

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE  
N° : .....



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE  
FILIERE : ELECTRONIQUE  
OPTION : SYSTEME EMBARQUE

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique

Par :

- ✓ RABEH MOHOUN
- ✓ NOURI MOHAMED ALI

Intitulé

**ETUDE ET SIMULATION DE LA  
COMMANDED'UN MOTEUR BLDC PAR LA  
TECHNIQUE TRAPEZOÏDALE**

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. GARAH Messaoud	Université Med Boudiaf –M'sila	Président
Dr. BENAHCENE Madani	Université Med Boudiaf –M'sila	Rapporteur
Mr. MEZAACHE Hatem	Université Med Boudiaf - M'sila	Examineur

Année universitaire : 2021/2022

# Remerciements

Ma gratitude doit d'abord être exprimée envers le bon Dieu « ﷻ » le tout puissant, qui m'a donné la sagesse, la patience, le courage et la volonté pour qu'on puisse terminer ce travail

Je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, en Particulier Dr BENAHCENE MADANI

Mes sincères remerciements S'adressent aussi aux membres de jury d'avoir accepté de juger mon travail.

Je remercie aussi tous les enseignants, sans exception, car c'est grâce à eux que je suis arrivé à faire ce travail.

Sans oublier toute la famille mon père, ma mère, mes frères et sœurs et mes amis.

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à mes chers parents, merci pour tous les sacrifices consentis afin de me permettre d'être ce que je suis ; Je leur exprime humblement ma profonde gratitude et mon attachement éternel.*

*À toute la grande famille MOUHOUN ET NOURI,  
Nos remerciements vont enfin à Dr AICHE MAHYEDDINE  
pour son aide et à toute personne qui a contribué de près ou de loin  
à l'élaboration de ce modeste travail.*

*ET a tous mes chères amies*

*À toute la promotion 2022 de la spécialité System Embarque*

# SOMMAIRE

## Sommaire

Introduction générale.....1

### **CHAPITE I : Généralités sur les moteurs BLDC.**

I.1	Introduction.....	3
I.2	composition d'un moteur BLDC. ....	3
I.3	Constitution du Moteur BLDC.....	8
I.4	Le Système de Détection de la Position du Rotor .....	16
I.5	Principe de fonctionnement de Moteurs BLDC .....	19
I.6	Caractéristique du BLDC.....	21
I.7	Les différents types de Moteurs BLDC .....	23
I.7.1	Moteurs brushless outrunner .....	24
I.7.2	Moteurs brusheless inrunner .....	26
I.7.3	Moteurs brushless disques .....	26
I.8	Architecture et représentation du Moteur BLDC.....	35
I.9	Comparaison entres les moteurs.....	35
I.10	Démarrage d'un moteur BLDC.....	35
I.11	Avantages et Inconvénients du moteur BLDC.....	35
I.11.1	Avantage.....	24
I.11.2	Inconvénients. ....	26
I.12	Conclusion.....	37

### **CHAPITE II : Modélisation du Moteur BLDC**

II.1	introduction .....	38
II.2	Modèle mathématique du Moteur BLDC .....	38

II.2.1	Les Équations Électrique .....	39
II.2.2	La Force Électromotrice .....	39
II.2.3	L'Équation Mécanique du Mouvement .....	39
II.2.4	Couple Électromagnétique .....	39
II.3	Expressions des Courants de Phase .....	40
II.3.1	Intervalle1 .....	41
II.3.1.1	Sous Intervalle 1 .....	43
II.3.2	Intervalle2 .....	41
II.3.2.1	Sous Intervalle1 .....	43
II.3.3	Intervalle3 .....	41
II.3.3.1	Sous Intervalle1 .....	43
II.3.3.2	Sous Intervalle2 .....	43
II.3.4	Intervalle 4 .....	44
II.3.4.1	Sous Intervalle 2 .....	45
II.3.5	Intervalle 5 .....	44
II.3.5.1	Sous Intervalle 1 .....	56
II.3.5.2	Sous Intervalle 2 .....	34
II.3.6	Intervalle 6 .....	54
II.3.6.1	Sous Intervalle 1 .....	34
II.3.6.2	Intervalle 2 .....	45
II.4	Modèle Continu du moteur BLDC .....	45
II.4.1	Modèle Continu du moteur BLDC lorsque deux Phases sont Alimentées (Mode DC1)	45
II.4.1.1	Fonction de Transfert en Boucle Ouverte .....	43
II.4.1.2	Constantes de temps Mécaniques et Electriques .....	43
II.4.2	Modèle Continu du moteur BLDC lorsque trois Phases sont Alimentées (Mode DC2).	43
II.4.2.1	Le Schéma Fonctionnel du Moteur BLDC pour le Mode DC2 ....	45

II.6 conclusion.....45

## **CHAPITE III : Régulateur PID d'un moteur BLDC**

III.1 introduction ..... 46

III.2 Principe général d'un correcteur PID ..... 46

III.3 Partie de la simulation den matlab ..... 46

III.4 Application du régulateur PID sur la system BLDM ..... 47

    III.4.1 Système de contrôle de vitesse ..... 47

    III.4.2 Le Back Electro Motive Force (BEMF).....47

III.5 Modélisation Proposée Du Contrôleur PID ..... 48

III.6 Partie de la simulation den Proteus ..... 48

III.7 Résultats de la simulation den Proteus ..... 49

III.8 Conclusion .....

# **LISTE DES FIGURES**

## Liste des figures

Figure I.1 : Les Composant d'un moteur BLDC .....	3
Figure I.2 : Parties principales du moteur BLDC : (a)Machine Synchrone, (b) Circuit de commutation électronique, (c)source DC.....	5
Figure I.3 : Capteur à effet hall.....	6
Figure I.4 : Principe de fonctionnement d'un moteur BLDC triphasé.....	6
Figure I.5 : Moteurs brushless outrunner .....	7
Figure I.6 : Moteurs brushless intrunner .....	8
Figure I.7 : Moteurs brushless disques.....	8
Figure I.8 Bobinages de différents moteurs .....	9
Figure II.1 : Modèle électrique simplifié du BLDC.....	38
Figure II.2 : Formes typiques des courants et des FEMs .....	39
Figure II.3 : Ensemble moteur-commutateur.....	40
Figure II.4 : Signaux à effet hall.....	41
Figure II.5 : Schéma équivalent de l'ensemble moteur-commutateur .....	41
Figure II.6 : Schéma équivalent de l'ensemble moteur-commutateur .....	41
Figure II.7 : Schéma équivalent de l'ensemble moteur-commutateur .....	42
Figure II.8 : Schéma équivalent de l'ensemble moteur-commutateur .....	42
Figure II.9 : Schéma équivalent de l'ensemble moteur-commutateur .....	42
Figure II.10 : Schéma équivalent de l'ensemble moteur-commutateur.....	43
Figure II.11 Schéma équivalent de l'ensemble moteur-commutateur.....	43
Figure II.12 : Schéma équivalent de l'ensemble moteur-commutateur.....	44
Figure II.13 : Schéma équivalent de l'ensemble moteur-commutateur.....	44
Figure II.14 : Schéma équivalent de l'ensemble moteur-commutateur.....	44
Figure II.15 : Schéma équivalent de l'ensemble moteur-commutateur.....	44
Figure II.16 : Schéma équivalent de l'ensemble moteur-commutateur.....	44
Figure II.17 : Schéma équivalent de l'ensemble moteur-commutateur.....	44
Figure II.18 : Schéma fonctionnel d'un moteur BLDC.....	44

## LISTE DES FIGURES

---

Figure II.19 : Schéma fonctionnel d'un moteur BLDC, lorsque l'inductance est faible, ou que la constante de temps électrique $T_e$ est beaucoup plus petite que la constante de temps mécanique $T_m$ ( $T_e \ll T_m$ ),.....	44
Figure II.20 : Structure d'un commutateur-moteur BLDC lorsque deux phases sont alimentées .....	45
Figure II.21 : Schéma fonctionnel d'un moteur BLDC dans le mode DC2 .....	45
Figure III.1 : Schéma fonctionnel de la commande PID .....	47
Figure III.2 : Schéma bloc en boucle ouvert dans Simulink Matlab.....	47
Figure III.3 : Les formes d'ondes des courants et des f.é.m.....	48
Figure III.4 : 4 la simulation de la vitesse de rotation en fonction de temps boucle ouvert .....	50
Figure III.5 : Schéma fonctionnel du contrôle de vitesse du moteur BLDC .....	52
Figure III.6 : Back EMF du décodeur pour MATLAB Drive.....	53
Figure III.7 : Commutation d'onduleur pour MATLAB Drive.....	53
Figure III.8 : Conception MATLAB complète du contrôleur pour moteur BLDC.....	54
Figure III.9 : Courant de stator de 3-phase du moteur BLDC .....	55
Figure III.10 : Motor BLDC3-Phase Back Electromotive Force.....	55
Figure III.11 : Signal à effet Hall du moteur BLDC .....	55
Figure III.12 : Performances de sortie du contrôleur PID en fonction de temps .....	56
Figure III.13 : l'erreur de vitesse entre l'entrée et la sortie.....	56
Figure III.14 : la vitesse de l'entrée et la sortie .....	57
Figure III.15 : Étapes de développement conventionnelles.....	59
Figure III.16 : Étapes de développement utilisé Proteus VSM.....	59
Figure III.17 : Proteus VSM comme outil de débogage dans MPLAB IDE .....	59
Figure III.18 : Tension aux bornes 3-phase.....	59

# **LISTE DES TABLEAUX**

## **Liste des tableaux**

Tableau (I.1) : Avantages et inconvénients des moteurs électriques .....	12
Tableau (II.1) : Expressions des FEMs des 3 phases ea, eb, ec sur une période .....	40
Tableau (III.2) Tableau décodeur .....	54
Tableau (III.3) la commutation par inverseur.....	54
Tableau (III.4) Valeurs des paramètres du contrôleur PID.....	54

# INTRODUCTION GENERALE

## Introduction générale

La technologie moderne des systèmes d'entraînement exige de plus en plus un contrôle précis et continu de la vitesse, du couple et de la position, tout en garantissant la stabilité, la rapidité et le rendement le plus élevé que possible.

Le moteur à courant continu est pourvu des balais frottant sur le collecteur à lames, ce qui limite la puissance et la vitesse maximale et présente des difficultés de maintenance et des interruptions de fonctionnement.

La recherche s'orientate vers une meilleure exploitation d'actionneurs robustes, avec des caractéristiques améliorées (robustesse, fiabilité électromécanique, rendement et couple élevé, possibilités de élevé la vitesse). Parmi ces actionneurs à aimant permanent, on trouve le moteur à courant continu sans balais (en anglais :Brushless DC Motor «BLDCM »), ce moteur est une copie quasi conforme du moteur DC à collecteur, à la différence près que la fonction de commutation, réalisée mécaniquement par le collecteur dans le cas de la machine DC, est effectuée électroniquement, sans aucun contact mécanique entre stator et rotor.

La particularité de la machine BLDC est que le stator est muni de capteurs qui permettent de détecter la position du rotor afin de commander l'électronique qui assure les commutations des courants dans les phases.

Pour l'organisation de ce mémoire, notre travail s'articule principalement autour de trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une définition du BLDC avec leur principe de fonctionnement, et citer leur caractéristique et constitution

Au deuxième chapitre on modélise la machine BLDC pour les modes de fonctionnement du moteur, La modélisation faite pour le sens de rotation direct et en tenant compte de la chute de tension introduite par les interrupteurs électroniques.

Dans le troisième chapitre, nous avons appliqué le contrôleur PID classique à ce système BLDC en utilisant Matlab pour obtenir des résultats qui prouvent que le contrôleur PID fonctionne bien et les simulations obtenus le confirmentt. Nous avons également simulé le système dans le programme Proteus pour faire fonctionner le moteur en simulation virtuelle et permettre une réalisation pratique éventuelle.

# **CHAPITRE I**

## **Généralités sur les moteurs BLDC**

# Chapitre I

## Généralités sur les moteurs BLDC

### I.1 Introduction

De nos jours les moteurs à aimant permanent sans balais à courant continu (BLDC) sont de plus en plus populaires. Le moteur sans balais est ainsi devenu la solution idéale pour les applications d'aujourd'hui, de plus en plus exigeantes en termes de durée de vie et de fiabilité, d'encombrement et de poids, de consommation électrique (rendement), de faible niveau sonore et de variation de débit (asservissement), (en anglais "Brushless Direct Current BLDC")[1], [2].

### I.2 composition d'un moteur BLDC.

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

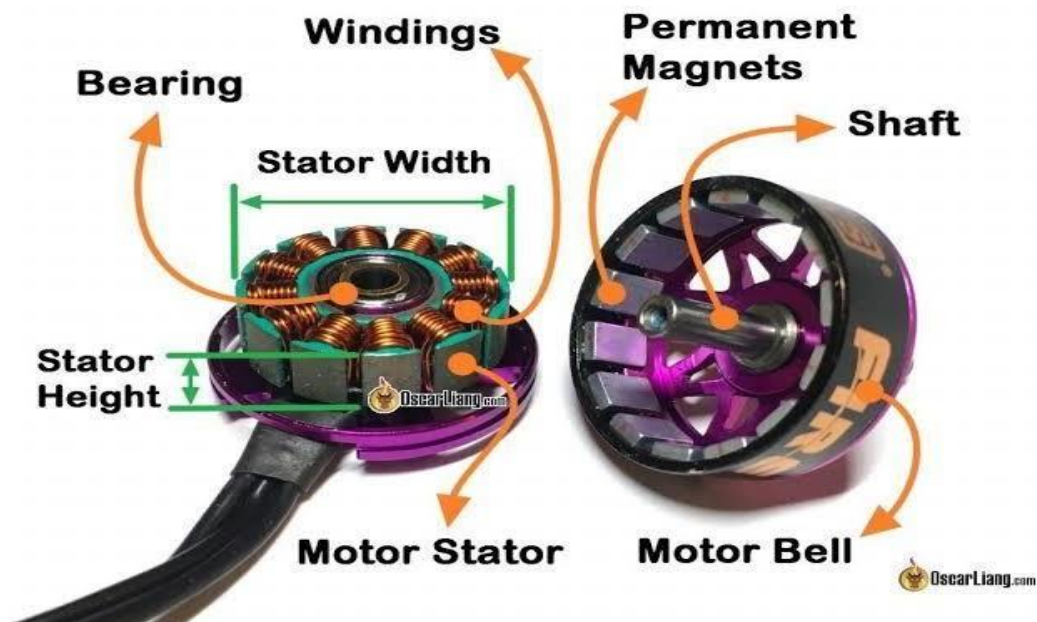


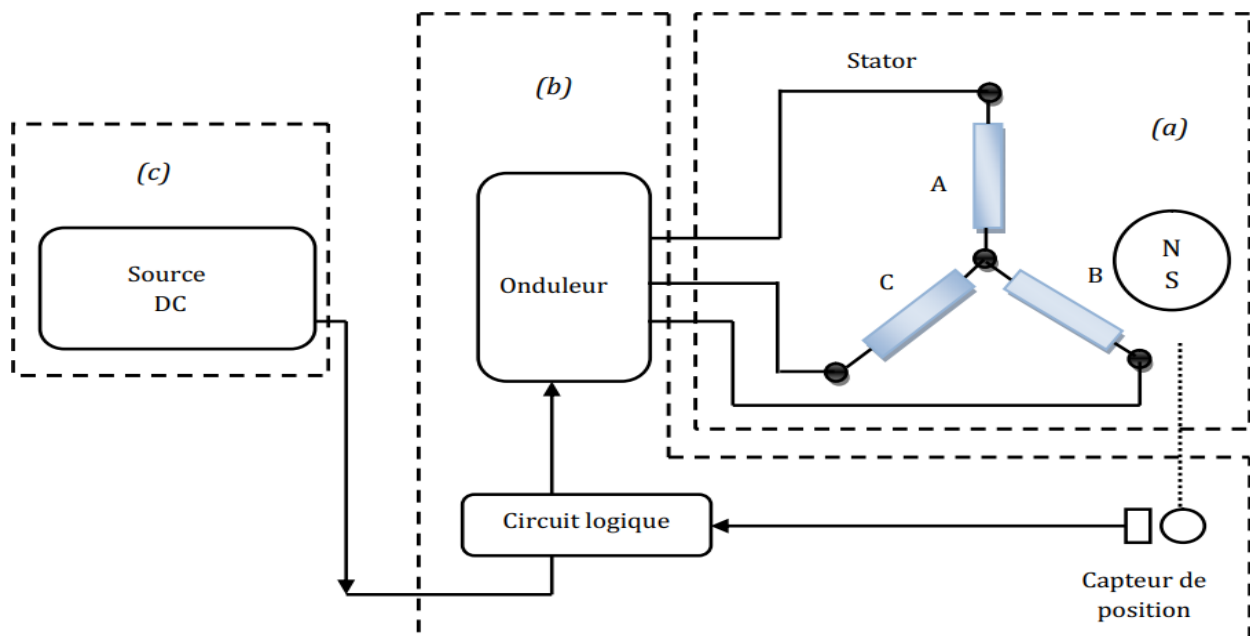
Figure I.1 Les Composant d'un moteur BLDC. [3]

### I.3 Constitution du Moteur BLDC.

Le moteur BLDC est défini comme une combinaison de la machine à courant alternatif (machine synchrone) avec un commutateur électronique et les capteurs de position du rotor. Ce type de moteur est caractérisé par une caractéristique mécanique linéaire mais, par rapport au moteur classique à courant continu il ne contient pas le commutateur mécanique et les balais. Le moteur à courant alternatif a des enroulements polyphasés sur le stator et les aimants permanents sur le rotor [4] [5]. Les parties principales du moteur BLDC, représentées sur figure I.2, sont:

- Moteur synchrone (ayant en général trois phases);
- Circuit de commutation électronique.

Le moteur est alimenté par une source de courant continu à travers une commutation Electronique [6] [7].



**Figure I.2** Parties principales du moteur BLDC : (a) Machine Synchrone, (b) Circuit de commutation électronique, (c) source DC.

## I.4 Le Système de Détection de la Position du Rotor

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 électro-optiques (capteurs d'effet de Hall "du nom de celui qui remarqua le phénomène en 1879") et le dispositif le plus généralement utilisé.

### ❖ Capteurs à effet Hall

Contrairement à un moteur à courant continu balayé, la commutation d'un moteur BLDC est commandée électroniquement. Pour faire tourner le moteur BLDC, les enroulements de stator doivent être activés dans une séquence. Il est important de connaître la position du rotor afin de comprendre ce qui enroulement sera mis sous tension après la séquence d'excitation. La position du rotor est détectée en utilisant des capteurs à effet Hall intégrés dans le stator. La plupart des moteurs BLDC ont trois capteurs de Hall intégrés dans le stator sur le côté opposé à l'entraînement du moteur. [7],[8] Chaque fois que les pôles magnétiques du rotor passent près des capteurs à effet Hall, ils donnent un signal haut ou bas, indiquant le N ou le pôle S passant à proximité des capteurs. Sur la base de la combinaison de ces trois signaux de capteurs de hall, la séquence exacte de commutation peut être déterminée [9].

