banc d'essai  
expérimental pour la commande du moteur  
BLDC

## 4 Conception et réalisation d'un banc d'essai expérimental pour la commande du moteur BLDC

### 4.1 Introduction

Ce chapitre met en pratique l'étude en implémentant deux aspects fondamentaux : d'abord, l'autopilotage du moteur BLDC, suivi de la régulation de sa vitesse via un régulateur PI, le tout en temps réel. Cette mise en œuvre s'appuie sur l'utilisation de la carte dSPACE 1104, une plateforme matérielle de pointe. Cette carte permet un pilotage en temps réel grâce à un programme développé dans l'environnement de modélisation MATLAB Simulink, utilisant spécifiquement le module SIMULINK/DSPACE RTI 1104. L'objectif est de démontrer l'efficacité de ces techniques de contrôle dans des conditions réelles, avec une liaison directe entre la modélisation et l'exécution sur le matériel.

### 4.2 Présentation générale de la maquette

L'application de ces commandes à besoin d'une plateforme et d'un équipement adéquat. Notre banc d'essai se synthétise dans trois parties principales

Notre configuration intègre un ordinateur équipé d'une carte dSPACE DS1104 et d'une interface d'entrée/sortie, Ce dispositif interagit avec les logiciels Control-Desk et MATLAB/Simulink, en plus d'un onduleur triphasé qui alimente le moteur BLDC, Ce dernier est équipé de capteurs de vitesse et de courant qui acquièrent et transmettent des données à la carte dSPACE.

- **La partie puissance** : comporte une source variable de tension en continu un moteur BLDC de type (LYBOLDE/DIDACTIC GBMH) 415W, un onduleur à base de MOSFET de type IRFP260N et carte d'interface de sortie de 15 V.
- **La partie Commande** : Il s'agit d'un ordinateur PC équipé par un dSPACE DS1104 et un organe d'entrée et sortie. Il est exploité par un logiciel Control-Desk et Matlab/Simulink.
- **La partie mesure** : Les différents capteurs qu'ils sont utilisé : Un capteur de vitesse pour mesurer la vitesse et un capteur de courant pour mesurer les courants. Un

appareil de mesure numérique multifonction peut être utilisé comme oscilloscope. Un multimètre numérique. Et capteur a effet Hall

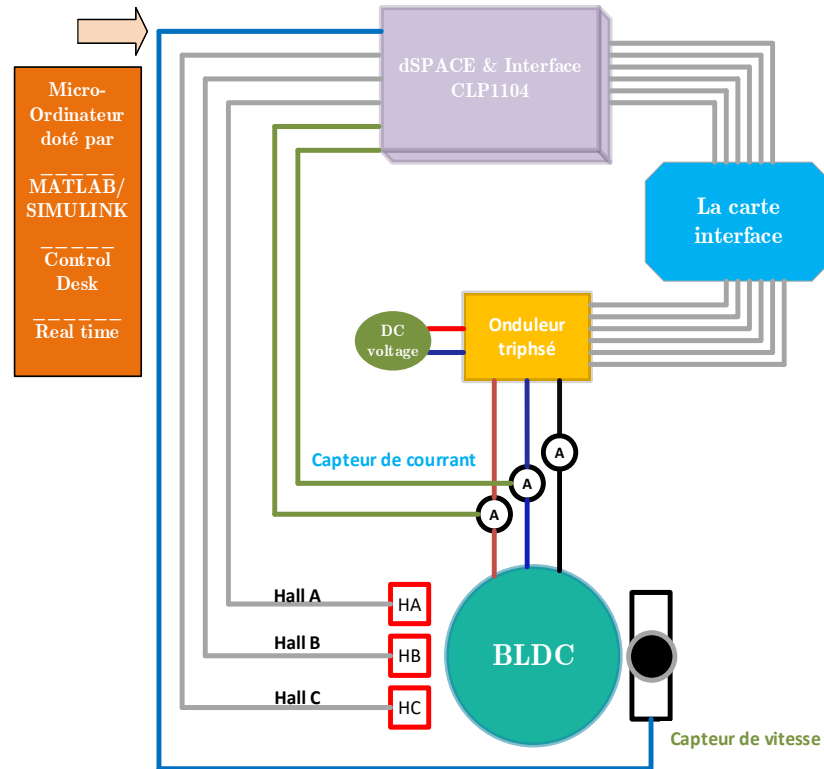


Figure 4.1 Présentation générale de la maquette.

### 4.3 La carte commande DS1104 [17]

Le pilotage en temps réel des systèmes continus se fait à l'aide d'un PC connecté à la carte dSPACE DS1104. La programmation se fait à l'aide de l'outil de modélisation SIMULINK, qui aide à poser le problème d'une manière graphique en utilisant les blocs interconnectés. En fait, beaucoup de systèmes de développement en temps réel à base de DSP viennent maintenant avec une interface à Simulink par laquelle ils peuvent convertir les blocs de Simulink en un code machine qui peut être exécuté sur un système à base de DSP. Ceci réduit considérablement le temps de développement et de prototypage pour le control des systèmes. Le prototypage passe alors par trois étapes :

1. Construction du système de commande en utilisant les blocs de Simulink
2. Simulation du système pour voir les résultats dans différents scénarios.
3. Exécution du modèle en temps réel à travers la carte DS1104 (cours dspace)