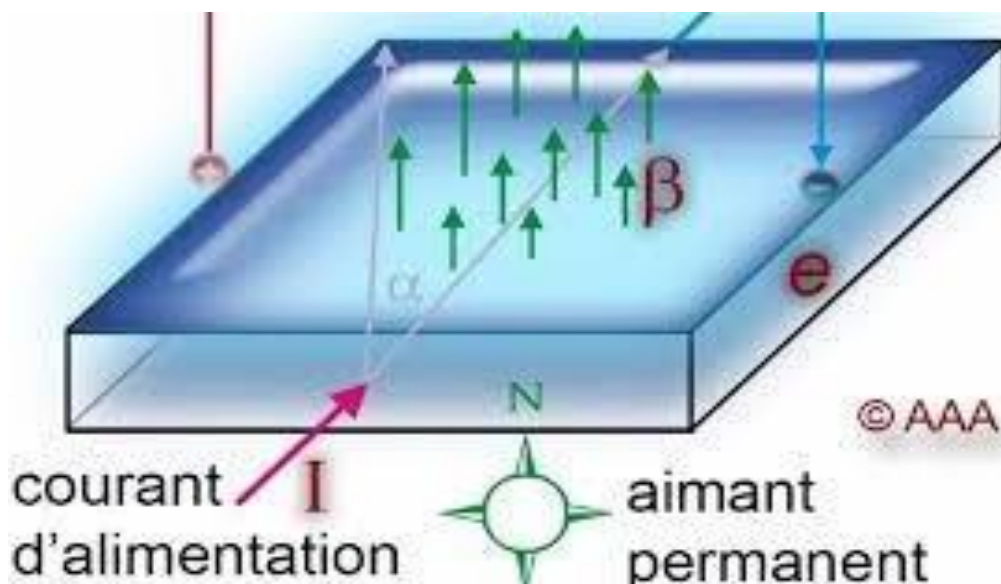


Figure I.3 Capteur à effet hall

## I.5 Principe de fonctionnement de Moteurs BLDC

Théoriquement, la machine BLDC / AC fonctionne sur le même principe que celui de la machine à courant continu conventionnel, sauf que son collecteur est remplacé par un commutateur électronique. Si l'on considère les génératrices à courant continu conventionnel les reliées en parallèle à un réseau à courant continu [1], [2]

Comme le montre la figure(I.4), nous avons maintenant faire tourner le pôle nord du rotor vers la phase P2 du stator, le phototransistor PT1 détecte la lumière et met le transistor Tr1 en marche. Dans cet état, le courant électrique passant à travers l'enroulement W1 crée un pôle sud au niveau de la phase P1 qui va attirer le pôle nord du rotor pour le déplacer dans la direction de la flèche. Quand le pôle nord vient dans l'axe de la phase P1, l'obturateur de rotation, qui est relié à l'axe, cache PT1 mais le phototransistor PT2 sera exposé à la lumière et un courant traverse le transistor Tr2.

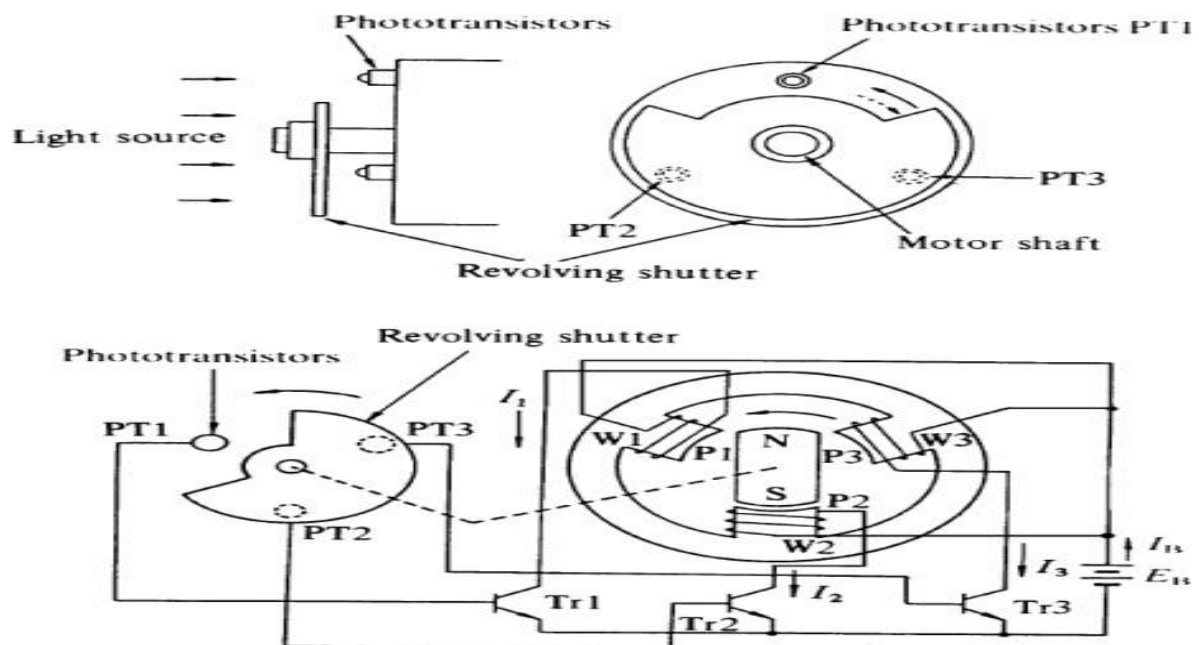


Figure I.4 Principe de fonctionnement d'un moteur BLDC triphasé

Quand le courant traverse l'enroulement W2, il crée un pôle sud dans la phase P2, alors le pôle nord du rotor tourne dans la direction de la flèche vers la phase P2. À ce moment, l'obturateur fait cache PT2, donc le phototransistor PT3 est exposé à la lumière. Ces actions orientent le courant de l'enroulement W2 de la phase P2 vers l'enroulement W3 de la phase P3. Donc, la phase P2 est désactivée, alors que la phase P3 est activée et crée le pôle sud. Par conséquent le pôle nord du rotor tourne de P2 à P3 sans s'arrêter. En répétant ces actions récurrentes, l'aimant permanent du rotor tourne sans interruption [10].

## I.6 Caractéristique du BLDC.

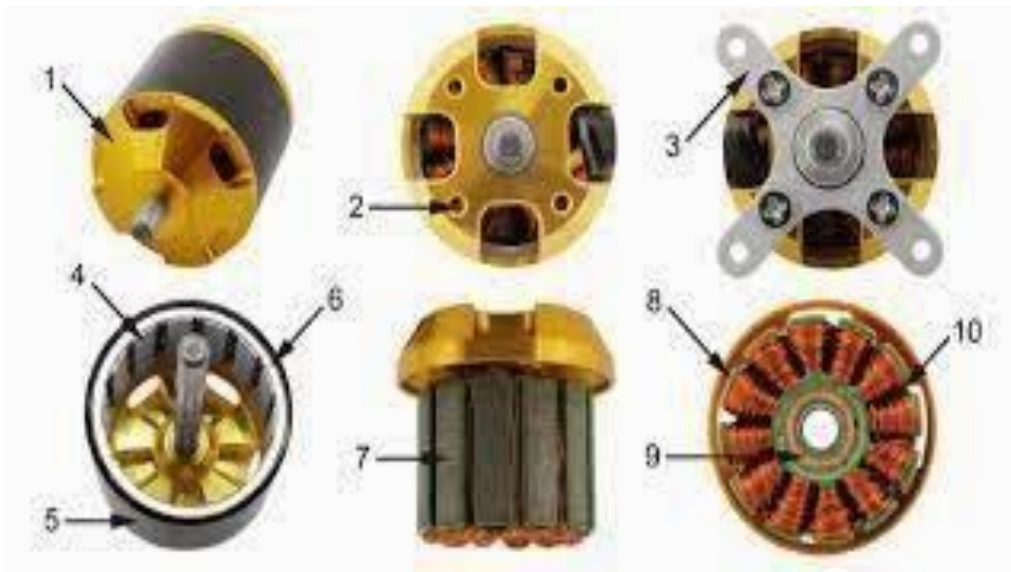
Les moteurs BLDC ont de nombreux avantages par rapport aux moteurs à courant continu brossé et des moteurs à induction. Quelques-uns d'entre eux sont :

- ❖ Les moteurs BLDC ont de nombreux avantages par rapport aux moteurs à courant continu brossé et des moteurs à induction. Quelques-uns d'entre eux sont:
- ❖ Meilleure vitesse par rapport à la réponse de couple
- ❖ Réponse dynamique élevée
- ❖ Haute efficacité
- ❖ durée de vie longue
- ❖ Fonctionnement silencieux

En outre, le rapport du couple délivré à la taille du moteur est plus élevé, ce qui est utile dans les applications où l'espace et le poids sont des facteurs critiques. Idéalement, les moteurs BLDC ont des FEMs de forme d'onde trapézoïdale et sont nourris avec des courants du stator rectangulaires, qui donnent un couple théoriquement constant. [1], [7].

## I.7 Les différents types de Moteurs BLDC.

### I.7.1 Moteurs brushless outrunner



**Figure I.5:** Moteurs brushless outrunner

Les moteurs brushless outrunners comprenant plus de 3 bobines et 2 pôles ne font qu'une fraction de tour lorsque le champ a tourné de  $180^\circ$ . Leur fréquence de rotation est donc plus faible mais le couple très élevé. Ces moteurs brushless outrunners 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 Kv est relativement faible par rapport aux autres types de moteurs brushless. Chaque composant des moteurs est de la plus haute qualité, des matériaux utilisés, de la boîte qu'ils expédient. Ils sont conçus pour

fournir une énergie fiable pour votre modèle réduit d'avion à des prix abordables, offrant une solution de performance totale.

### I.7.2 Moteurs brushless inrunner

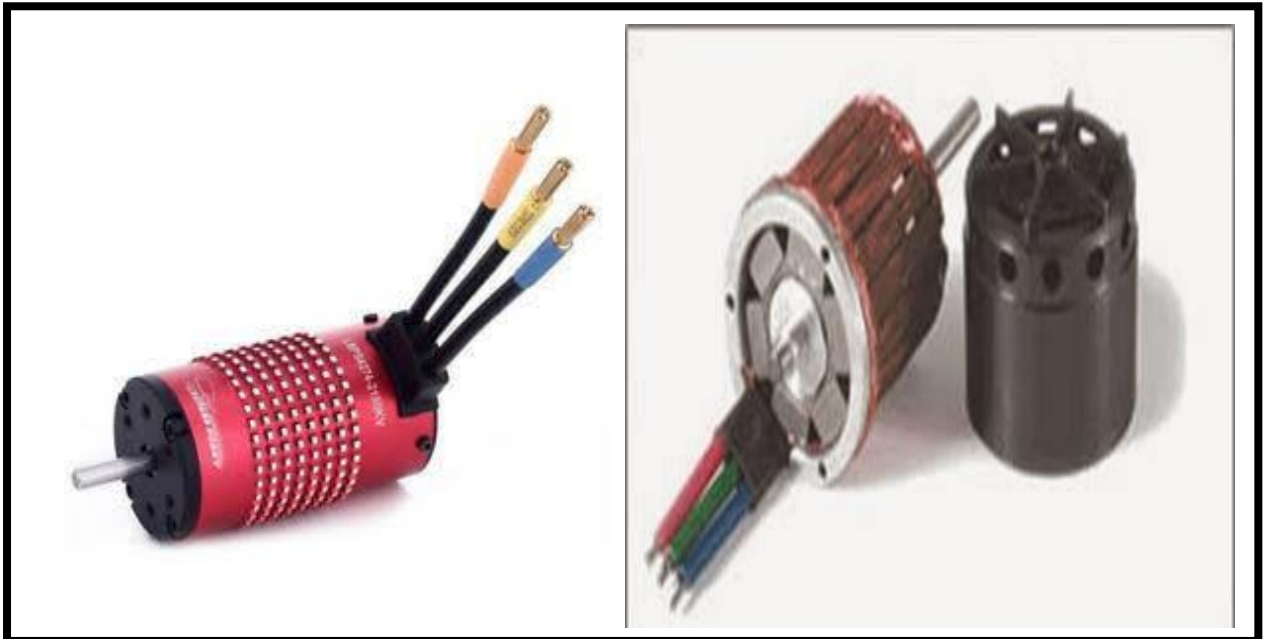


Figure I.6 : Moteurs brushless inrunner

Les «inrunners» ont été les seuls moteurs brushless utilisés au début de la propulsion électrique en aéromodélisme. Ils ont le plus souvent deux ou quatre pôles et nécessitent donc un réducteur du fait des régimes importants de rotation incompatibles avec les régimes de rotation maximaux des hélices. Leur rendement maximum est de l'ordre de 90 %, mais le réducteur en aval diminue ce rendement d'environ 5%. Ils sont d'une utilisation plutôt rare aujourd'hui dans notre univers car supplantés par les «outrunners». On les distingue facilement par le fait que leur forme est un cylindre fixe avec seul un axe tournant à une extrémité.

### I.7.3 Moteurs brushless disques



*Figure I.7: Moteurs brushless disques*

Le rotor et le stator peuvent également être constitués de deux disques faces à face, avec les rayons et les bobines répartis selon les rayons de ces deux disques. Ce type de moteur brushless est peu employé car l'action des bobines sur les aimants crée un effort axial important qui nécessite des butées à billes conséquentes [11].

### **I.8 Architecture et représentation du Moteur BLDC.**

Selon les critères de puissance, d'encombrement, ou de qualité, les bobinages des moteurs sont différents. Deux architectures se trouvent couramment :

L'organisation des bobinages répartis sur plusieurs encoches (figure I.8, photo de gauche, sur les moteurs relativement puissants) ou au contraire des bobines isolées sur une encoche (photo de droite, sur les petits moteurs à bas coût).

La représentation figure 2 s'approche de la photo de droite.



Figure I.8 : Bobinages de différents moteurs

### I.9 Comparaison entre les moteurs.

Type de moteurs	Les avantages	Les inconvénients
<b>Moteur à courant continu</b>	-Simple et efficace pour les faibles charges. -Ne nécessitant pas un circuit de commande compliqué	Les balais doivent être Remplacés périodiquement
<b>Moteur à courant continu sans balais</b>	Un bon rendement Ne demande pas de maintenance	La commutation électronique ajoute des dépenses de plus et avec le risque de défaillance
<b>Moteur à courant alternative</b>	-De larges gammes disponibles pour de larges gammes de charge-Moins cher que le moteur à courant continu	-Moins efficace que le moteur à courant continu -Nécessités un onduleur

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients des moteurs électriques [12].

## I.10 Démarrage d'un moteur BLDC

Le même problème se pose pour le démarrage du moteur BLDC, car le rotor ne peut pas atteindre instantanément la vitesse de rotation du champ. Le système de contrôle électronique doit donc assurer un démarrage progressif, l'objectif étant toujours de reproduire la fonction du collecteur. La fréquence des tensions d'alimentations sera donc très basse au départ, puis augmentée progressivement en tenant compte de la réaction du moteur.

## I. 1Avantages et Inconvénients du moteur BLDC

Un moteur BLDC est largement utilisé dans de nombreuses applications industrielles, telles que le véhicule hybride, électriques ordinateurs comme voiture de contrôle de radio. Mais avez-vous déjà pensé à ses avantages et ses inconvénients ? La plupart du temps, nous ne pouvons pas concert sur cette question car nous pensons que ce n'est pas important pour moi. Il fait ce qu'il dit.

En fait, c'est une très importante pour nous. Si vous souhaitez mettre à niveau votre modèle RC ou profiter de sang bouillant de sentiment. À l'instar de pourquoi nous remplacement brossé moteur avec un BLDC. Donc, nous allons avoir un regard profond à de ces moteurs BLDC

### I.11.1Avantage

Lorsque vous posez la question, beaucoup de gens peut-être vous dire brushless moteurs ont un contrôle supérieur, précision et efficacité, bien que beaucoup plus silencieux. Oui, c'est vrai.

#### ❖ Haute efficacité

Moteurs brushless sont plus efficaces à la conversion de l'électricité en puissance mécanique que les moteurs brushed, Comme il alimenté par une source électrique DC via l'onduleur intégré/commutation d'alimentation, qui produit un signal électrique alternatif pour entraîner le moteur, électronique et capteurs supplémentaires contrôle l'amplitude de sortie onduleur et de forme d'onde et de fréquence.

Mais dans un moteur brushed, un électro-aimant est monté sur un bras de rotation, appelé induit ou rotor. L'induit se trouve entre deux aimants définies dans une configuration de fer à cheval, collectivement appelée le stator. Quelle puissance est alimenté à l'électro-aimant, le bras se déplace, en alignant les pôles Nord et sud de l'électro-aimant avec les pôles opposés du stator.

#### ❖ Plus silencieux

Vous pouvez réduire le bruit une fois que vous mettez à niveau votre modèle de contrôle radio avec moteurs brushless. Ils genres faible bruit, alors vous ne soyez pas soucis à ce sujet vous dérangez votre voisin.

#### ❖ Beaucoup de temps à l'aide

En raison de l'absence de balais, moteurs brushless, soulager les pertes dues à la friction. Et dans les plus grands modèles où la surchauffe peut être un problème, ils

sont plus faciles à refroidir. Le renforcement de l'efficacité est plus grande dans la région de marche à vide et charge faible de la courbe de rendement du moteur.

### **I.11.2 Inconvénients.**

Pour la plupart des gens qui ont le moteur brushless dira moteur brushless est cher. C'est vrai. Mais avez-vous pensé à ce qui cause le problème.

Brossés moteurs sont peu coûteux à produire, mais les balais s'usent du frottement contre le point de contact et l'essieu. Friction de ce contact entrave également les performances. Pour moteur brushless, comme il est apparu plus tard que brossé, quels que soient la technologie ou de matériaux, il y a grands défis. Aussi, le contrôleur électrique est nécessaire pour maintenir le moteur en marche. Il offre le double du prix du moteur. Les coûts élevés causent le prix cher final. La technologie est toujours à l'avance, nous devons croire que les moteurs de qualité supérieure seront avisés par nous [13].

### **I.12 Conclusion.**

On a vu dans ce chapitre que le moteur BLDC est un moteur qui comporte les mêmes éléments qu'un moteur à courant continu sachant que ce moteur est défini comme une combinaison de la machine synchrone avec un commutateur électronique et les capteurs de position du rotor et on a vu aussi que ce type de moteur a des caractéristiques améliorées (robustesse, fiabilité électromécanique, rendement et couple élevé, possibilités de élevé la vitesse).

# **CHAPITRE II**

## **Modélisation du**

### **Moteur BLDC**

## Chapitre II

### Chapitre II : Modélisation du Moteur BLDC

#### II. 1 Introduction

Bien que la plus ancienne des machines électriques industrielles, la machine à courant continu reste très utilisée et particulièrement comme actionneur. Ceci tient au fait que son fonctionnement est d'une grande simplicité, de même que sa modélisation, mais surtout ses performances statiques et dynamiques sont exceptionnelles [14]. En effet le couple est le produit vectoriel de deux grandeurs naturellement orthogonales (flux inducteurs et courant d'induit) quasiment indépendantes et indépendantes de la vitesse et de la position du rotor. Cependant, la fragilité du système balais collecteur a toujours été un inconvénient de la M.C.C, ce qui limite la puissance et la vitesse maximale et présente des difficultés de maintenance et des interruptions de fonctionnement [15]. C'est pour cette raison qu'on a eu intérêt à utiliser des moteurs BLDC afin d'écartier cet inconvénient.

Le moteur BLDC (Brushless Direct Current) qui appartient à la catégorie des moteurs synchrones à aimant permanent, est devenu de plus en plus un outil utilisé dans une grande quantité de secteur industriel par ce que leur architecture est adaptée à toutes les applications critiques de sécurité en particulier (les disques durs et lecteur DVD/CD, véhicules électriques, véhicules hybrides, vélos électriques, les robots industriels, machines-outils à commande numérique, machine à laver, les ventilateurs assurant le refroidissement des micro-ordinateurs et les applications médicale).

#### II.2 Modèle mathématique du Moteur BLDC

Les Équations Électriques qui régissent le fonctionnement du moteur BLDC

Sont données par les équations suivantes [8], [16]

##### II.2.1 Les Équations Électrique.

$$\vec{V} = [R]i + \frac{d\vec{\varphi}_M}{dt} \quad (II.1)$$

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

Où :

$\vec{V}$ ,  $\vec{\varphi}$  et  $i$  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 (II.3) et (II.4)

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

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

Les variables d'états sous forme matricielle sont données, ci-après :

$$\vec{V} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \vec{i} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \vec{\varphi} = \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix}, \vec{\varphi}^M = \begin{bmatrix} \varphi_{Ma} \\ \varphi_{Mb} \\ \varphi_{Mc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_0 \cos \theta \\ \varphi_0 \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \varphi_0 \cos(\theta - 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

$\varphi_0$ : L'amplitude du flux magnétique créé par l'aimant permanent et  $\theta$ : l'angle Electrique.

Alors

$$\vec{V} = [R]\vec{i} + \frac{d}{dt}([L]\vec{i} + \vec{\varphi}^M) \quad (\text{II.6})$$

$$\vec{V} = [R]\vec{i} + \frac{d}{dt}([L]\vec{i}) + \frac{d\vec{\varphi}^M}{dt} \quad (\text{II.7})$$

$$\vec{E}p = \frac{d\vec{\varphi}^M}{dt} \quad (\text{II.8})$$

Où

$E_p$  : représente la force électromotrice.

Pour un enroulement triphasé symétrique et un système équilibré (figure. II.1), le vecteur des tensions aux bornes des trois phases est donné par :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

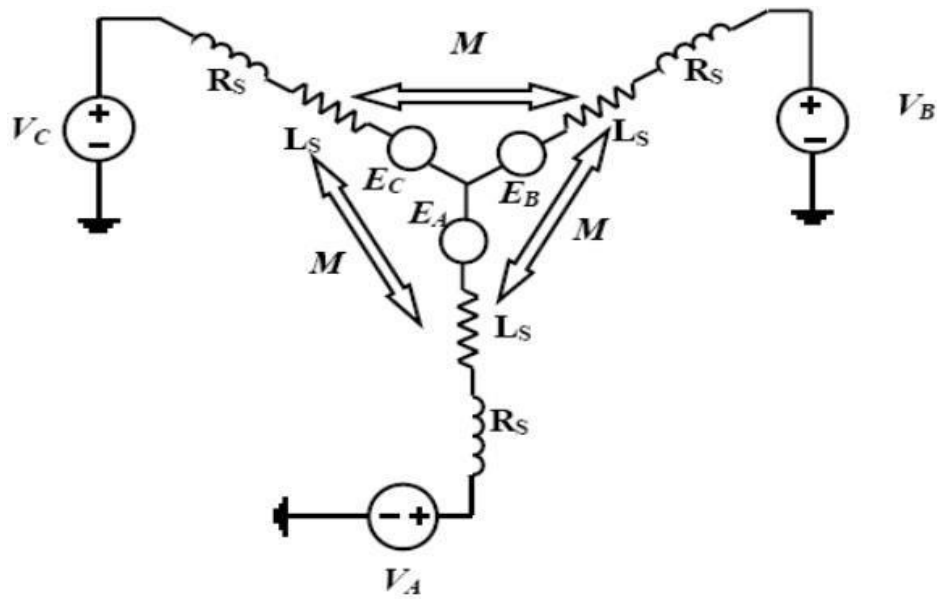


Figure II.1 Modèle électrique simplifié du BLDC

La position électrique  $\theta$  du rotor se déduit directement de la position mécanique du rotor  $\theta_r$  (mesurée par le capteur) par :

$$\theta = p\theta_r \tag{II.10}$$

Ou :

P : est le nombre de paires de pôles du moteur, par conséquent, l'expression de la vitesse électrique est donnée par :

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = p \frac{d\theta_r}{dt} = p\omega_r \tag{II.11}$$

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 :

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} \tag{II.12}$$

Et les inductances mutuelles sont également identiques ; données par :

$$L_{ab} = L_{ba} = L_{ac} = L_{ca} = L_{bc} = L_{cb} = M \quad (\text{II.13})$$

Les équations sous la forme matricielle ; exprimée par :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

Puisque les enroulements du stator sont couplés en étoile, la somme des trois courants de phase est nulle :

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (\text{II.15})$$

Alors :

$$i_a + i_b = -i_c \quad (\text{II.16})$$

Par conséquent, la tension prend la forme suivante [16], [17]

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L - M & 0 & 0 \\ 0 & L - M & 0 \\ 0 & 0 & L - M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

$e_a = f_a(\theta) k_e \omega r$  la force électromotrice de la phase  $a$

$e_b = f_b(\theta) k_e \omega r$  la force électromotrice de la phase  $b$  (II.18)

$e_c = f_c(\theta) k_e \omega r$  la force électromotrice de la phase  $c$

Avec :

$k_e$  : est le coefficient de la force électromotrice  $f_a(\theta)$ ,  $f_b(\theta)$  et  $f_c(\theta)$  sont des fonctions dépendant uniquement de la position du rotor [18].

### II.2.2 La Force Électromotrice

La force électromotrice induite est déterminée par la position angulaire de l'aimant, c'est à dire du rotor, il est très important de remarquer que la valeur crête de la FEM est directement proportionnelle à la vitesse angulaire instantanée du rotor [19] [20] :

$$E_p = k_e \omega r \quad (\text{II.19})$$

Les formes typiques des FEMs induites et des courants dans les trois phases sont illustrées par la figure II.2.

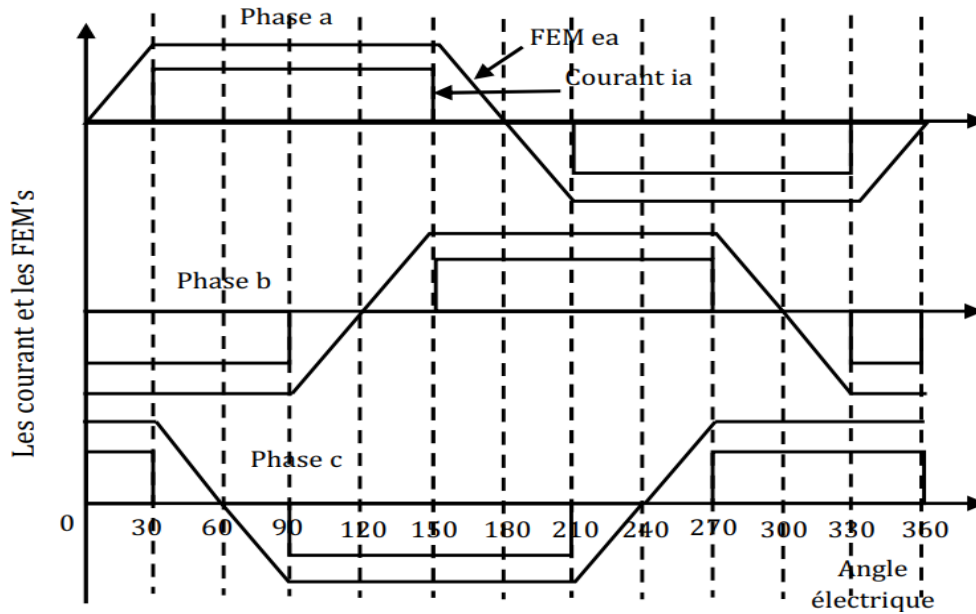


Figure II.2 Formes typiques des courants et des FEMs

### II.2.3 L'Équation Mécanique du Mouvement

Le modèle mécanique du moteur BLDC est donné par l'équation II.20 :

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = C_e - f\omega_r - C_r \quad (\text{II.20})$$

Où :

$\omega_r$  est la vitesse angulaire en rad/s;

$C_e$  est le couple électromagnétique développé en  $N/m$ ;

$C_r$  est le couple de charge en  $N/m$ ;

$f$  est le coefficient de frottement en  $N. (m/rad) \cdot s^{-1}$

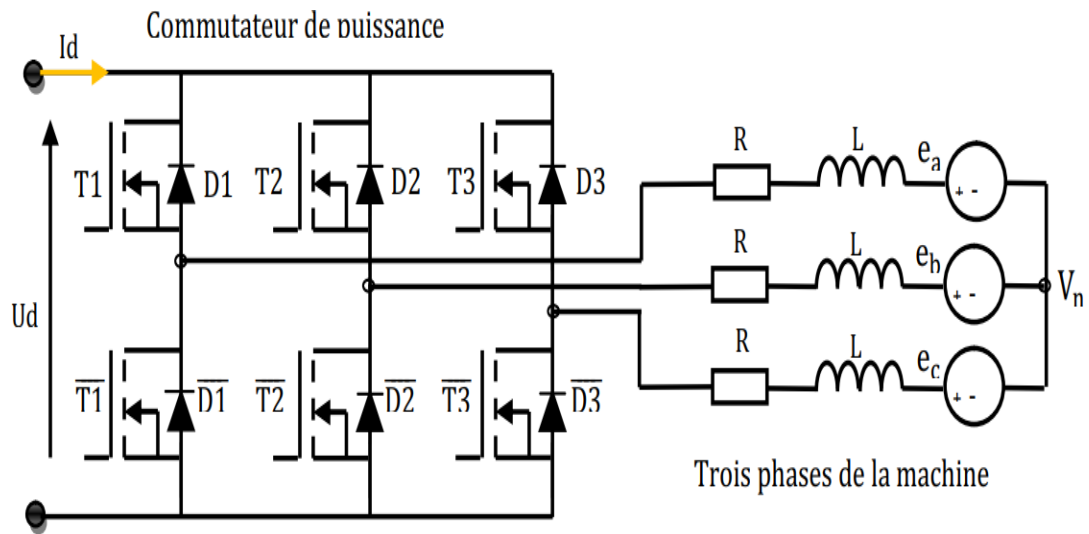
### II.2.4 Couple Électromagnétique

Le couple électromagnétique développé par le moteur BLDC est donné par [16], [8] :

$$C_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_r} \quad (\text{II.21})$$

### II.2.5 Modèle de l'ensemble Machine-Commutateur Electronique.

Comme mentionné précédemment, le moteur BLDC nécessite un commutateur électronique pour assurer l'alimentation successive des enroulements. Le schéma de principe de ce commutateur électronique est donné par la figure II.3 [22] [21]



**Figure II.3** Ensemble moteur-commutateur

Nous supposons que :

- ❖ les trois phases du moteur sont entièrement symétriques et produisent des FEMs induites périodiques de formes trapézoïdales ;
- ❖ le temps de commutation entre les phases est séparé avec  $60^\circ$  électrique [16], [23];

Les séquences de commandes des différents interrupteurs de commutateur électronique sont assurées par les signaux de position du rotor donnés par le capteur à effet hall (voir figure II.4 ci-dessous) [16], [23]

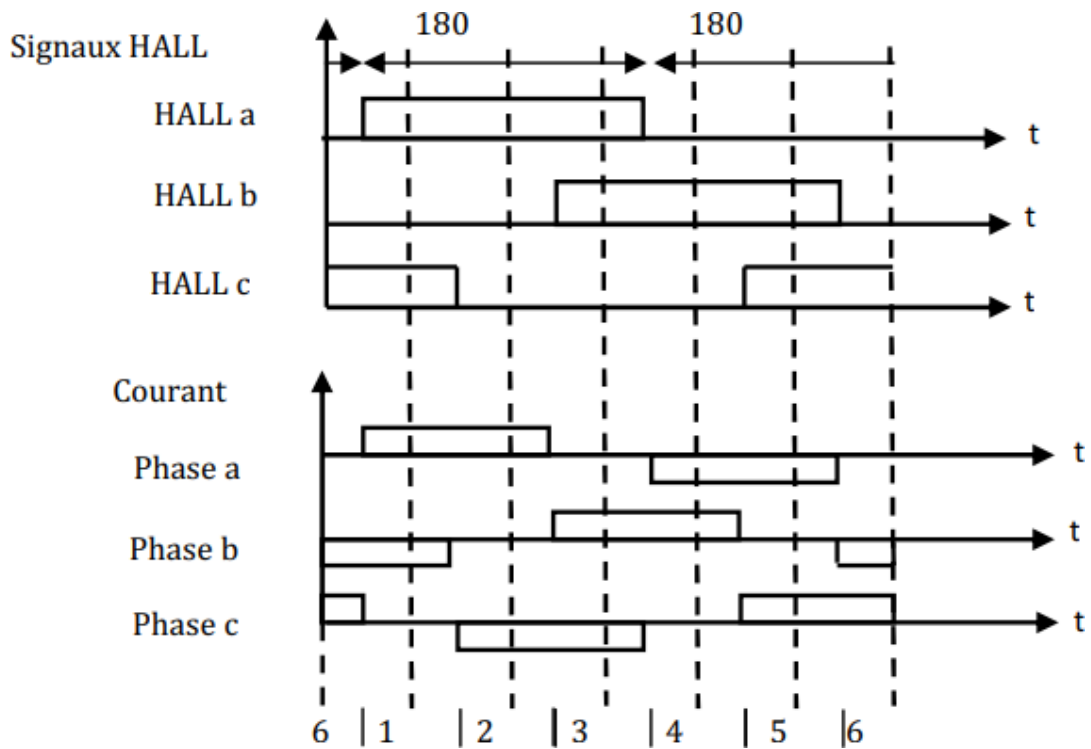


Figure II.3 Signaux à effet hall

Les expressions des FEMs induites dans chaque phase du moteur sont résumées dans le tableau II.1

$\theta$	FEM $ea$	FEM $eb$	FEM $ec$
$0 \rightarrow \frac{\pi}{3}$	$k_e \omega r$	$-k_e \omega r$	$-(6k_e \frac{\omega r}{\pi}) \theta$ $+ k_e \omega r$
$\frac{\pi}{3} \rightarrow \frac{2\pi}{3}$	$k_e \omega r$	$(6k_e \frac{\omega r}{\pi}) \theta$ $- 3k_e \omega r$	$-k_e \omega r$
$\frac{2\pi}{3} \rightarrow \pi$	$-(6k_e \frac{\omega r}{\pi}) \theta$ $+ 5k_e \omega r$	$k_e \omega r$	$-k_e \omega r$

$\pi \rightarrow 4 \frac{\pi}{3}$	$-k_e \omega r$	$k_e \omega r$	$(6k_e \frac{\omega r}{\pi}) \theta$ $- 7k_e \omega r$
$4 \frac{\pi}{3} \rightarrow 5 \frac{\pi}{3}$	$-k_e \omega r$	$-(6k_e \frac{\omega r}{\pi}) \theta$ $+ 9k_e \omega r$	$k_e \omega r$
$5 \frac{\pi}{3} \rightarrow 2\pi$	$(6k_e \frac{\omega r}{\pi}) \theta$ $- 11k_e \omega r$	$-k_e \omega r$	$k_e \omega r$

Tableau (II.1) : Expressions des FEMs des 3 phases *ea*, *eb*, *ec* sur une période

### II.3 Expressions des Courants de Phase

#### II.3.1 Intervalle<sub>1</sub>: ( $\frac{\pi}{6} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ )

##### II.3.1.1 Sous Intervalle 1: ( $\frac{\pi}{6} \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}$ )

Le chemin principal du courant est à travers les phases *a* et *b* via les deux transistors **T1** et **T2** l'autre chemin est à travers les phases *c* et *b* via le transistor **T2** et la diode **D3** Cela est indiqué à la figure II.5 :

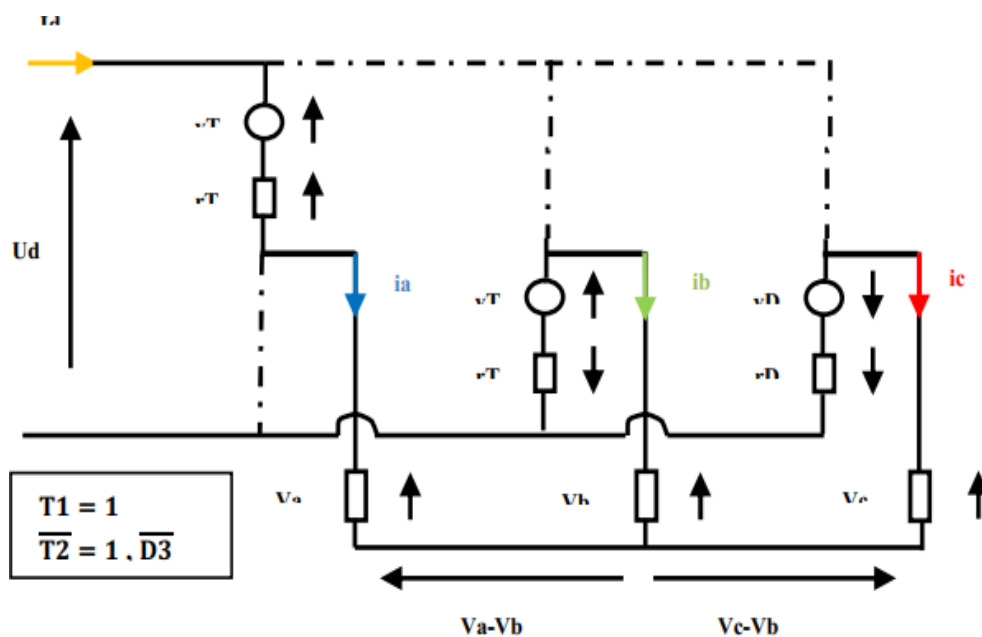


Figure II.5 : Schéma équivalent de l'ensemble moteur-commutateur

A partir la figure II.5, on applique la loi des mailles pour les deux chemins on a :

$$\begin{cases} V_a - V_b + r_T i_a + v_T - u_d - r_T i_b + v_T = 0 \\ V_c - V_b + v_D + r_D i_c - r_T i_b + v_T = 0 \end{cases} \quad (\text{II. 22})$$

Les trois tensions de phase du moteur BLDC sont

$$\begin{aligned} V_a &= R i_a + L \frac{di_a}{dt} + M \left( \frac{di_b}{dt} + \frac{di_c}{dt} \right) + e_a \\ V_b &= R i_b + L \frac{di_b}{dt} + M \left( \frac{di_a}{dt} + \frac{di_c}{dt} \right) + e_b \\ V_c &= R i_c + L \frac{di_c}{dt} + M \left( \frac{di_a}{dt} + \frac{di_b}{dt} \right) + e_c \end{aligned} \quad (\text{II. 23})$$

Du fait que le neutre du récepteur est isolé on a :

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (\text{II. 24})$$

Donc :

$$\begin{aligned} \left( \frac{di_b}{dt} + \frac{di_c}{dt} \right) &= - \frac{di_a}{dt} \\ \left( \frac{di_a}{dt} + \frac{di_c}{dt} \right) &= - \frac{di_b}{dt} \\ \left( \frac{di_a}{dt} + \frac{di_b}{dt} \right) &= - \frac{di_c}{dt} \end{aligned} \quad (\text{II. 25})$$

Alors :

$$\begin{aligned} V_a &= R i_a + (L - M) \frac{di_a}{dt} + e_a \\ V_b &= R i_b + (L - M) \frac{di_b}{dt} + e_b \\ V_c &= R i_c + (L - M) \frac{di_c}{dt} + e_c \end{aligned} \quad (\text{II. 26})$$

On applique la loi des mailles pour obtenir les équations des courants dans les trois phases [4].