Figure 4.2 Carte dSPACE DS1104

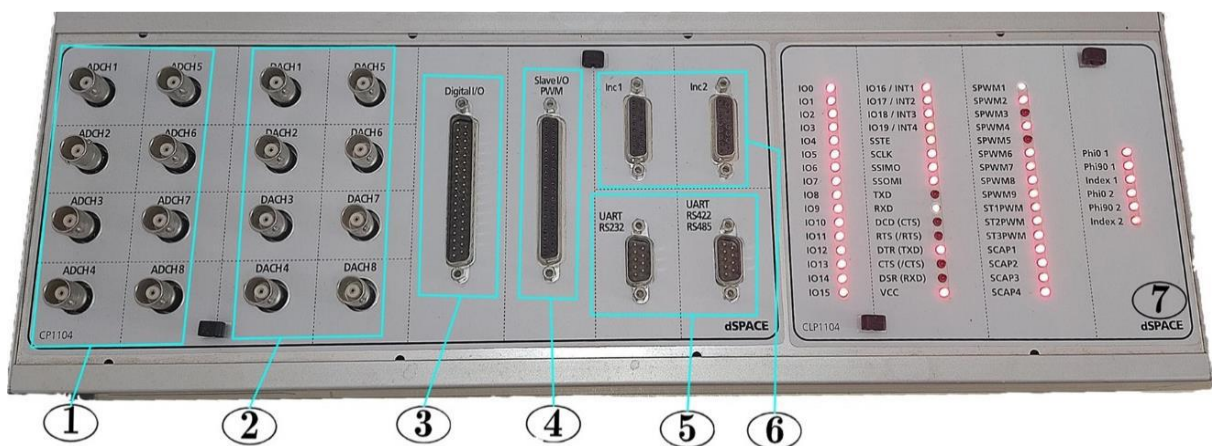


Figure 4.3 Panel d'interface CLP1104

1. Huit convertisseurs analogiques numériques ADC, quatre canaux 1, 2, 3, 4 en 12 bits et quatre canaux 5, 6, 7, 8 en 16 bits.
2. Huit convertisseurs numériques analogiques DAC de 16 bits pouvant délivrer une tension de  $\pm 10V$ .
3. Interface d'entrées-sorties numériques, utilisée pour les langages de programmation.
4. Interface d'entrées-sorties, du DSP pour la génération des signaux de commande MLI.
5. Portes séries (RS 232, RS 422 et RS 485), ils servent à connecter en série la carte avec divers appareils électronique tell les automates, ou avec une autre carte DS.
6. Deux codeurs qui permettent la communication avec les capteurs de position.



7. Ornées également d'une quarantaine de lampes LED indiquant les portes actives sur le panneau. [18]

#### 4.4 L'onduleur triphasé [19]

L'onduleur triphasé joue un rôle crucial dans le système, en assurant la conversion des signaux de référence provenant de l'unité de commande en courants triphasés destinés à alimenter le moteur BLDC. Pour ce faire, il utilise des algorithmes de commande adaptés à la complexité souhaitée.

Dans le cas d'une commande relativement simple, un circuit analogique composé de portes logiques suffit à générer les signaux de référence nécessaires. Cependant, pour des commandes plus complexes impliquant des algorithmes sophistiqués, l'emploi de dispositifs numériques à base de microprocesseur devient indispensable. Parmi ces derniers, les DSP (Digital Signal Processors) s'avèrent particulièrement adaptés en raison de leurs performances de traitement élevées.

Dans le cadre de notre projet, nous avons opté pour la carte DSPpace 1104 afin de générer les signaux de commande requis pour le moteur BLDC. Ce choix s'explique par la puissance de calcul de cette carte, parfaitement adaptée aux exigences de notre application.

La figure (4.4) montre l'onduleur utilisé :

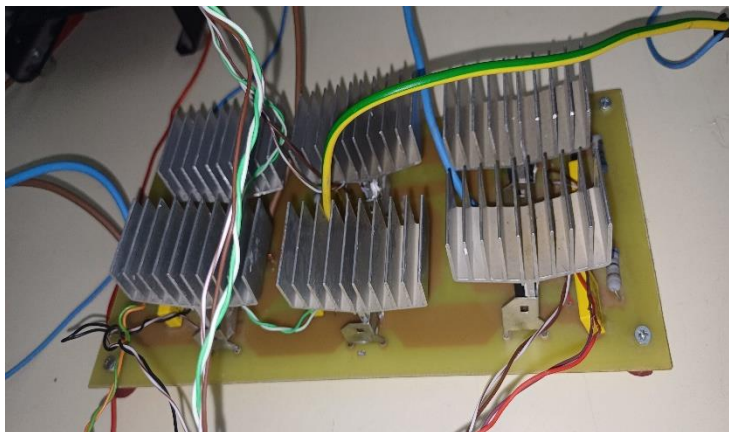


Figure 4.4 L'onduleur triphasé

#### 4.5 Carte d'interface (Commande Rapprochée) [19]

La carte d'interface joue un rôle essentiel dans le système en assurant l'interface entre la partie commande et la partie puissance du moteur BLDC. Elle utilise un circuit d'attaque

HCPL pour commander efficacement les transistors de puissance MOSFET. Ce composant comprend plusieurs éléments clés :

- **Un étage d'amplification** : Il amplifie les signaux de commande provenant de l'unité de commande pour fournir le courant nécessaire à la commutation des transistors IGBT.
- **Un circuit à base d'optocoupleurs** : Il assure l'isolation galvanique entre la partie commande et la partie puissance. Cette isolation est cruciale pour la sécurité du système en empêchant les courants de puissance de circuler dans les circuits de commande sensibles.

#### 4.6 Moteur BLDC

La machine BLDC étudiée dans ce chapitre est une machine didactique de LEYBOLD ; il s'agit d'un moteur tétrapolaire à courant continu, sans balais, à excitation permanente, qui fonctionne avec commutation par la charge. Cela signifie que le moteur commande lui-même la position de son propre champ statorique. Il faut pour cela que le moteur soit couplé à l'indicateur de position du rotor (capteur à effet hall) qui mesure la position du rotor du moteur synchrone autopiloté à partir de laquelle la commande à commutation par créneaux génère le champ statorique



Figure 4.5 Le moteur BLDC utilisé

## 4.7 Résultats expérimentaux

Dans le cadre de ce projet, nous avons développé un banc d'essai expérimental pour étudier et caractériser les performances d'un moteur BLDC (Brushless DC Motor). Ce banc d'essai nous a permis de tester et d'évaluer différentes stratégies de commande du moteur, notamment l'autopilotage et la commande en vitesse.

Les instruments et tous les équipements sont présentés dans la photo ci-après :

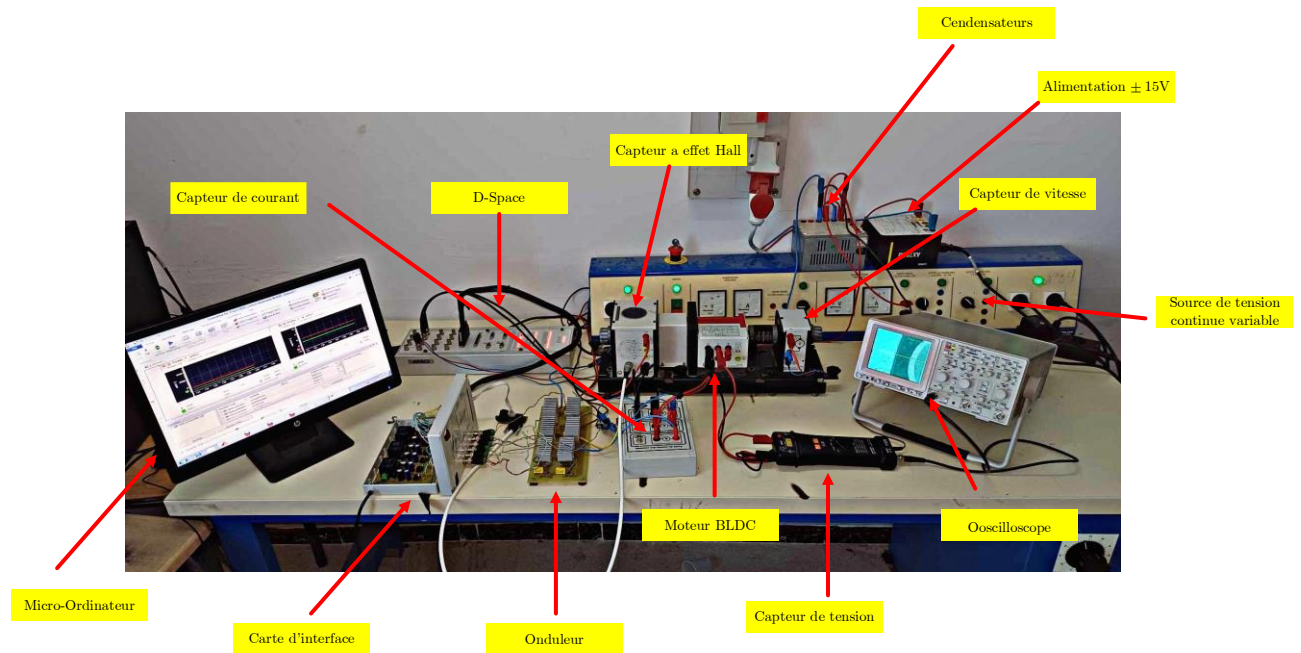


Figure 4.6 Le banc d'essai

### 4.7.1 Résultats expérimentaux d'autopilotage

Conformément au chapitre 2 et à la section 2.4, cette section présente les résultats expérimentaux de la logique de commutation implémentée. Pour ce faire, l'onduleur a été alimenté en tension continue et les signaux des capteurs d'effet Hall ont été utilisés pour activer la logique de commutation développée.

Les résultats expérimentaux obtenus démontrent la justesse de la logique de commutation élaborée. Le moteur BLDC a réussi à maintenir sa position angulaire avec précision en l'absence de commande externe, confirmant ainsi l'efficacité de la boucle de contrôle en position basée sur les capteurs d'effet Hall.