On remplace  $i_b$  par  $(-i_a - i_c)$  et  $V_a, V_b$  et  $V_c$  par leur expression **II.26** ce qui donne :

$$\begin{cases} 2R i_a + R i_c + (L - M) \left( 2 \frac{di_a}{dt} + \frac{di_c}{dt} \right) + e_a - e_b + 2r_T i_a + 2v_T - u_d + r_T i_a = 0 \\ R i_a + 2R i_c + (L - M) \left( \frac{di_a}{dt} + 2 \frac{di_c}{dt} \right) + e_c - e_b + v_D + r_D i_c + r_T i_c + r_T i_a + v_T = 0 \end{cases} \quad (\text{II. 27})$$

Donc :

$$\begin{cases} 2 \frac{di_a}{dt} + \frac{di_c}{dt} = \frac{1}{(L-M)} [u_d - 2v_T - e_a + e_b - 2(R+r_T)i_a - (R+r_T)i_c] \\ \frac{di_a}{dt} + 2 \frac{di_c}{dt} = \frac{1}{(L-M)} [-v_T - v_D + e_b - e_c - (R+r_T) - (2R+r_T+r_D)i_c] \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

Le système II.28 peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \end{bmatrix} = \frac{1}{(L-M)} \begin{bmatrix} u_d - 2v_T - e_a + e_b - 2(R+r_T) & -(R+r_T)i_c \\ -v_T - v_D + e_b - e_c - (R+r_T) & -(2R+r_T+r_D)i_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

Ce qui conduit à la forme résolue suivante :

$$\begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \end{bmatrix} = \frac{1}{(L-M)} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_d - 2v_T - e_a + e_b - 2(R+r_T)i_a - (R+r_T)i_c \\ -v_T - v_D + e_b - e_c - (R+r_T) - (2R+r_T+r_D)i_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

Donc, les équations de courants dans les trois phases pour ce sous intervalle sont :

$$\begin{aligned} \frac{di_a}{dt} &= \frac{1}{3(L-M)} [2u_d - 3v_T - v_D - 2e_a + e_b + e_c - 3(R+r_T)i_a + (r_D - r_T)i_c] \\ \frac{di_c}{dt} &= \frac{1}{3(L-M)} [-u_d - 2v_D + e_a + e_b - 2e_c - (3R+r_T+2r_D)i_c] \\ i_b &= (-i_a - i_c) \end{aligned} \quad (\text{II.31})$$

**Remarque :** comme le récepteur dans tous les premiers sous intervalles est triphasé équilibré à neutre isolé alors le vecteur  $V = [V_a \ V_b \ V_c]$  peut se calculer par la relation suivante :

$$V = M_c \times S \times u_d \quad (\text{II.32})$$

$$\text{Ou } S = [S_a \ S_b \ S_c] \text{ Désigne les états des bras. [25] [24]} \quad (\text{II.33})$$

$$M_c = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \text{ Désigne la matrice de transfert de l'onduleur. } \quad (\text{II.34})$$

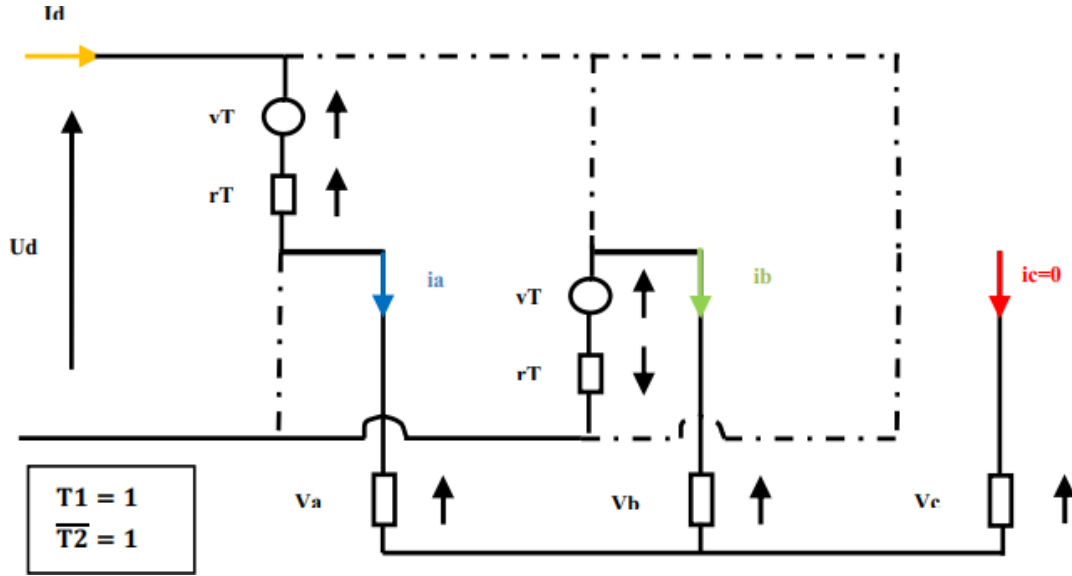
- ❖ Si la phase  $e_j = (a, b, c)$  est branchée à un transistor ou à une diode de la partie supérieure, alors  $S_j = 1$ ...
- ❖ Si la phase  $j$  est branchée à un transistor ou à une diode de la partie inférieure, alors  $S_j = 0$ .

Et pour ce cas, la phase 1 est branchée au transistor T1 donc :

$$S^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ et } V = \begin{bmatrix} \frac{2}{3}u_d & -\frac{1}{3}u_d & -\frac{1}{3}u_d \end{bmatrix}^T \quad (\text{II.35})$$

**II.3.1.2 Sous Intervalle 2 : ( $\pi/3 \leq \theta \leq \pi/2$ )**

La phase *c* est débranchée ( $i_c = 0$ ) et la diode de roue libre  $\overline{D_3}$  est bloquée. Dans ce cas on a seulement le chemin principal, c'est-à-dire le courant passe seulement à travers les 2 phases *a* et *b* comme il est indiqué à la **figure II.6** :



**Figure II.6** : Schéma équivalent de l'ensemble moteur-commutateur

Les équations de courants sont :

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{1}{2(L-M)} [u_d - \mathcal{E}_T - e_a + e_c - 2(R + r_T)i_a] \\ i_b = 0 \\ i_c = -i_a \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

Les mêmes étapes sont appliquées pour déterminer les courants et les tensions des phases pour les autres intervalles de fonctionnement :

**II.3.2 Intervalle 2 : ( $\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{5\pi}{6}$ )**

**II.3.2.1 Sous Intervalle 1 ( $\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{2\pi}{3}$ )** (les composants qui fonctionnent)

sont (T1, T3, D2))

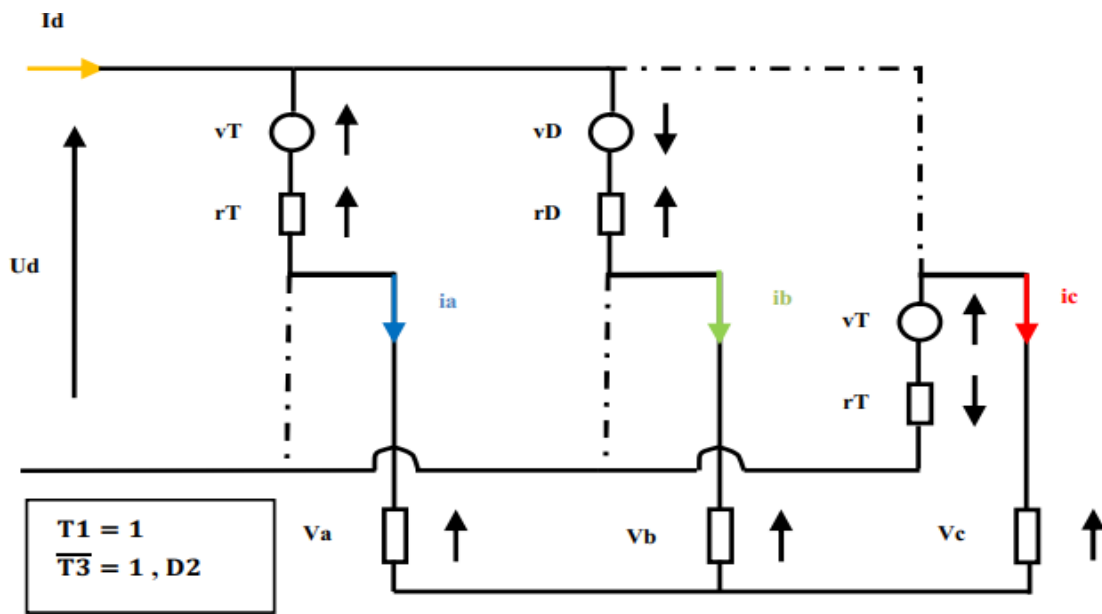


Figure II.7 : Schéma équivalent de l'ensemble moteur-commutateur

Les équations de courants sont :

$$\begin{aligned} \frac{di_a}{dt} &= \frac{1}{3(L-M)} [u_d - v_{T1} - v_{D2} - 2e_a + e_b + e_c - 3(R_T + r_D) i_a + (r_D - r_T) i_b] \\ \frac{di_b}{dt} &= \frac{1}{3(L-M)} [u_d + v_{D2} + e_a - 2v_{T1} + e_b - (3R_T + r_D + 2r_b) i_b] \\ i_c &= (-i_a - i_b) \end{aligned} \tag{II.37}$$

Donc :

$$S^T = [1 \quad 1 \quad 0] \tag{II.38}$$

ET

$$V = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} u_d & \frac{1}{3} u_d & -\frac{2}{3} u_d \end{bmatrix}^T \tag{II.39}$$

II.3.2.2 Sous Intervalle 2 :  $(\frac{2\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{5\pi}{6})$  ( $i_b = 0$ )

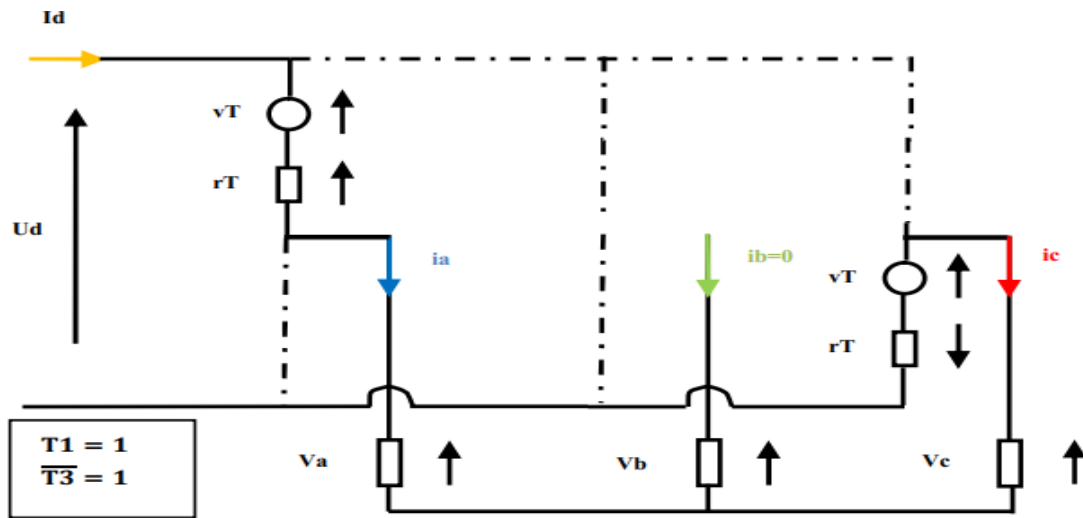


Figure II. 8 : Schéma équivalent de l'ensemble moteur-commutateur

Les équations de courants sont :

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{1}{2(L-M)} [u_d - e_a - e_c - 2(R+r_a)i_a] \\ i_b = 0 \\ i_c = -i_a \end{cases} \quad (II.40)$$

II.3.3 Intervalle 3 :  $(\frac{5\pi}{6} \leq \theta \leq \frac{7\pi}{6})$

II.3.3.1 Sous Intervalle 1  $(\frac{5\pi}{6} \leq \theta \leq \pi)$  (les composants qui fonctionnent sont  $(T2, \overline{D1})$ ):

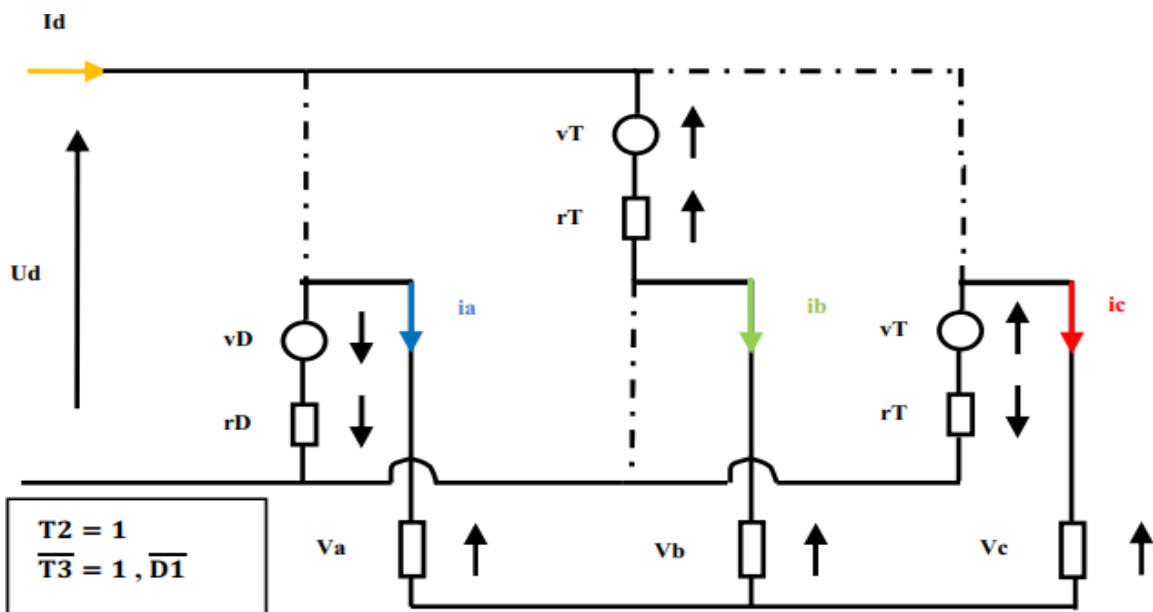


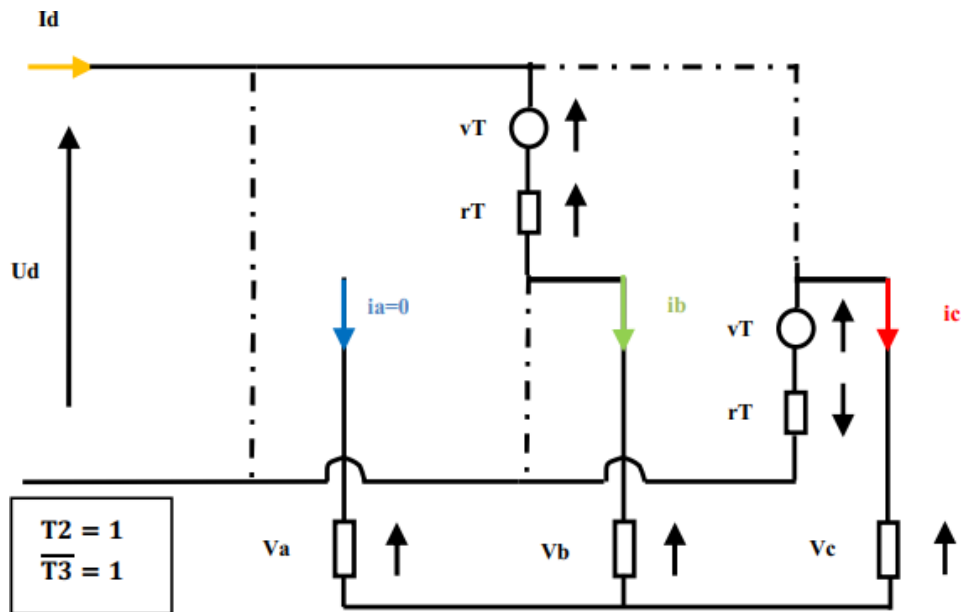
Figure II.9 : Schéma équivalent de l'ensemble moteur-commutateur

Les équations de courants sont :

$$\begin{aligned} \frac{di_a}{dt} &= \frac{1}{3(L-M)} [-u_d - \mathfrak{L}_{Dd} - \mathfrak{L}_{Da} + e_b + e_c - (3R + r_T + \mathfrak{L}_{Dd})i_a] \\ \frac{di_b}{dt} &= \frac{1}{3(L-M)} [2u_d - \mathfrak{L}_{Td} + v_D + e_a - \mathfrak{L}_{Db} + e_c - 3(R + r_T)i_b + (\mathfrak{L}_{Dd} - r_T)i_a] \\ i_c &= (-i_a - i_b) \end{aligned} \quad (\text{II.41})$$

Donc :  $S^T = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$  et  $V = \begin{bmatrix} -\frac{1}{3}u_d & \frac{2}{3}u_d & -\frac{1}{3}u_d \end{bmatrix}^T$  (II.42)