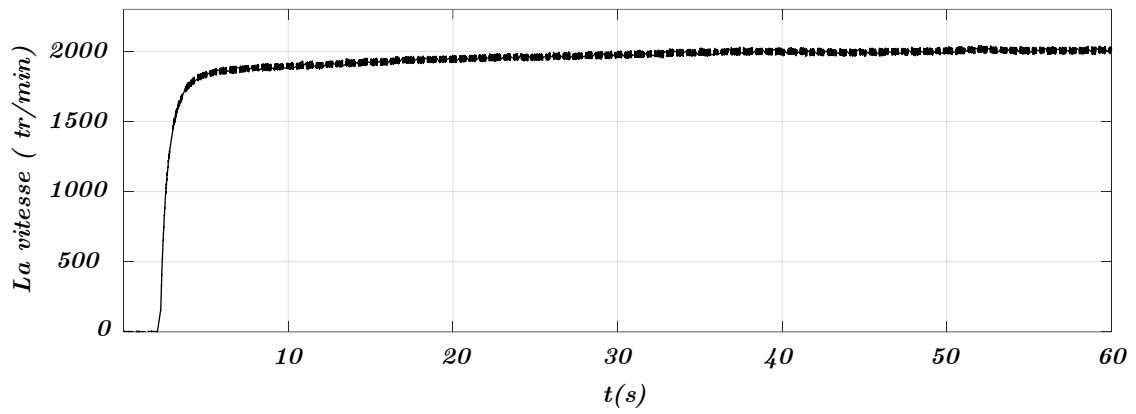


Figure 4.7 La vitesse

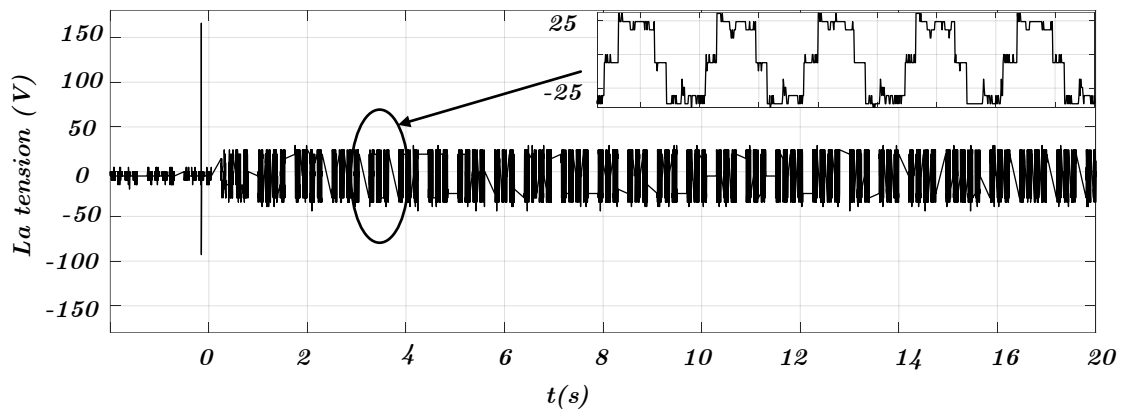


Figure 4.8 la tension entre phase a et b

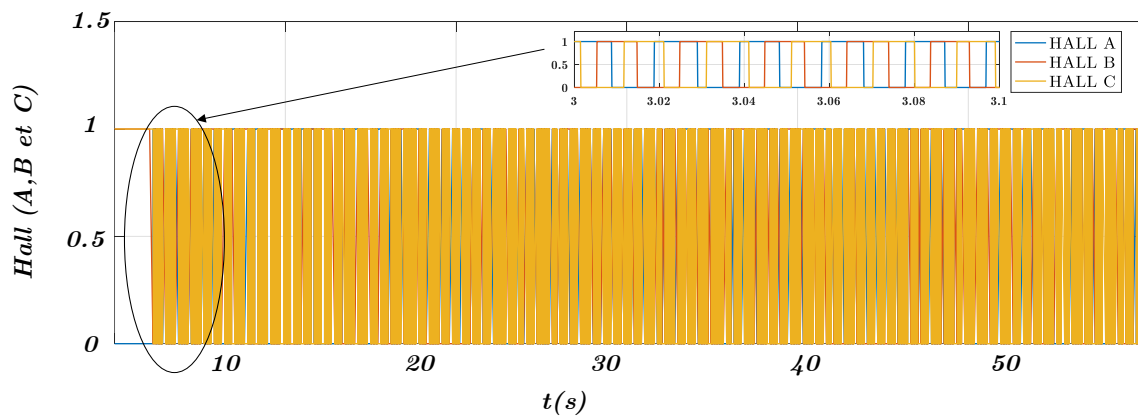


Figure 4.9 Les signaux de capteur a effet Hall

## 4.8 Résultats expérimentaux de la commande en vitesse du BLDC

Conformément à la théorie de la commande linéaire et au contrôle de courant élaborés dans le chapitre 3, il présente les performances de la boucle de commande complète implémentée sur la carte dSPACE 1104 à l'aide de Simulink/MATLAB.

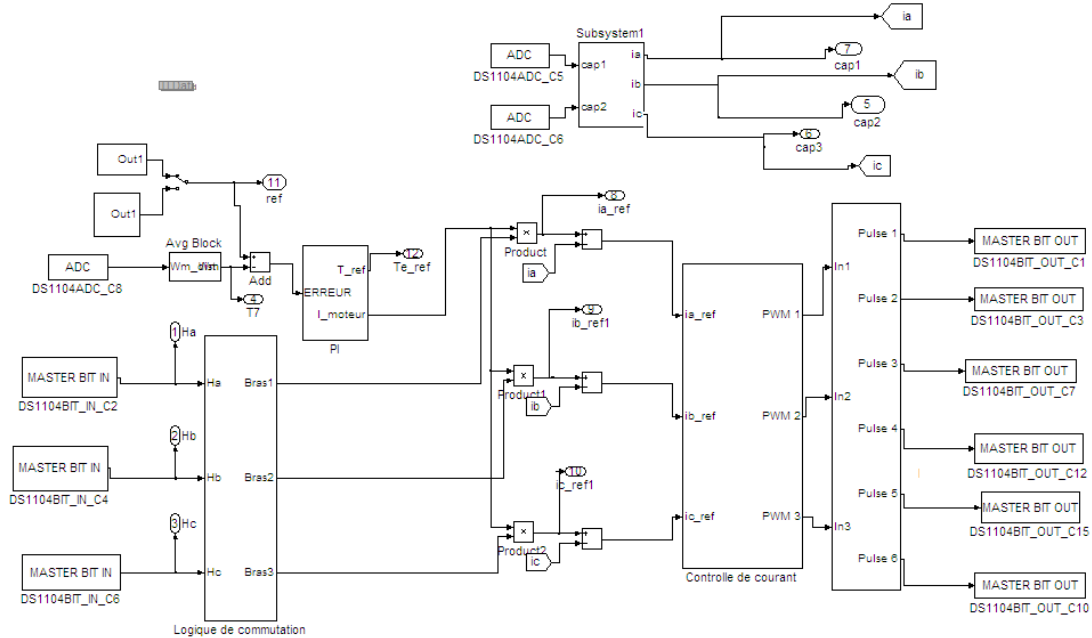


Figure 4.10 Schéma block de la commande PI.

Le schéma bloc de la commande en vitesse est illustré dans la figure 4.12. Il met en évidence l'architecture de la boucle de contrôle, comprenant les régulateurs de vitesse et de courant, ainsi que les blocs de génération de signaux de commande et d'acquisition de données.

### 4.8.1 Variation de consigne de vitesse

Les courbes présentées illustrent le comportement d'un moteur BLDC piloté par une régulation de vitesse par commande PI. L'analyse des courbes de vitesse et de courant, en tenant compte des caractéristiques spécifiques des moteurs BLDC, permet d'évaluer les performances de la régulation.

En termes de temps de réponse au démarrage, la régulation PI montre une performance satisfaisante pour un moteur BLDC, puisque la vitesse du moteur atteint la consigne en environ 2 secondes. En régime permanent, le suivi de consigne est précis et sans dépassement, avec un temps de réponse de 1 seconde, ce qui démontre une bonne réactivité du système aux changements de consigne.

Concernant la forme du courant de phase, il est important de considérer la nature intrinsèque des moteurs BLDC. En effet, la commutation électronique des courants dans les enroulements du stator génère naturellement des formes de courant crénelées. La déformation observée au niveau des plateaux de conduction à 120 degrés est caractéristique de ce type de moteur et est inhérente à son principe de fonctionnement.

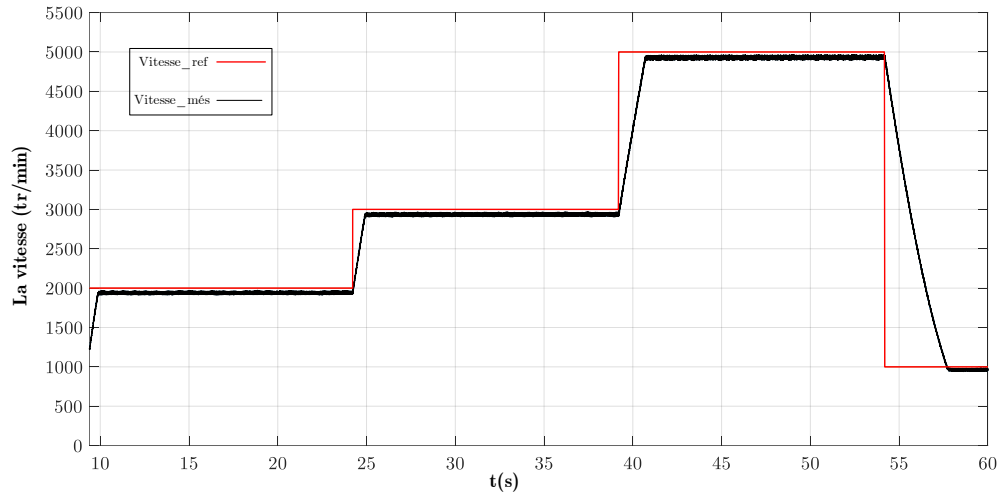


Figure 4.11 Résultats de la variation de vitesse

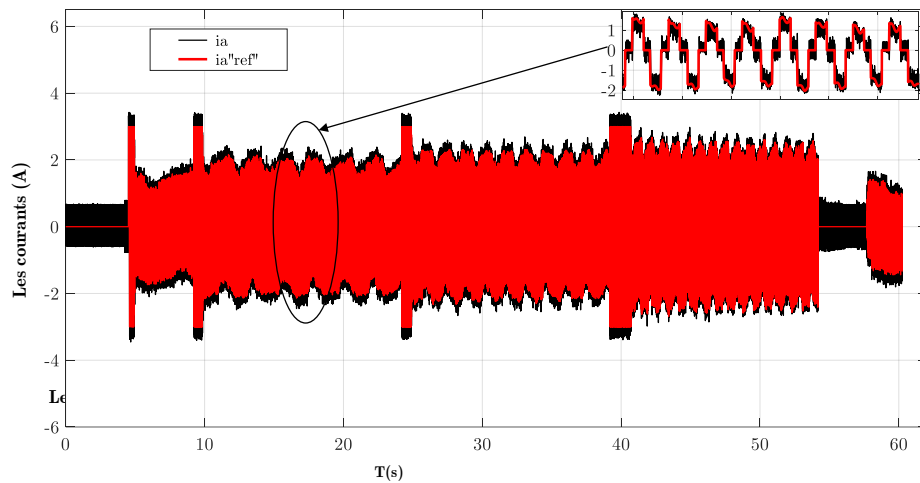


Figure 4.12 les courants dans l'essai de variation de vitesse

### 4.8.2 L'inversion le sens de rotation

Cette partie analyse le comportement du moteur BLDC lors d'un changement de sens de rotation commandé par la régulation PI. Les courbes de vitesse et de courant d'une phase sont examinées pour illustrer les effets de l'inversion de consigne.