**II.3.3.2 Sous Intervalle 2 : ( $\pi \leq \theta \leq \frac{7\pi}{6}$ ) ( $i_a = 0$ )**



**Figure II.10 :** Schéma équivalent de l'ensemble moteur-commutateur.

Les équations de courants sont :

$$\begin{cases} \frac{di_b}{dt} = \frac{1}{2(L-M)} [u_d - \mathfrak{L}_{Td} - e_b + e_c - 2(R + r_T)i_b] \\ i_a = 0 \\ i_c = -i_b \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

**II.3.4 Intervalle 4: ( $\frac{7\pi}{6} \leq \theta \leq \frac{4\pi}{3}$ ) (les composants qui fonctionnent sont (T2, T3))**

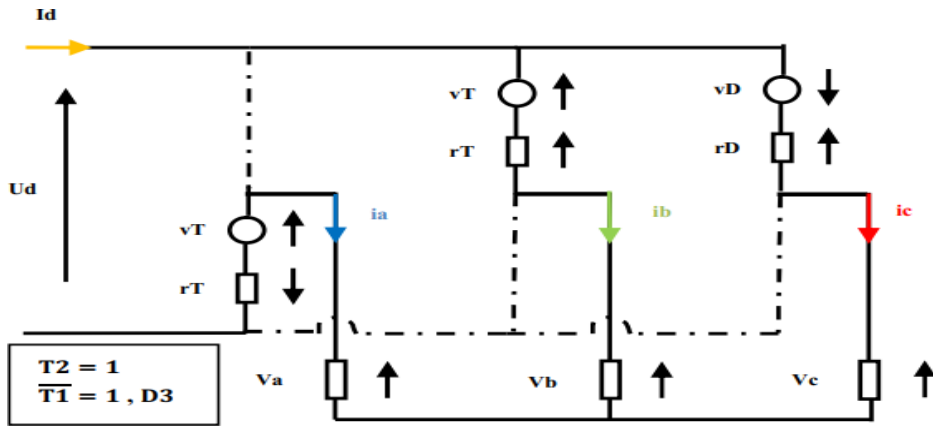


Figure II.11 : Schéma équivalent de l'ensemble moteur-commutateur

Les équations de courants sont :

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{3(L-M)} [u_d - v_T - v_D + e_a - 2e_b + e_c - 3(R + r_T)i_b + (r_D - r_T)i_c]$$

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{1}{3(L-M)} [u_d + v_D - 2e_a + e_b + e_c - (3R + r_T + 2r_D)i_c]$$

$$i_a = (-i_b - i_c)$$
(II.44)

Donc :  $S^T = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$  et  $V = \begin{bmatrix} -\frac{2}{3}u_d & \frac{1}{3}u_d & \frac{1}{3}u_d \end{bmatrix}^T$  (II.45)

II.3.4.1 Sous Intervalle 2 :  $(\frac{4\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{3\pi}{2}) (i_c = 0)$

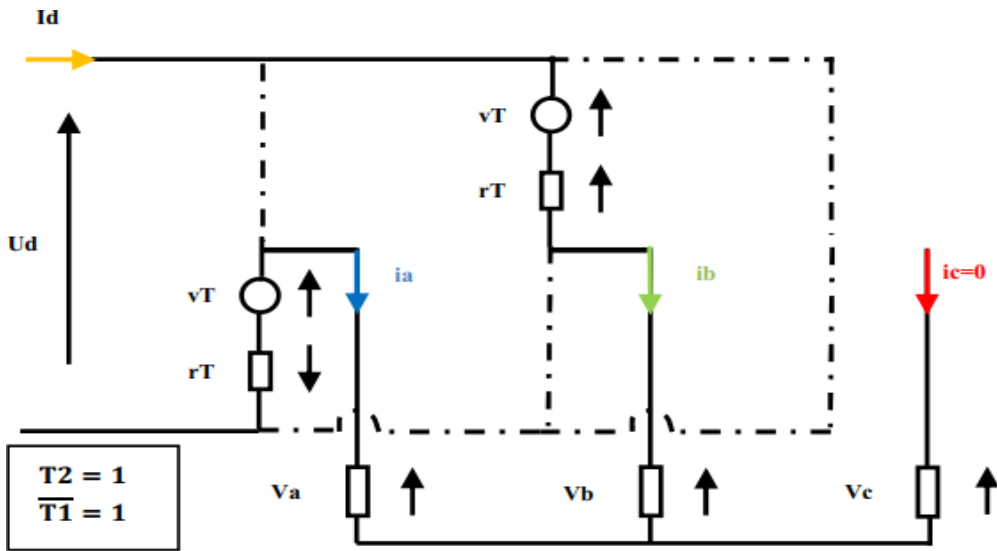


Figure II.12 : Schéma équivalent de l'ensemble moteur-commutateur.

Les équations de courants sont :

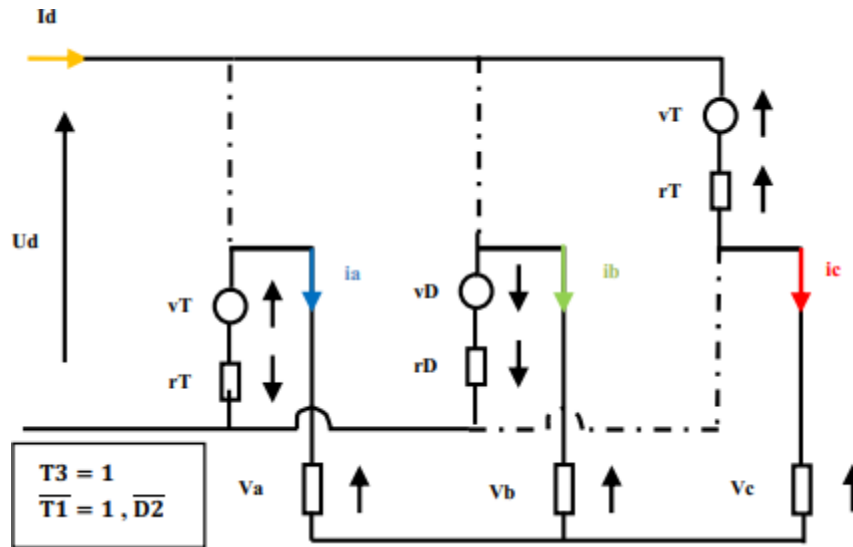
$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{2(L-M)} [u_d - v_T + e_a - e_b - 2(R + r_T)i_b]$$

$$i_a = (-i_b)$$

$$i_c = 0$$
(II.46)

**II.3.5 Intervalle 5 :**  $(\frac{3\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{11\pi}{6})$

**II.3.5.1 Sous Intervalle 1 :**  $(\frac{3\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{5\pi}{3})$  (les composants qui fonctionnent sont  $(T3, \overline{D2})$ )



**Figure II.13 :** Schéma équivalent de l'ensemble moteur-commutateur

Les équations de courants sont :

$$\begin{aligned} \frac{di_b}{dt} &= \frac{1}{3(L-M)} [-u_d - \mathcal{Z}_D + e_a - \mathcal{Z}_b + e_c - (3R + r_T + \mathcal{Z}_D) i_b] \\ \frac{di_c}{dt} &= \frac{1}{3(L-M)} [2u_d - \mathcal{Z}_T + v_D + e_a + e_b - \mathcal{Z}_c - 3(R + r_T) i_c + (\mathcal{Z}_D - r_T) i_b] \quad \text{(II.47)} \\ i_a &= (-i_b - i_c) \end{aligned}$$

Donc :

$$S^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ et } V = \begin{bmatrix} -\frac{1}{3} u_d & -\frac{1}{3} u_d & \frac{2}{3} u_d \end{bmatrix}^T \quad \text{(II.48)}$$

**II.3.5.2 Sous Intervalle 2 :**  $(\frac{5\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{11\pi}{6})$  ( $i_b = 0$ )

Les équations de courants sont :

$$\begin{aligned} \frac{di_c}{dt} &= \frac{1}{2(L-M)} [u_d - \mathcal{Z}_T + e_b - e_c - 2(R + r_T) i_c] \\ i_q &= (-i_c) \\ i_b &= 0 \end{aligned} \quad \text{(II.49)}$$

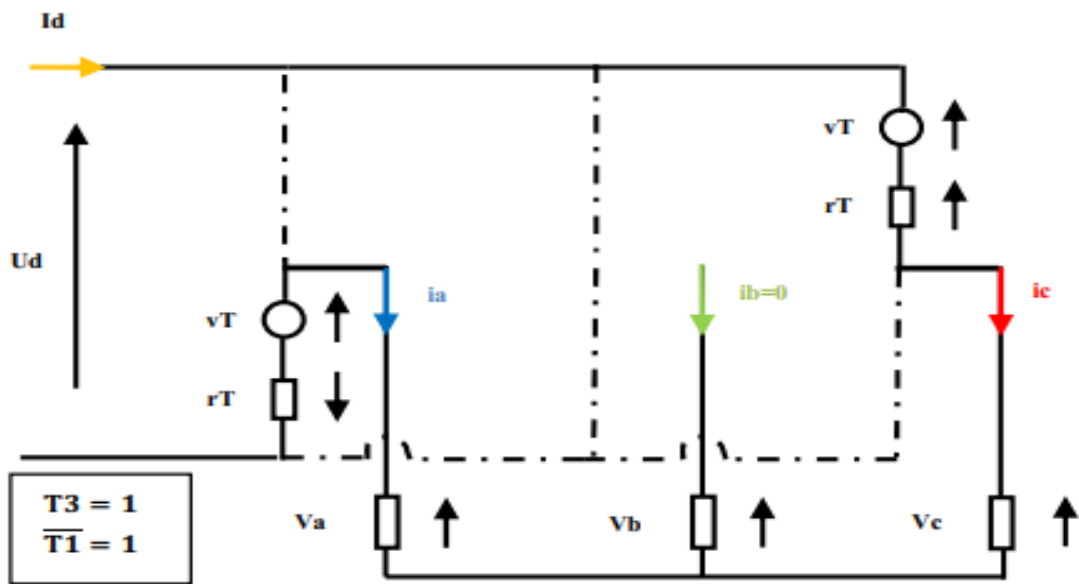


Figure II.14 : Schéma équivalent de l'ensemble moteur-commutateur

II.3.6 Intervalle 6 :  $(\frac{11\pi}{6} \leq \theta \leq 2\pi) + (0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{6})$

II.3.6.1 Sous Intervalle 1 ::  $(\frac{11\pi}{6} \leq \theta \leq 2\pi)$  (les composants qui fonctionnent sont  $(T3, \overline{T2}D1)$ )

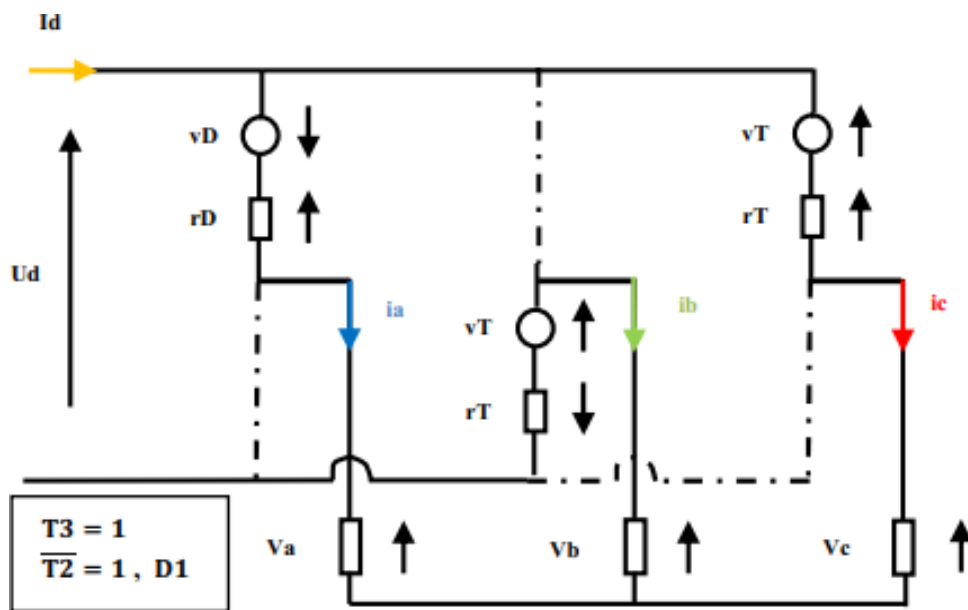


Figure II.15 : Schéma équivalent de l'ensemble moteur-commutateur.

Les équations de courants sont :

$$\begin{aligned} \frac{di_a}{dt} &= \frac{1}{3(L-M)} [u_d - 2v_T + e_b + e_c - (3R + r_T + 2M) i_a] \\ \frac{di_c}{dt} &= \frac{1}{3(L-M)} [u_d - 2v_T - v_D + e_a + e_b - 2e_c - 3(R + r_T) i_c + (L_D - r_T) i_a] \quad (\text{II.50}) \\ i_b &= (-i_a - i_c) \end{aligned}$$

Donc :

$$S^T = [1 \quad 0 \quad 1] \text{ et } V = \left[ \frac{1}{3} u_d \quad -\frac{2}{3} u_d \quad -\frac{1}{3} u_d \right]^T \quad (\text{II.51})$$

### II.3.6.2 Intervalle 2 : : $(0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{6}) (i_a = 0)$

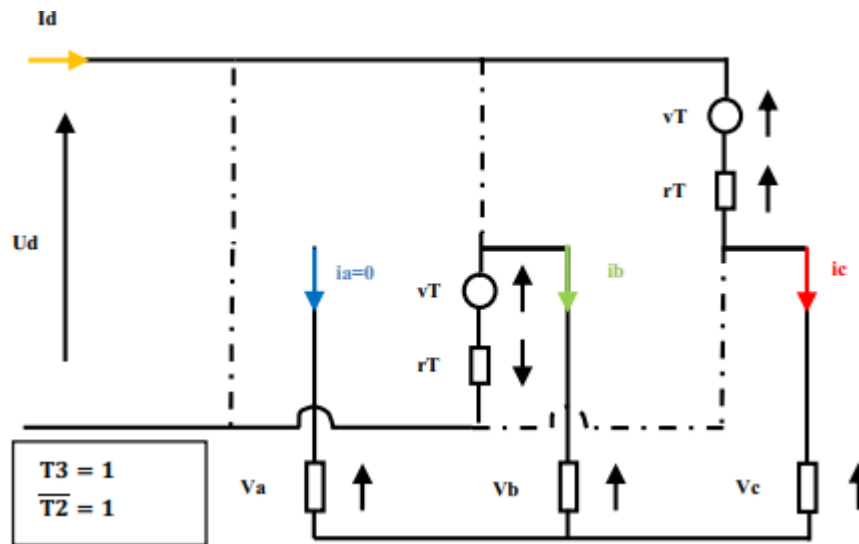


Figure II.16 : Schéma équivalent de l'ensemble moteur-commutateur.

Les équations de courants sont :

$$\begin{cases} \frac{di_c}{dt} = \frac{1}{2(L-M)} [u_d - 2v_T + e_b - e_c - 2(R + r_T) i_c] \\ i_b = (-i_c) \\ i_a = 0 \end{cases} \quad (\text{II.52})$$

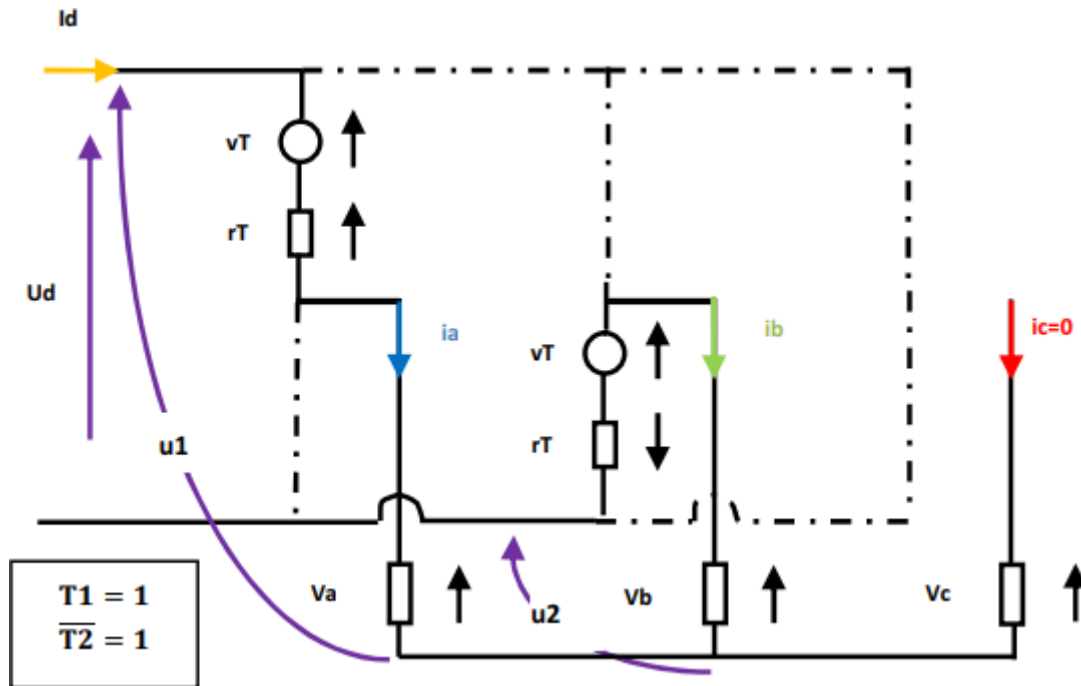
## II.4 Modèle Continu du moteur BLDC.

### II.4.1 Modèle Continu du moteur BLDC lorsque deux Phases sont Alimentées (Mode DC1)

Dans ce mode DC1, on a seulement deux phases alimentées comme indiqué la Figure II.17 [26]. De ce fait, le mode DC1 correspond à la mise en série de deux phases aux bornes de la tension continue  $u_d$  aussi, elles sont parcourues par le courant Continu  $i_d$ . Ce mode représente alors les intervalles  $IT_j$ . Pour établir la dynamique du Courant  $i_d$  nous considérons

l'intervalle  $IT_1$  dans le sens direct. Dans ce cas, la tension appliquer aux bornes des phases alimentées (a et b) et le courant  $i_d$  qui les traverse Sont liés par :

$$u_d = u_1 - u_2 \quad (\text{II. 53})$$



**Figure II.17:** Structure d'un commutateur-moteur BLDC lorsque deux phases sont alimentées

Où  $u_1$  est la tension du point neutre à la borne positive du bus continu et  $u_2$  est la tension du point neutre à la borne négative du bus continu comme représenté dans la figure II.17. On suppose que les résistances dynamiques des composantes de l'onduleur sont identiques

$$r_T = r_D = r \quad (\text{II. 54})$$

$r_T$  est la résistance dynamique du transistor.

$r_D$  est la résistance dynamique de la diode.

Alors :

$$U_1 = v_a + v_T + r i_a \quad (\text{II.55})$$

$$U_2 = v_b + v_T + r i_b \quad (\text{II.56})$$

En remplaçant  $v_a$  et  $v_b$  par les expressions suivantes :

$$v_a = Ri_a + L_c(di_a/dt) + e_a \quad (\text{II.57})$$

$$v_b = Ri_b + (di_b/dt) + e_b \quad (\text{II.58})$$

Où R et  $L_c$  sont respectivement l'inductance et la résistance de phase.

Pour les deux phases mises en série, les FEM présentent leur partie plate en opposition, donc :

$$e_a = -e_b = E \quad (\text{II.59})$$

Où E est la valeur crête de la FEM induite dans chaque phase dont l'expression est proportionnelle à la vitesse :

$$E = k_e|\omega_r| \quad (\text{II.60})$$

Avec  $k_e$  le coefficient de la FEM et  $\omega_r$  la vitesse de rotation du moteur. Il faut noter que la FEM continue E est toujours positif.

Alors :

$$u_1 = Ri_a + (di_a/dt) + E + v_T + ri_a \quad (\text{II.61})$$

$$u_2 = Ri_b + (di_b/dt) - E - v_T + ri_b \quad (\text{II.62})$$

Dans ce mode DC1 le courant  $i_d$  circule dans les deux phases alors  $i_a = i_d$

Et  $i_b = -i_d$ , donc les équations **II.61** et **II.62** deviennent :

$$u_1 = Ri_a + (di_a/dt) + E + v_T + ri_a \quad (\text{II.63})$$

$$u_2 = -Ri_d - L_c \left( \frac{di_d}{dt} \right) - E - v_T - ri_d \quad (\text{II.64})$$

$i_d$  est le courant à l'entrée du commutateur qui passe à travers les deux phases a et b mise en série.

Par conséquent  $u_d$  est donnée par :

$$u_d = 2(R + r) i_d + 2L_c \left( \frac{di_d}{dt} \right) + 2E + 2v_T \quad (\text{II.65})$$

$u_d$  est la tension à l'entrée du commutateur laquelle est appliquée aux bornes des phases a et b mise en série.

Donc, dans ce mode DC1 la dynamique du courant  $i_d$  est exprimée par :

$$2(di_d/dt) = u_d - 2(R + r)i_d - 2E - 2v_T \quad (\text{II.66})$$

Pour simplifier l'expression II.65 on pose :

$$R' = 2(R + r) \quad (\text{II. 67})$$

$$L' = 2L_c \quad (\text{II. 68})$$

$$\vec{E}' = 2E \quad (\text{II. 69})$$

Alors le modèle devient :

$$u_d = \dot{E}' + R'i_d + L'(di_d/dt) - 2v_T \quad (\text{II. 70})$$

Avec:

$$E' = 2E = 2k_e\omega_r = k_v\omega_r \quad (\text{II. 71})$$

Et :

$$k_v = 2k_e \quad (\text{II. 72})$$

L'équation II.70 est identique à celle d'une machine à courant continu classique. Alors l'expression du couple est :

$$C_e = \frac{(e_a - e_b) \cdot \dot{i}}{\omega_r} \quad (\text{II. 73})$$

$$C_e = \frac{2Ei_d}{\omega_r} = \frac{2k_e\omega_r i_d}{\omega_r} = 2k_e i_d \quad (\text{II. 74})$$

$$C_e = k_v i_d \quad (\text{II. 75})$$

#### II.4.1.1 Fonction de Transfert en Boucle Ouverte

Le commutateur reçoit en son entrée la tension continue  $u_d$  cela signifie que cette tension est aux bornes des deux enroulements en série, c'est exactement le modèle du moteur DC classique indiqué par la figure II.18 :

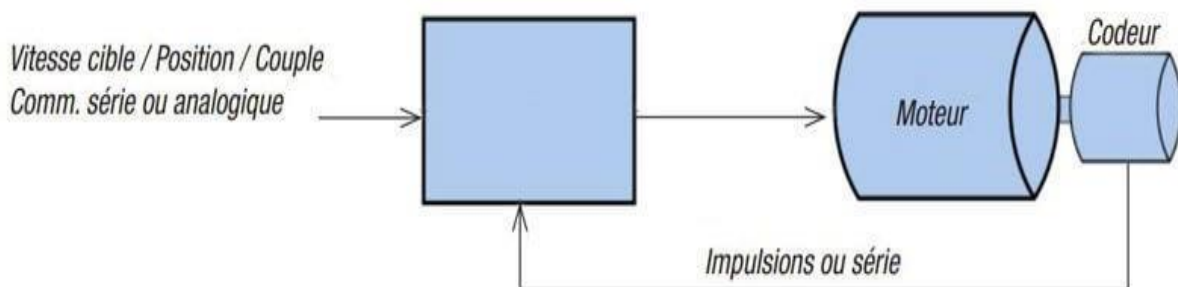


Figure II.18 : Schéma fonctionnel d'un moteur BLDC

#### II.4.1.2 Constantes de temps Mécaniques et Electriques

Partant du schéma fonctionnel de la figure II.18, précédente, la fonction de transfert entre la tension d'alimentation et la vitesse de rotation est la suivante [28] [27] :

$$\omega_r(s) = \frac{k_v}{(\dot{R} + s\dot{L})(f + sJ) + k_v k_v} u_d(s) - \frac{(\dot{R} + s\dot{L})}{(\dot{R} + s\dot{L})(f + sJ) + k_v k_v} c_r(s) + \frac{2k_v}{(\dot{R} + s\dot{L})(f + sJ) + k_v k_v} v_T(s) \quad (\text{II. 76})$$

Si on ne tient pas compte de la perturbation externe présenté par le couple résistant et la tension de transistor  $T1$  :

$$F_{bo}(s) = \frac{\omega_r(s)}{u_d(s)} = \frac{k_v}{(\dot{R} + s\dot{L})(f + sJ) + k_v k_v} \quad (\text{II. 77})$$

Ou encore :

$$F_{bo}(s) = \frac{k_v}{f \cdot R + k_v^2} \frac{1}{\frac{J \cdot L}{f \cdot R + k_v^2} s^2 + \left( \frac{J \cdot \dot{R} + f \cdot \dot{L}}{f \cdot R + k_v^2} \right) s + 1} \quad (\text{II. 78})$$

En négligeant le frottement visqueux  $f = 0$ , cette fonction de transfert devient :

$$F_{bo}(s) = \frac{1}{k_v} \frac{\dot{L}}{k_v^2 s^2 + \left( \frac{\dot{L} \cdot \dot{R}}{k_v^2} \right) s + 1} \quad (\text{II. 79})$$

En définissant respectivement les constantes de temps mécanique  $T_m$  et électrique  $T_e$  comme suit :

$$T_m = \frac{\dot{R} \cdot J}{k_v^2} \quad (\text{II. 80})$$

$$T_e = \frac{\dot{L}}{\dot{R}} \quad (\text{II. 81})$$

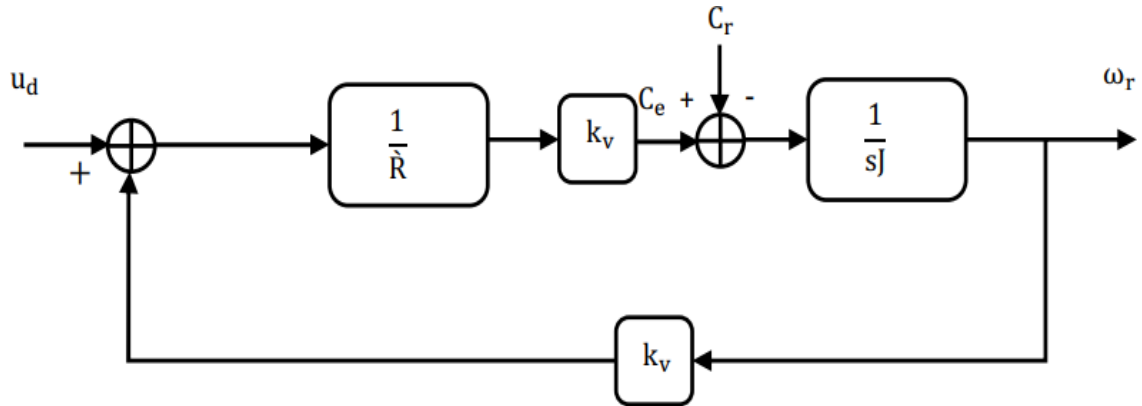
La fonction de transfert prend la forme :

$$F_{bo}(s) = \frac{1}{k_v} \frac{1}{T_m T_e s^2 + T_m s + 1} \approx \frac{1}{k_v} \frac{1}{(1 + T_e s)(1 + T_m s)} \quad (\text{II. 82})$$

$T_e$  Le temps électrique, elle est souvent négligeable devant la constante de temps mécanique  $T_m$ . Dans le cas où  $T_e \ll T_m$ , soit pour  $L$  négligeable, on a :

$$F_{bo}(s) \approx \frac{1}{k_v} \frac{1}{(1 + T_m s)} \quad (\text{II. 83})$$

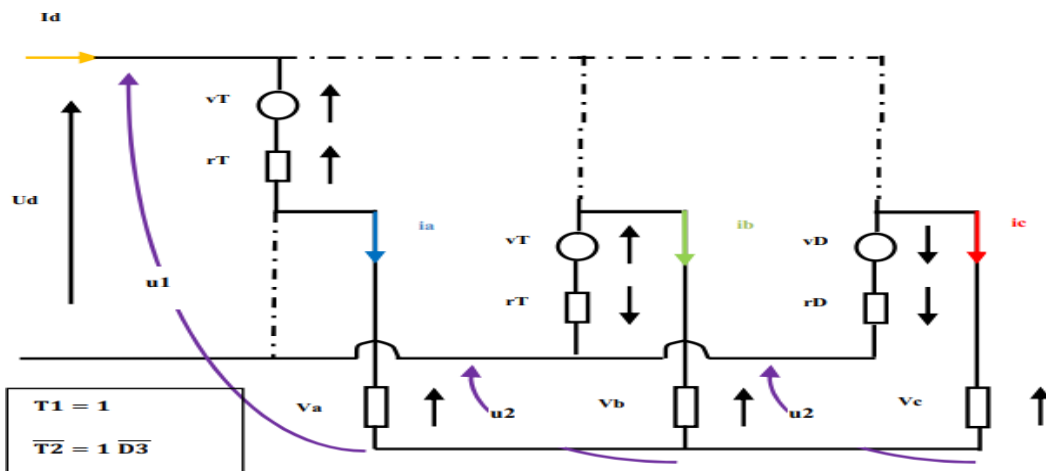
Et le schéma fonctionnel de la figure II.18 se réduit à celui de la figure II.19



**Figure II.19** : Schéma fonctionnel d'un moteur BLDC, lorsque l'inductance est faible, ou que la constante de temps électrique  $T_e$  est beaucoup plus petite que la constante de temps mécanique  $T_m$  ( $T_e \ll T_m$ ), [27]

**II.4.2 Modèle Continu du moteur BLDC lorsque trois Phases sont Alimentées (Mode DC2).**

Dans ce mode de fonctionnement, une phase est mise en série avec les deux autres phases en parallèle comme indiqué à la figure II.20. Le mode DC2 correspond aux sous intervalles  $ID_j$ . Nous considérons le sous intervalle  $ID_1$  dans le sens direct de rotation.



**Figure II.20** : Structure d'un commutateur-moteur BLDC lorsque deux phases sont alimentées

Dans ce cas les tensions  $u_1$  et  $u_2$  sont données par :

$$u_1 = (R + r) + \left( \frac{L_c di_a}{dt} \right) + e_a + v_T \quad \text{(II. 84)}$$

La mise en parallèle de la phase  $b$  et  $c$  conduit à :

$$u_2 = (R + r) + L_c \left( \frac{di_b}{dt} \right) + e_b - v_T \quad \text{(II. 85)}$$

$$u_2 = (R + r) + L_c \left( \frac{di_c}{dt} \right) + e_c + v_D \quad \text{(II. 86)}$$

En ajoutant membre à membre les deux demi-ères relations il vient :

$$2u_2 = (R + r)(i_b + i_c) + L_c \left( \frac{di_b}{dt} + \frac{di_c}{dt} \right) + \xi_c + e_c + \psi_D - v_T \quad (\text{II. 87})$$

Comme  $-(i_b + i_c) = i_a = i_d$ , on a :

$$u_1 = (R + r) i_d + L_c \left( \frac{di_d}{dt} \right) + e_a + v_T \quad (\text{II. 88})$$

$$2u_2 = -(R + r) i_d - L_c \left( \frac{di_d}{dt} \right) + \xi_c + e_c + \psi_D - v_T \quad (\text{II. 89})$$

Par conséquent la tension  $u_d$  vérifie la relation :

$$u_{dd} = u_1 - u_2 \quad (\text{II. 90})$$

$$2u_d = 3(R + r) i_d + 3L_c \left( \frac{di_d}{dt} \right) + 2e_a - \xi_b + \psi_T - v_D \quad (\text{II. 91})$$

De plus durant cet intervalle, on a sensiblement :

$$e_b = -e_a = -E \quad (\text{II. 92})$$

Et  $e_c = e_a = E \quad (\text{II. 93})$

Finalement la dynamique du courant  $i_d$  dans le mode DC2 vérifie :

$$3(di_d/dt) = 2u_d - 3(R + r)i_d - 2E - 3v_T + v_D \quad (\text{II. 94})$$

#### II.4.2.1 Le Schéma Fonctionnel du Moteur BLDC pour le Mode DC2.

A partir l'équation II.94 on a :

$$u_d = \frac{3}{2}(R + r) i_d + \frac{3}{2}L_c \frac{di_d}{dt} + E + \frac{3}{2}v_T - \frac{1}{2}v_D \quad (\text{II. 95})$$

Pour simplifier l'équation II.95 on pose :

$$R = \frac{3}{2}(R + r) \quad (\text{II. 96})$$

$$L = \frac{3}{2}L_c \quad (\text{II. 97})$$

$$\dot{E} = E \quad (\text{II. 98})$$

$$V = \frac{3}{2}v_T - \frac{1}{2}v_D \quad (\text{II. 99})$$

Alors :

$$u_d = \hat{R} + L \frac{di_d}{dt} + \hat{E} + V \quad (\text{II. 100})$$

Avec :

$$E = \hat{E} = k_e \omega_r \quad (\text{II. 101})$$

En posant aussi :

$$k_v^2 = k_e \quad (\text{II. 102})$$

Donc :

$$C_e = k_e i_d = \hat{k}_v i_d \quad (\text{II. 103})$$

Après les simplifications, le schéma fonctionnel d'un moteur BLDC, ayant 3 phases alimentées est donné par la figure II.21

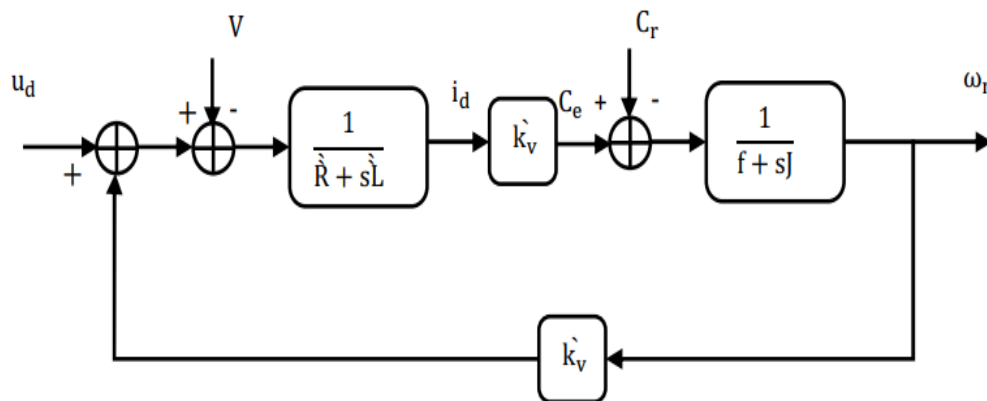


Figure II.21 : Schéma fonctionnel d'un moteur BLDC dans le mode DC2.

En effectuant les mêmes étapes de calcul que dans la mode DC1, la fonction transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$F_{bo}(s) = \frac{1}{\hat{k}_v} \frac{\hat{L} \cdot \hat{L}}{k_v^2 s^2 + (\hat{k}_v^2) s + 1} \quad (\text{II. 104})$$

Les constantes de temps mécanique  $T_m$  et électrique  $T_e$  sont définis par :

$$T_m = \frac{J \cdot \hat{R}}{(\hat{k}_v^2)} \quad (\text{II. 105})$$

Et 
$$\hat{T} = \frac{L}{R} \quad (\text{II. 106})$$

## II.6 Conclusion.

Dans ce chapitre, nous avons présenté un modèle continu d'un moteur à courant continu sans balais (BLDCM) pour les modes DC1 et DC2. CC ID vérifié, à partir de la forme de courant continu et à peu près de la forme de troisième phase, il montre peu de différence dans le temps de commutation. Ces résultats démontrent que ce modèle peut être valable pour représenter le courant continu lors de l'introduction d'un interrupteur électronique à commutation automatique. A l'aide de ce modèle, nous allons procéder à la réalisation de notre modèle d'étude Ce qui sera le sujet du troisième chapitre.

# **CHAPITRE III**

## **Régulateur PID d'un moteur BLDC**

## Chapitre III

### Régulateur PID d'un moteur BLDC

#### III.1 Introduction

La commande PID est dite aussi (correcteur, régulateur, contrôleur), se compose de trois termes P, I et D, d'où le 'P' correspond au terme proportionnel, 'I' pour terme intégral et 'D' pour le terme dérivé de la commande. Les régulateurs PID 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 PID.

Le régulateur PID 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, et il peut anticiper le futur grâce à une action dérivée.

Ce chapitre a pour but, d'implémenter la commande PID classique pour un moteur BLDC, pour un seul objectif est d'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. Le réglage des coefficients (paramètres) de la commande PID est basé sur la méthode empirique de «Ziegler & Nichols»

#### III.2 Principe général d'un correcteur PID

L'erreur observée est la différence entre la consigne et la mesure. Le PID permet trois 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, puis multipliée par un gain  $K_i$
- ✓ Une action Dérivée : l'erreur est dérivée suivant un temps  $s$ , puis multipliée par un gain  $K_d$

La version classique de l'algorithme peut s'écrire sous la forme II.1 :

$$u_{PID}(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^T e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{III.1})$$

Où  $u$  est la variable de commande,  $e$  représente l'erreur définie par :

$$e(t) = y_d - y \quad (\text{III.2})$$

$y_d$  Et  $y$  sont respectivement la valeur désirée de la sortie et la valeur réelle.