Pour démarrer le moteur dans le sens de rotation souhaité (sens positif), une consigne de vitesse positive est appliquée conjointement à la séquence d'allumage direct des enroulements du stator. Cette séquence d'allumage directe correspond à la séquence standard pour la rotation dans le sens positif.

Pour inverser le sens de rotation, une consigne de vitesse négative est appliquée. Cela entraîne une modification de la séquence d'excitation des enroulements du stator, générant un champ magnétique rotatif dans le sens inverse.

La courbe de vitesse montre que le moteur suit fidèlement la consigne de vitesse, atteignant la vitesse de consigne souhaitée dans les deux sens de rotation. Le temps de réponse pour le changement de sens semble acceptable.

La forme du courant de phase présente des créneaux caractéristiques des moteurs BLDC, comme mentionné précédemment. L'amplitude des créneaux et la valeur maximale du courant varient en fonction du sens de rotation et de la consigne de vitesse appliquée.

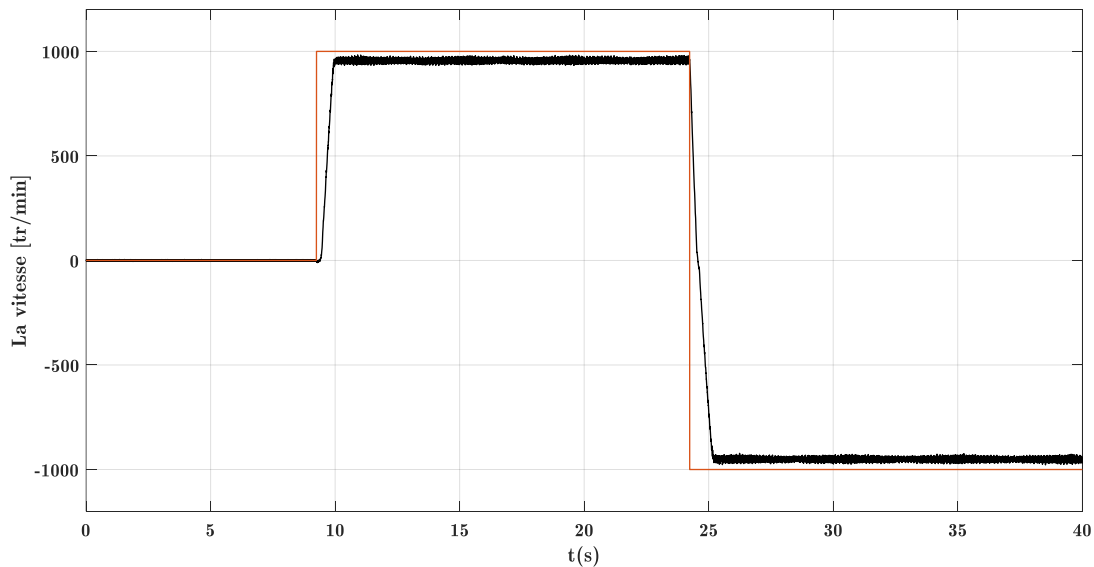


Figure 4.13 résultats de vitesse dans le cas de l'inversion du sens de rotation de moteur

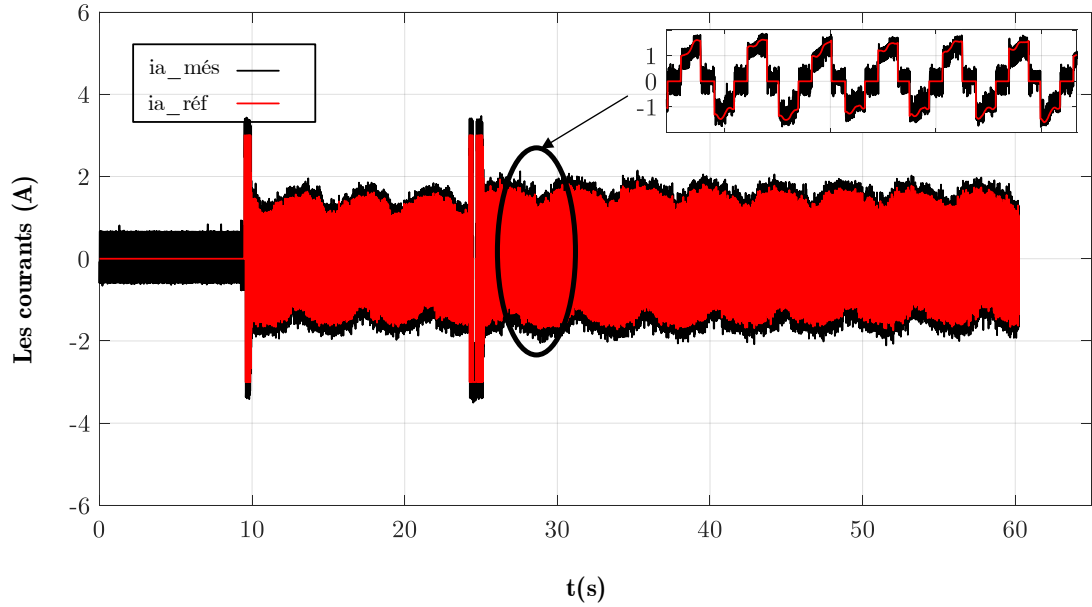


Figure 4.14 les courants dans l'essai de l'inversion de rotation

## 4.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons concrétisé les concepts théoriques développés dans les chapitres précédents en les appliquant à la commande d'un moteur BLDC en temps réel.

Le prototypage de la commande trapézoïdale et de la commande de vitesse a été réalisé sur la carte DSPACE 1104. Les algorithmes de commande ont été implémentés dans le logiciel DSPACE ControlDesk et testés avec un moteur BLDC réel. Les résultats obtenus ont confirmé les études théoriques menées dans les chapitres précédents, démontrant la précision et la performance de la commande mise en œuvre.

Remarque : La qualité et la robustesse des équipements et outils sont des éléments essentiels pour garantir des résultats satisfaisants. Nous avons constaté un manque de fiabilité dans l'un des cas, notamment en ce qui concerne le capteur de courant.



---

**Conclusion**

**Générale**

---

## 5 Conclusion générale

Ce mémoire a présenté la conception et l'implémentation d'un système de commande trapézoïdale pour un moteur BLDC. Le travail a été mené à bien à la fois par simulation et expérimentation, en utilisant le logiciel Matlab/Simulink et la carte DSP DS1104.

Les principales conclusions de ce travail sont les suivantes :

- Une compréhension approfondie des moteurs BLDC a été acquise, couvrant leurs composants, leur principe de fonctionnement, leurs différentes typologies et une comparaison avec d'autres types de moteurs.
- Un modèle mathématique complet du moteur BLDC a été développé et implémenté dans Simulink. Ce modèle a permis de simuler le comportement du moteur sous différentes conditions de fonctionnement.
- Une stratégie de commande trapézoïdale a été conçue et implémentée pour le moteur BLDC. Cette stratégie a été testée par simulation et a montré des performances satisfaisantes en termes de vitesse et de couple.
- Un régulateur de vitesse PI a été conçu et implémenté pour le moteur BLDC. Ce régulateur a été testé par simulation et a montré des performances satisfaisantes en termes de stabilité et de suivi de consigne.
- Le système de commande trapézoïdale et le régulateur PI ont été implémentés expérimentalement sur un moteur BLDC réel à l'aide de la carte DSP DS1104. Les résultats expérimentaux ont confirmé les résultats de la simulation.

Ce travail a permis de valider la faisabilité de la commande trapézoïdale et du régulateur PI pour les moteurs BLDC. Les résultats obtenus sont prometteurs et ouvrent la voie à de futures recherches sur l'optimisation des performances du système de commande et sur son application à des applications concrètes.

En plus des conclusions mentionnées ci-dessus, il est important de souligner que ce mémoire a également apporté les contributions suivantes :

- Développement d'un banc d'essai expérimental pour la commande de moteurs BLDC.

## Conclusion générale

- Mise en œuvre d'un algorithme de commande trapézoïdale efficace pour les moteurs BLDC.
- Conception d'un régulateur de vitesse PI robuste pour les moteurs BLDC.
- Validation expérimentale des performances du système de commande.

Ce travail constitue une contribution précieuse au domaine de la commande des moteurs BLDC et peut être utilisé comme référence pour de futurs travaux dans ce domaine.

### **Perspectives :**

Ce travail ouvre la voie à plusieurs perspectives de recherche future, notamment :

- **Optimisation des performances du système de commande** en utilisant des techniques de commande avancées, telles que la commande par intelligence artificielle ou la commande par mode glissant.
- **Développement d'un système de commande sans capteur** pour une application plus large des moteurs BLDC.
- **Application du système de commande à des applications concrètes**, telles que la robotique, les véhicules électriques ou les systèmes d'automatisation.

# ANNEXES

### ***Paramètres du moteur BLDC LYPBLODE***

<i>Désignation</i>	<i>Valeur</i>	<i>Unité</i>
<i>Puissance nominale <math>P_n</math></i>	<i>415</i>	<i>W</i>
<i>La vitesse nominale <math>\Omega_n</math></i>	<i>6000</i>	<i>Tr/min</i>
<i>Le courant nominale <math>I_n</math></i>	<i>4.5</i>	<i>Ampères</i>
<i>La tension nominale <math>V_n</math></i>	<i>180</i>	<i>Volt</i>
<i>Le couple nominale <math>C_n</math></i>	<i>0.65</i>	<i>N.m</i>
<i>Le constant de tension <math>K_v</math></i>	<i>27.85</i>	<i>UN</i>
<i>Moment d'inertie <math>J</math></i>	<i>72*e-6</i>	<i>Kg.m<sup>2</sup></i>
<i>Coef. de frottement <math>F</math></i>	<i>1*e-7</i>	<i>N.m.s/rad</i>
<i>Résistance statorique <math>R_s</math></i>	<i>0.3</i>	<i>Ohm</i>
<i>Inductance <math>L_s</math></i>	<i>0.005</i>	<i>Henry</i>

### ***Paramètres de régulateur PI***

<i>Coefficient d'amortissement (<math>\xi</math>)</i>	<i>0.7</i>
<i>Gain de l'action proportionnelle (<math>Kp</math>)</i>	<i>5.2</i>
<i>Gain de l'action intégrale (<math>Ki</math>)</i>	<i>50</i>