Il existe plusieurs architectures possibles pour combiner les trois effets (série, parallèle ou mixte), on présente ici une architecture parallèle :

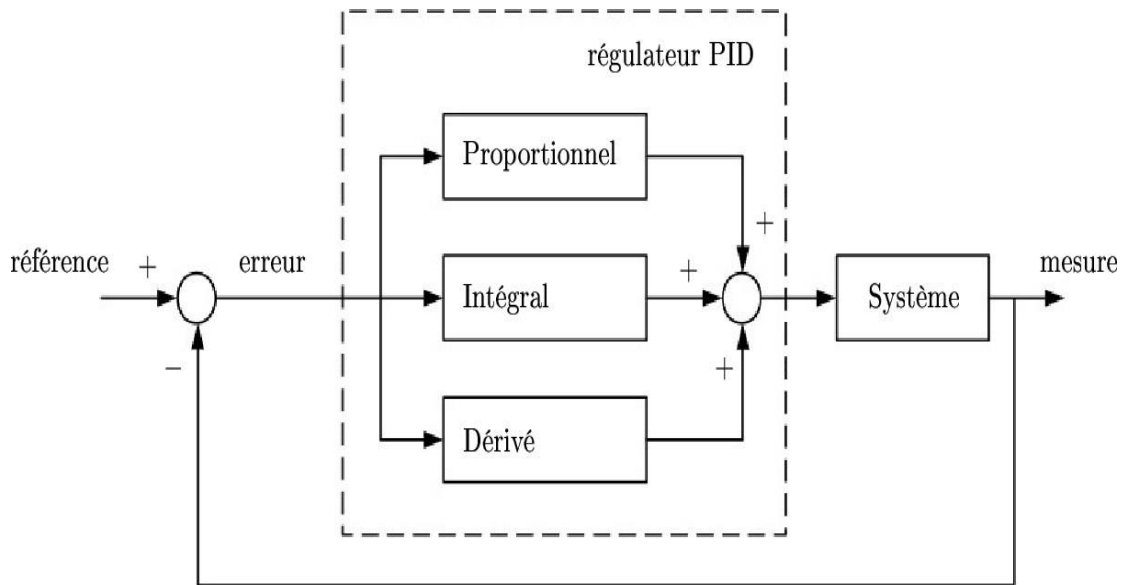
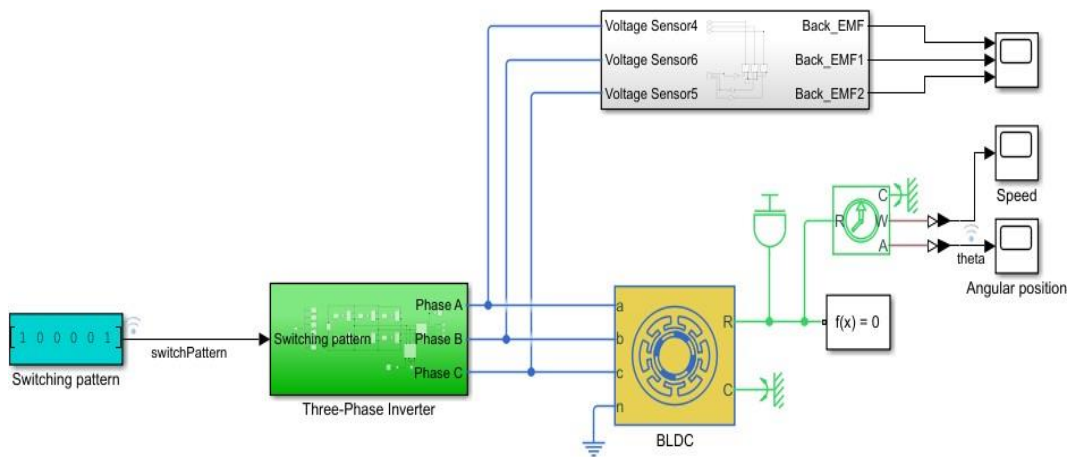


Figure III.1 Schéma fonctionnel de la commande PID

### III.3 Partie de la simulation d'un Matlab

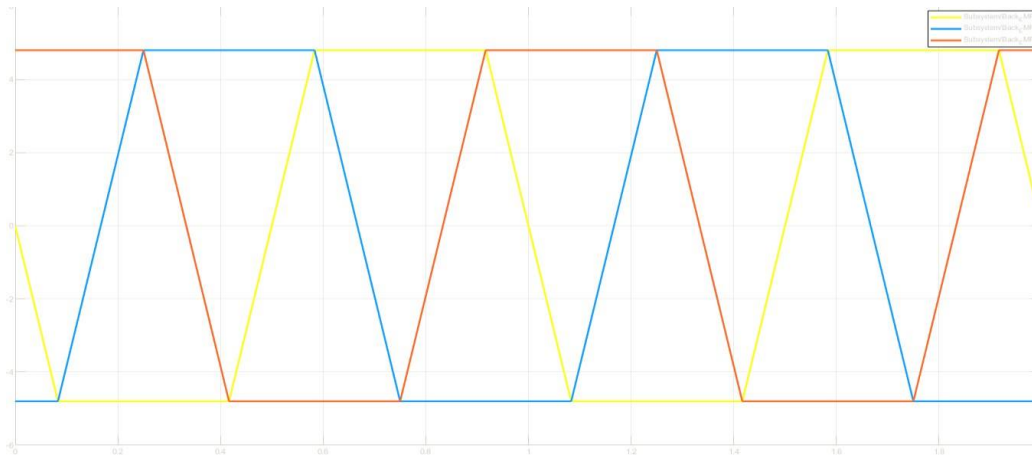
La figure III.2 présente Le schéma bloc en boucle ouvert dans Simulink



RABEH MOHOUN SIMULINK MODEL

Figure III.2 Schéma bloc en boucle ouvert dans Simulink Matlab

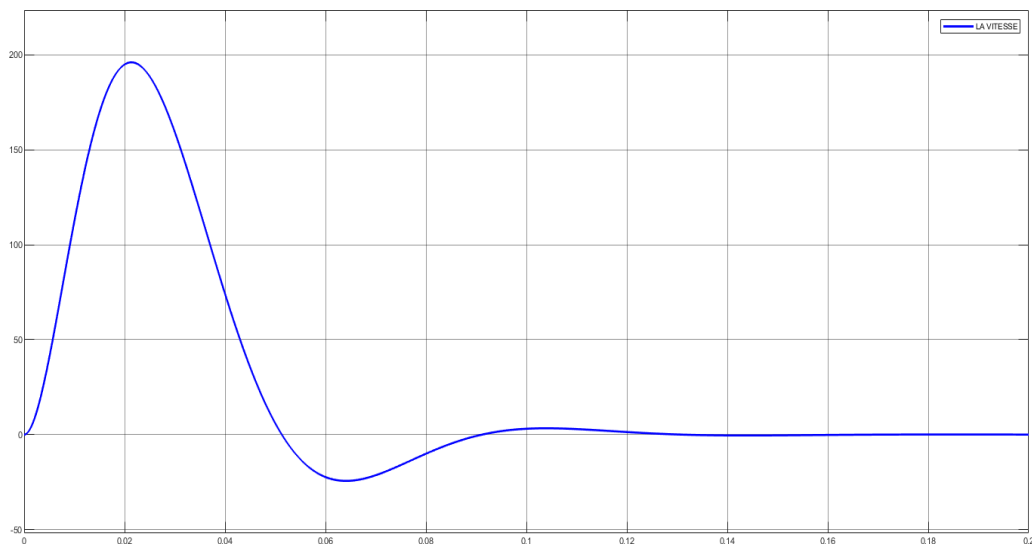
La figure III.3 Les formes d'ondes des courants et des f.é.m. en , boucle ouvert dans Simulink Matlab



**Figure III.3** Les formes d’ondes des courants et des f.é.m

La Figure III.3 commutation trapézoïdale peut également être effectuée sur la base de la force contre-électromotrice du moteur, ce qui permet d’éliminer les capteurs Hall. Dans un moteur BLDC triphasé typique à courant trapézoïdal, un enroulement est positif, un enroulement est négatif et un est ouvert. L’enroulement ouvert peut être utilisé pour détecter le point de passage par zéro de la force contre-électromotrice, qui correspond à ce qui serait un changement de signal dans un capteur Hall. Cependant, la force contre-électromotrice est proportionnelle à la vitesse du moteur. Cela signifie qu’à des vitesses très lentes (et en particulier au démarrage), la force contre-électromotrice sera très faible, de sorte que le moteur doit être démarré en mode boucle ouverte jusqu’à ce qu’une vitesse et une force contre-électromotrice suffisantes soient générées. À ce stade, le contrôleur peut être commuté sur la détection EMF arrière pour la commutation.

La figure III.4 la simulation de la vitesse de rotation en fonction de temps boucle ouvert dans Simulink Matlab



**Figure III.4** la simulation de la vitesse de rotation en fonction de temps boucle ouvert

Le résultat de la vitesse one boucle ouverte montrés dans la Figure III.4 ci-dessus ne pas stable

### III.4 Application du régulateur PID sur la system BLDC

#### III.4.1 Système de contrôle de vitesse

Un circuit de contrôleur est essentiel pour faire fonctionner et contrôler la vitesse d'un moteur BLDC. Il existe de nombreux types de systèmes de contrôle de vitesse développés pour les contrôleurs, mais les contrôleurs de vitesse doivent se moderniser avec les âges. Cependant, ils sont généralement classés respectivement en systèmes de contrôle en boucle fermée et en boucle ouverte. Des techniques en boucle fermée sont utilisées pour un système de contrôle de haute précision. La figure III.5 montre un schéma fonctionnel du contrôleur de vitesse du moteur BLDC utilisant deux systèmes en boucle fermée. Dans ce cas, la boucle interne est utilisée pour régler et détecter la polarité de l'alimentation et la boucle externe est utilisée pour contrôler la vitesse. Le variateur de vitesse du moteur permet d'ajuster la tension du bus DC. Pour contrôler le système, une alimentation CC est nécessaire et sa valeur dépend de la vitesse du moteur (tr/min) et de sa capacité. Ce système nécessite également un contrôleur, auquel cas un contrôleur PID est utilisé qui contrôle finalement la tension de sortie de l'onduleur. Un capteur est une partie intégrante d'un contrôleur en boucle fermée pour contrôler la vitesse d'un moteur. La fonction principale du capteur est de convertir la position physique et l'état de l'arbre du moteur en un signal électrique équivalent pour le circuit du contrôleur. En règle générale, le moteur BLDC nécessite une forme d'onde de tension de type CA pour son fonctionnement, de sorte que le circuit onduleur est utilisé pour convertir la tension d'alimentation CC en une tension d'alimentation CA équivalente [29], [30] pour un fonctionnement correct.

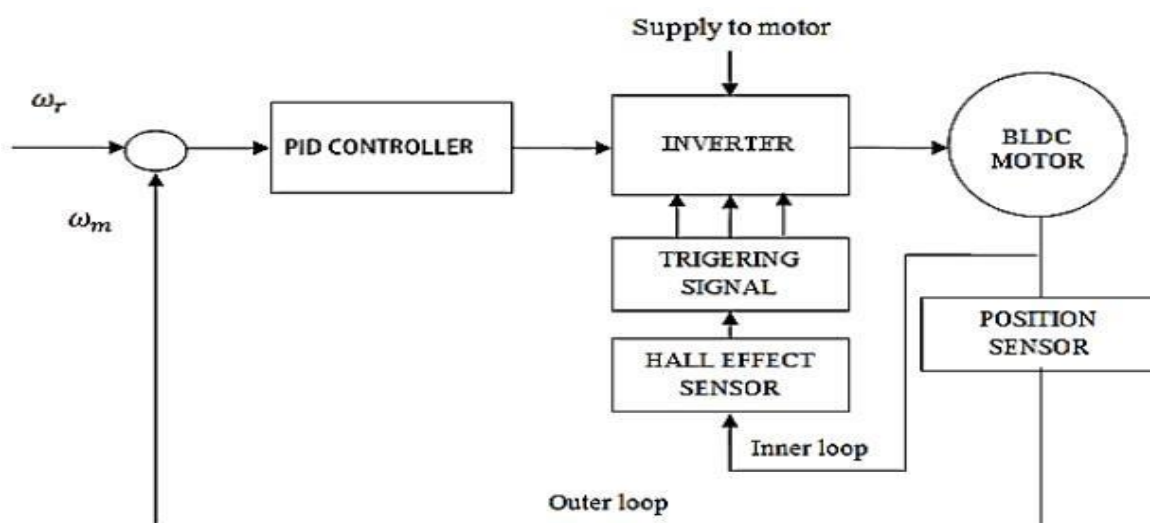
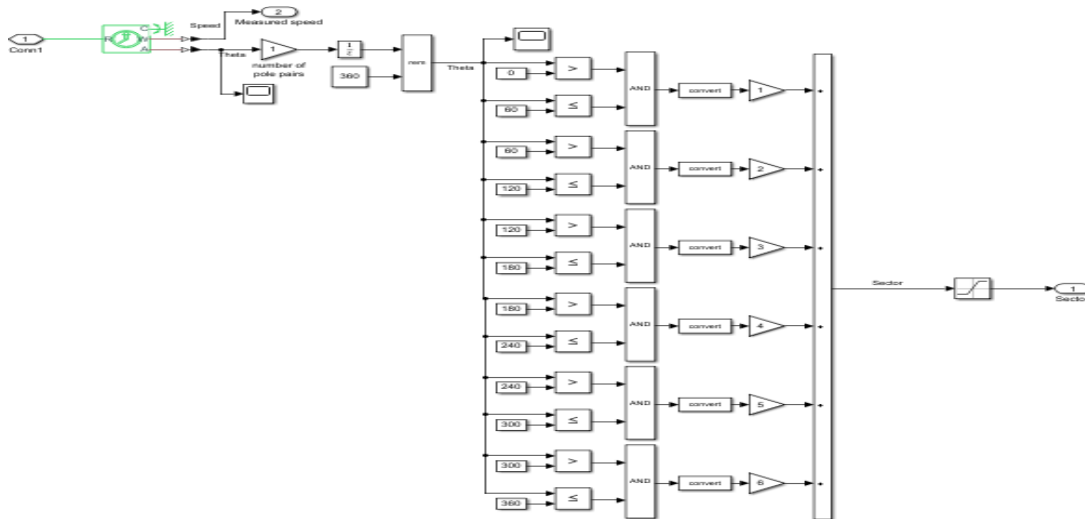


Figure III.5 Schéma fonctionnel du contrôle de vitesse du moteur BLDC.

**III.4.2 Le Back Electro Motive Force (BEMF)**

En règle générale, un moteur BLDC triphasé utilise six commutateurs électroniques (transistors de puissance) pour produire simultanément une tension triphasée vers un convertisseur de puissance à configuration en pont complet. Les transistors ont une position de rotor, qui sera définie comme la séquence de commutation. La plupart des cas, le démarreur de moteur surveille à l'aide de trois dispositifs de capteur à effet Hall. Les capteurs à effet Hall fournissent les informations au bloc décodeur pour produire le signe du vecteur de signal de courant de référence à la force électromotrice arrière (BEMF). Pour faire fonctionner le moteur dans le sens opposé sens, le courant est modifié dans le sens inverse ou l'ordre de commutation du contrôleur est modifié.

Le schéma fonctionnel de simulation MATLAB pour générer le back EMF du décodeur est illustré à la figure III.6, et le tableau I montre les séquences de décodeur du contrôleur PID triphasé proposé pour que le moteur BLDC tourne dans le sens des aiguilles d'une montre.



**Figure III.6** Back EMF du décodeur pour MATLAB Drive.

Ha	Hb	Hc	emf_a	emf_b	emf_c
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	-1	+1
0	1	0	-1	+1	0
0	1	1	-1	0	+1
1	0	0	+1	0	-1
1	0	1	+1	-1	0
1	1	0	0	+1	-1
1	1	1	0	0	0

**Tableau III. 1** Tableau décodeur

De même, la figure III.7 montre le schéma fonctionnel de la commutation de l'onduleur pour la simulation MATLAB, et le tableau II montre les séquences de décodeur du contrôleur PID triphasé proposé pour que le moteur BLDC tourne dans le sens antihoraire.

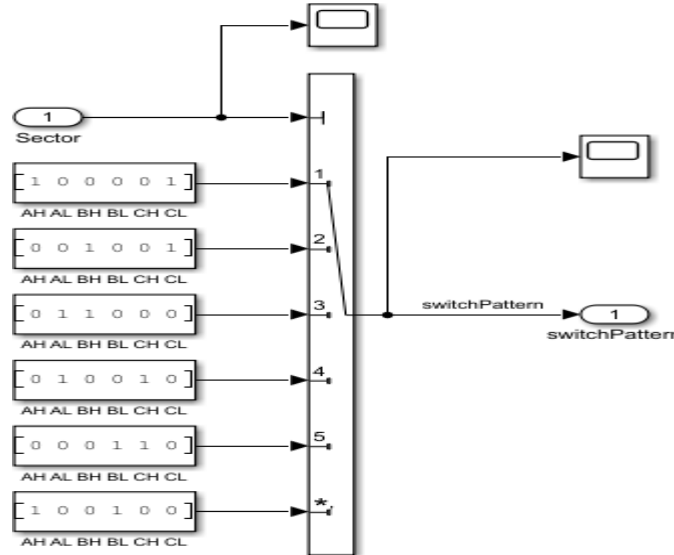


Figure III.7 Commutation d'onduleur pour MATLAB Drive

Le vrai tableau pour la commutation par inverseur

emf_a	emf_b	emf_c	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-1	+1	0	0	0	1	1	0
-1	+1	0	0	1	1	0	0	0
-1	0	+1	0	1	0	0	1	0
+1	0	-1	1	0	0	0	0	1
+1	-1	0	1	0	0	1	0	0
0	+1	-1	0	0	1	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau III. 2 la commutation par inverseur

### III.5 Modélisation Proposée Du Contrôleur PID

Pour obtenir de meilleures performances des moteurs à courant continu, il est essentiel d'utiliser un circuit contrôleur. À cette fin, une variété de circuits de contrôleur et d'algorithmes sont utilisés. Cependant, parmi eux, le contrôleur PID est le circuit de contrôleur le plus approprié pour le moteur BLDC. Le contrôleur PID est principalement composé de trois blocs de circuits et ce sont des blocs proportionnels, intégraux et dérivés. Chaque bloc de circuit est utilisé pour effectuer différentes opérations mathématiques comme

leur nom l'indique. La conception MATLAB complète du contrôleur proposé pour moteur CC sans balais triphasé est illustrée à la Figure III.8. Le circuit pilote, les capteurs, le circuit convertisseur, le circuit onduleur, la portée d'affichage et le moteur sont interconnectés.