# Références

- [1] K. Nouari et A. Alleg , «Mémoire de Master intitulé "Etude et simulation de la commande trapézoïdale d'un moteur BLDC"»Université Dr . Tahar Moulay , Saïda, 2016.
- [2] C.-L. Xia, PERMANENT MAGNET BRUSHLESS DC MOTORS DRIVES AND CONTROLS, China : Tiangin University P.R , 2012.
- [3] A. Laouer et A. Ghochi , «Mémoire de Master intitulé "Modélisation et réglage optimal du gain du contrôleur PI pour un moteur (BLDC) à l'aide de la technique PSO" » Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2020/2021.
- [4] M. Rabeh et M. A. Nouri, «Mémoire de Master intitulé "Etude et simulation de la commande trapézoidale d'un moteur BLDC par la technique trapézoidale"» Université Mohamed Boudiaf, M'sila, 2021/2022.
- [5] S. Mimoune et T. Dilmi, «Mémoire de Master intitulé "Implémentation de la commande vectorielle (à flux orienté) sans capteur d'un moteur sans balais (BLDC) " ,» Université Mohamed Boudiaf, Msila, 2019 /2020.
- [6] F. Zineelabidine et O. AYADI, «Mémoire de Master intitulé " Commande non conventionnelle d'un moteur synchrone autopiloté (BLDC) "» Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi, Bordj Bou Arréridj, 2019/2020.
- [7] J. Cai, «DONCEN Motor,» 17 février 2024. [En ligne]. Available: <https://doncenmotor.com/fr/bldc-motor-hall-sensor/>.
- [8] K. Ait Said et A. Gacem, «Mémoire de Master intitulé " Etude et simulation de la commande d'un moteur BLDC",» Université Ibn Khaldoun, Tiaret , 2021/2022.
- [9] S. S. Hali, «Mémoire du Master intitulé "Commande d'un moteur BLDC sans capteur de position",» Université Mouloud Mammri de Tizi-Ouzou ,2017.

- [10] A. Tifraten et H. Mekhlouf , «Mémoire du Master intitulé "Modélisation et contrôle du moteur BLDC",» Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf -Mila Département de mécanique l'électromécanique, Mila, 2021/2022.
- [11] O. Tremblay, «Modélisation, Simulation et commande de la machine synchrone à aimants à force contre-électromotrice,» École de technologie supérieure Université Du QUÉBEC, Montréal, le 8 MAI 2006.
- [13] M. A. Belkacemi , «Mémoire de Master intitulé "Modélisation et commande d'un moteur de type brushless",» Université SAAD DAHLAB , BLIDA, 2022-2023.
- [14] Z. Jian et Y. Yangwei , «Brushless DC Motor Fundamentals Application Note,» MPS The futur of Analog IC technology , July 2011.
- [15] L. Hamza, «Mémoire de Master intitulé "La régulation de vitesse d'un moteur à courant MCC",» Badji Mokhtar Université, Annaba, 2015 /2016.
- [16] S.-H. Kim, Electric Motor Control DC, AC, and BLDC Motors, Department of Electrical & Electronics Engineering,Kangwon National University.
- [17] D. Abdallah , «Initiation au système dSPACE, de l'interface RTI dans Simulink et de ControlDesk Next Generation 5.4,» École d'ingénieur, France, 8 Nov 2016.

- [18] S. Houiri et F. Kerbouai, « Mémoire de Master intitulé ‘‘Implémentation de la commande scalaire pour la machine asynchrone sous une carte DSPACE 1104’’ », Boudj Bou Arreiridj, 2022.
- [19] B. Boussad, «These de Doctorat intitulé "Contribution a la modélisation des systèmes couples machines convertisseurs : application a machine a aiment",» Université Mouloud Mammeri , Tizi-Ouzou, 21 / 02 / 2012.



## **Résumé :**

Avec son importance croissante dans l'industrie et son utilisation dans différentes machines domestiques, il fallait améliorer les performances du moteur BLDC, en réglant sa vitesse et son couple. L'objectif de ce mémoire est l'implémentation de la commande trapézoïdale et le contrôle de vitesse par un régulateur PI du moteur à courant continu sans balais sur une carte DSPACE 1104. Après la modélisation mathématique du moteur et sa commutation logique, la simulation de commande trapézoïdale et de commande en vitesse par régulateur PI dans l'environnement MATLAB Simulink, la phase finale de notre travail est l'implémentation pratique de ces commandes sous la carte DSPACE 1104.

**Les mots clé :** BLDC, Modélisation, Matlab Simulink, Commande trapézoïdale, Régulateur PI, Carte DSPACE 1104.

## **ملخص :**

مع تزايد أهميته في الصناعة واستخدامه في الآلات المنزلية المختلفة، ظهرت الحاجة إلى تحسين أداء محرك التيار المستمر بدون فرش، من خلال ضبط سرعته وعزم دورانه. الهدف من هذه المذكرة هو تنفيذ التحكم شبه المنحرف والتحكم في السرعة بواسطة متحكم تناسبي تكاملي لمحرك بدون فرش على بطاقة DSPACE 1104، بعد النمذجة الرياضية للمحرك وتبديله المنطقي ومحاكاة التحكم شبه المنحرف والتحكم في السرعة بواسطة منظم PI في بيئة MATLAB، المرحلة الأخيرة من عملنا كانت تتمثل في التنفيذ العملي لهذه الأوامر على بطاقة DSPACE 1104.

## **الكلمات المفتاحية :**

النمذجة الرياضية، محرك بدون فرش ، ماتلاب ، متحكم تناسبي تكاملي ، بطاقة DSPACE 1104 ، تحكم شبه المنحرف.

## **Abstract:**

With its growing importance in industry and its use in various domestic machinery, it was necessary to improve the performance of the brushless DC motor by adjusting its speed and torque. The purpose of this thesis is the implementation of trapezoidal control then the speed control by a PI regulator of the brushless DC motor on a DSPACE 1104 card. After the mathematical modeling of the motor and its logical switching, the simulation of trapezoidal control and speed control by PI regulator in the MATLAB environment, the final phase of our work was the practical implementation of these controls under the DSPACE 1104 card.

**Key words:** BLDC, Modeling, Matlab Simulink, Trapezoidal control, PI regulator, DSPACE 1104 card.