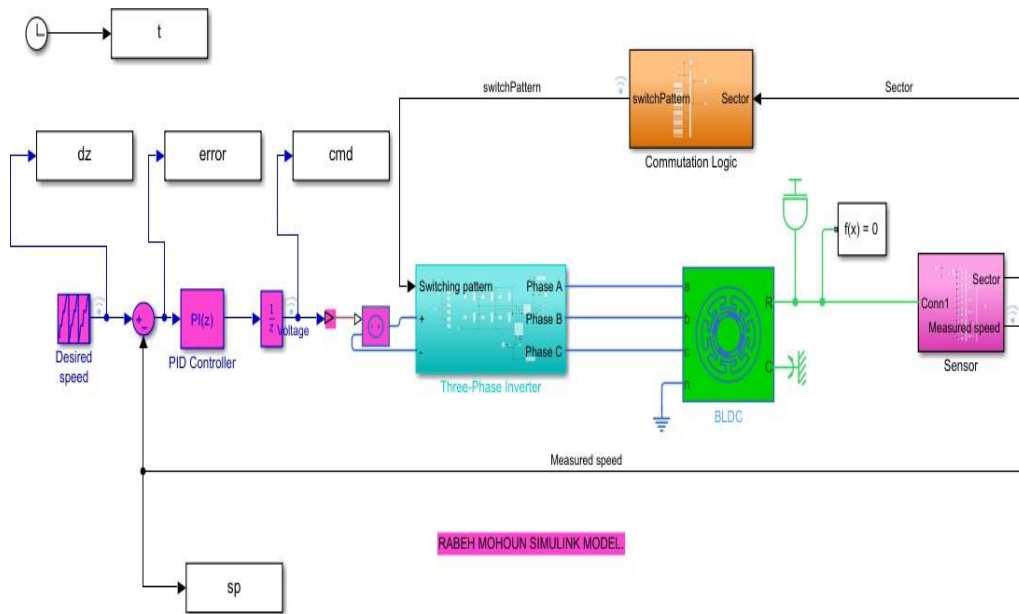


Figure III.8 Conception MATLAB complète du contrôleur pour moteur BLDC.

Ses applications sont larges en raison de sa facilité et de ses performances exceptionnelles, dans de nombreux cas, son efficacité est supérieure à 95 %. Généralement, un contrôleur PID en boucle fermée est utilisé pour les applications industrielles. Les quatre caractéristiques clés sont les plus intéressées par la réponse à l'étape en boucle fermée, ce sont le temps de stabilisation, le dépassement, l'erreur en régime permanent et le temps de réponse.

Le tableau III montre les valeurs des paramètres du régulateur PID utilisés pour cette conception.

Kp	Ki	Kd
100	0.5	500

Tableau III. 3 Valeurs des paramètres du contrôleur PID

La figure III.9 montre le courant de stator du moteur BLDC à vide. Dans cette figure, l'axe X représentait le temps en secondes (secondes) et l'axe Y le courant du stator du moteur en Ampère (A) respectivement. Sur cette figure, les courants de stator triphasés sont illustrés respectivement par les lignes de couleur verte, rose et jaune.

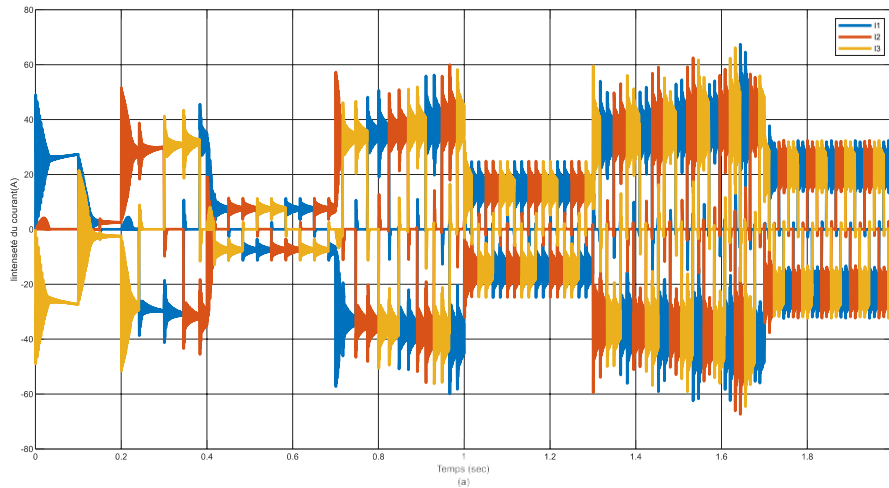


Figure III.9 Courant de stator de 3-phase du moteur BLDC

Pour faire tourner l'arbre, un circuit de commande électronique doit commuter le courant 3-phase vers les enroulements appropriés dans le bon ordre pour provoquer la rotation. La plupart utilisent un schéma d'enroulement triphasé et sont contrôlés par un onduleur triphasé. Ce circuit électronique régule la vitesse et le couple du moteur en faisant varier la fréquence et l'amplitude de la puissance triphasée entraînant le moteur.

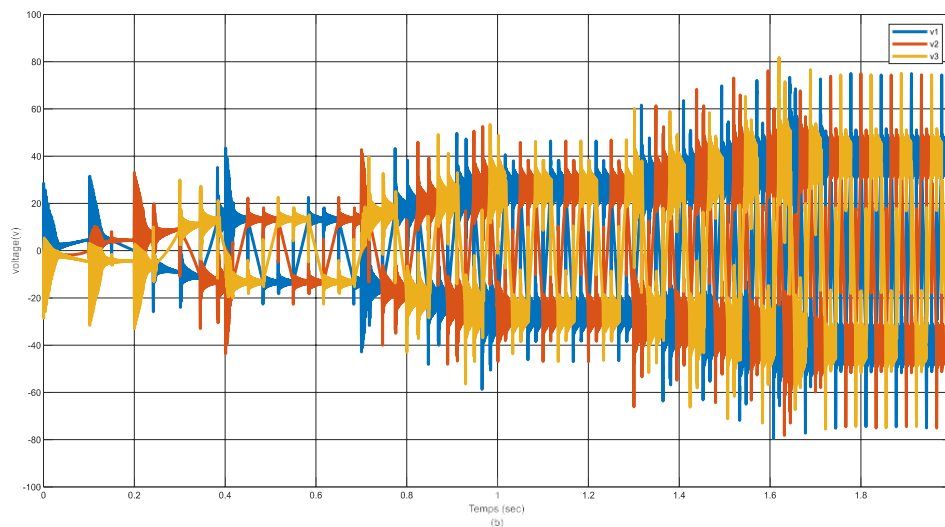
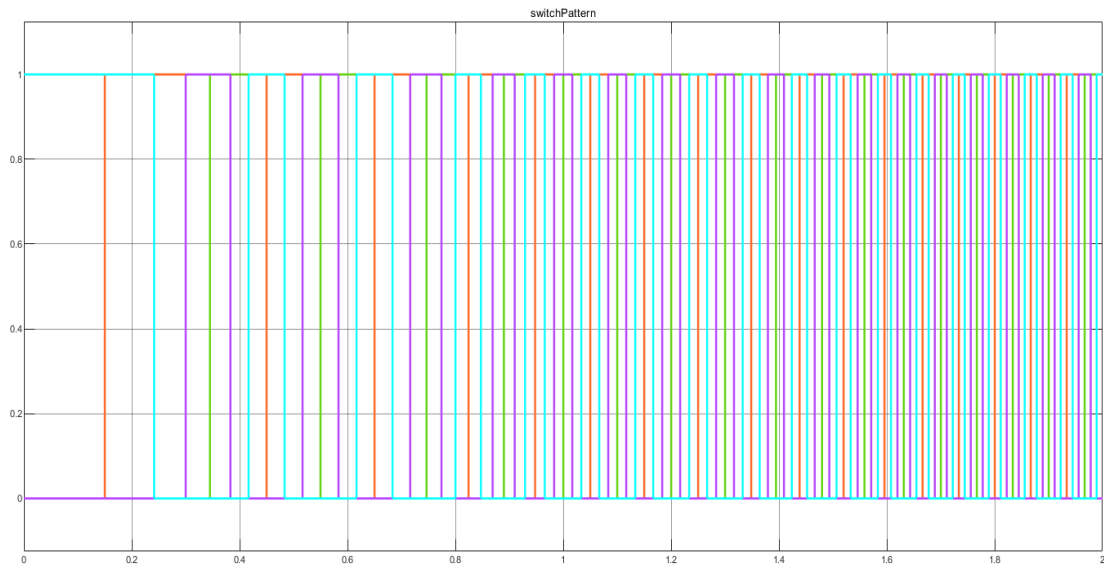


Figure III.10 Motor BLDC3-Phase Back Electromotive Force

La figure III.10 montre la force électromotrice arrière (emf) du moteur BLDC à vide. Dans cette figure, les axes X et Y représentaient le temps en seconde (sec) et la valeur emf arrière

en Volt (V) du moteur BLDC à vide, respectivement. Les tensions de retour de force électromotrice triphasées du moteur BLDC sont illustrées par les lignes de couleur verte, rose et jaune sur cette figure, respectivement. Il ressort clairement de la figure que les tensions de force électromotrice triphasée sont fixes  $\pm 24$  V après 0,2 (sec).

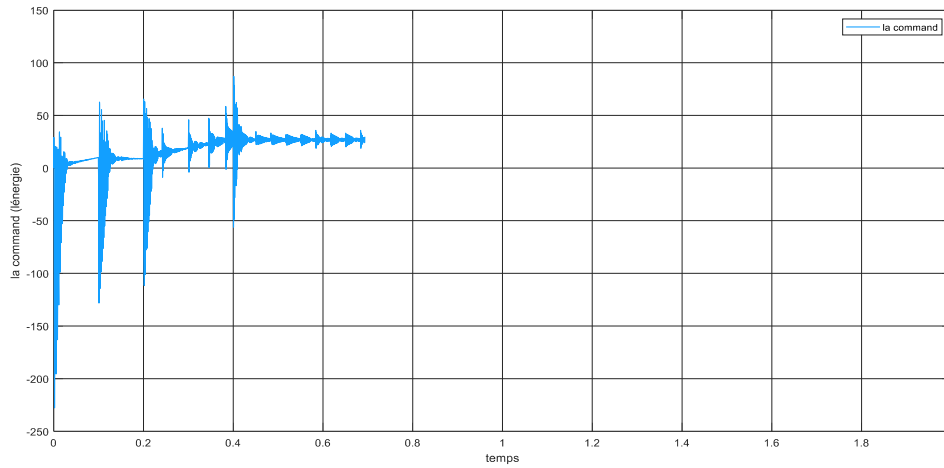
La figure III.11 montre les signaux triphasés générés par le capteur Hall. Ici, les lignes de couleur verte, rose et jaune sont représentées par le signal de phase individuel généré par le capteur.



**Figure III.11** Signal à effet Hall du moteur BLDC

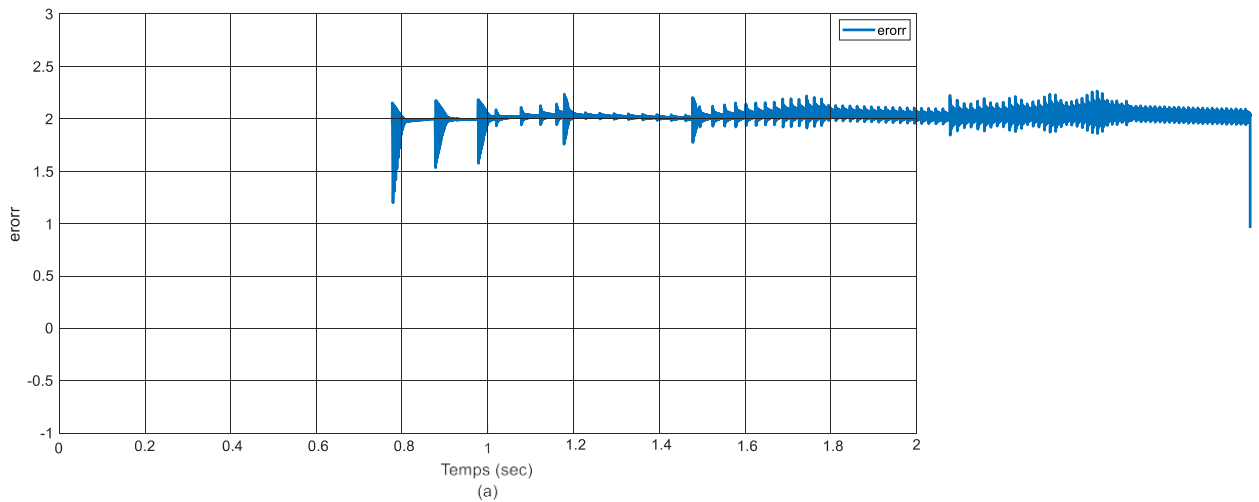
Les Signaux Figure III.11 des ravisseurs sont déterminés immédiatement après le passage d'un état haut à un état bas ou inversion. Dans le cycle de détection, chaque capteur affiche une transition haute et une transition basse, résultant en six transitions au total et six combinaisons binaires

La figure III.12 montre les performances de sortie du contrôleur PID. L'axe X et l'axe Y représentent respectivement la seconde (secondes) et la valeur du signal de référence en tr/min du contrôleur PID. D'après le diagramme, on voit que la sortie du contrôleur PID est sous-titrée et atteint la valeur minimale d'environ 0,2 s, puis elle atteint un état stable après environ 0,2s.



**Figure III.12** La sortie du contrôleur PID en fonction de temps  
 LA variation du la sortie de command PID, Cela signifie qu'il y a existé un commande.

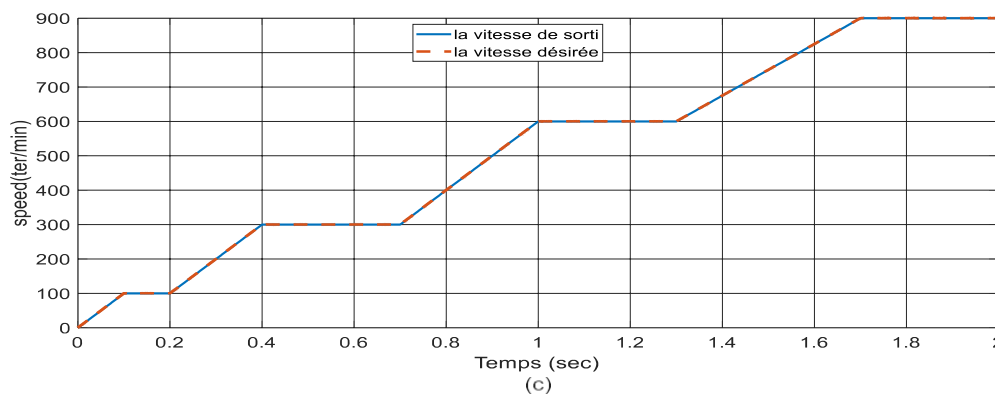
La figure 13 La figure correspondante montre l'erreur de vitesse entre l'entrée et la sortie :



**Figure III.13** l'erreur de vitesse entre l'entrée et la sortie

Les erreurs sont presque inexistantes, ce qui signifie que l'entrée est presque similaire à la sortie.

La figureIII.14 correspondante montre la vitesse de l'entrée et la sortie :



**Figure III.14** la vitesse de l'entrée et la sortie

La vitesse sortie dans le ballon bleu est identique à la vitesse de d'entrée dans le ballon rouge.

### III.6 Partie de la simulation den Proteus

Les concepteurs traditionnellement intégrés dans les industries mettent en place des équipements d'expérimentation et des procédures de test pour flasher le MCU avec le code source, le déboguer, le retirer de la carte de développement programmable, le mettre dans le circuit de test prévu et l'exécuter. Si une erreur se produit, le processus sera répété jusqu'à ce que l'objectif de conception soit atteint. Ce n'est pas seulement pour le MCU lui-même, mais aussi pour la construction de circuits externes sur PCB. Les étapes de développement conventionnelles sont illustrées à la figure III.15. Il était impossible pour le concepteur de développer et de tester la conception complète avant la construction du prototype physique [31]. Afin de raccourcir les cycles de conception, de réduire les coûts et les risques, le système de moteur BLDC peut d'abord utiliser la technologie de modélisation et de simulation pour établir son modèle. De cette façon, beaucoup de temps de conception réel est effectivement économisé.

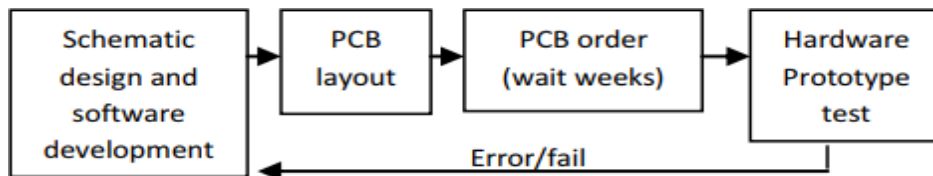


Figure III.15 Étapes de développement conventionnelles

La figure III.16 montre les étapes de développement à l'aide de Proteus VSM. Il est possible de réaliser avec succès un prototype de matériel de travail « pour la première fois » en utilisant ce logiciel. La programmation virtuelle et le débogage MCU et la capacité d'analyse des transitoires offerts par ce logiciel facilitent le travail du concepteur, en particulier lorsqu'il s'agit de conception basée sur des circuits MCU. À partir de l'analyse transitoire, la partie la plus importante qui est le MCU peut être confirmée fonctionnant correctement avec le code source programmé à l'intérieur.

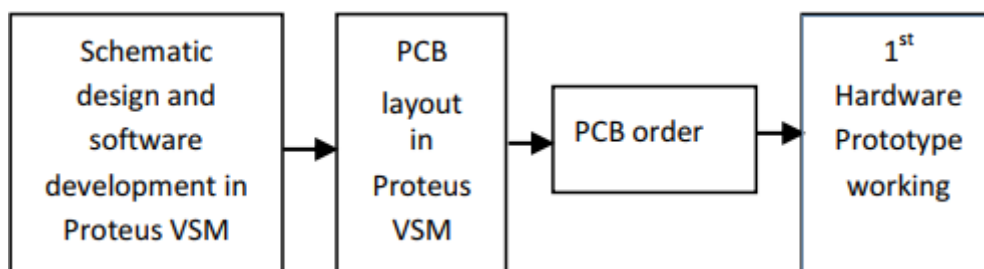


Figure III.16 Étapes de développement utilisé Proteus VSM

Proteus VSM est un logiciel électronique tout à fait unique qui offre la possibilité de simuler du code de microcontrôleur de haut et bas niveau qui fonctionne avec un compilateur et un assembleur. Les composants massifs stockés dans sa bibliothèque permettent au concepteur de tester de nombreux composants appropriés pour la même application. C'est actuellement le

seul package disponible avec une gamme complète de modèles de microcontrôleurs [32]. Dans le passé, la conception du contrôleur pour moteur PM BLDC était généralement un processus intuitif d'essais et d'erreurs [34]. Par conséquent, Proteus VSM peut être considéré comme une solution à ce problème. La caractéristique la plus importante de Proteus VSM est sa capacité à simuler l'interaction entre un logiciel exécuté sur un microcontrôleur et toute électronique analogique ou numérique qui lui est connectée [31]. Grâce à Proteus VSM, le code du microcontrôleur simulé peut interagir avec le matériel simulé en temps réel si le circuit n'est pas trop complexe. À l'heure actuelle, c'est le meilleur logiciel d'outil de simulation pour la conception de systèmes embarqués [33].

Fondamentalement, il existe trois étapes principales pour tester le MCU :

- ✓ Crée le circuit schématique externe correct connecté au MCU
- ✓ Écrire le code source du programme et le construire (assembler)
- ✓ Attachez le code de construction au MCU et exécutez la simulation

Le code source peut être écrit dans un éditeur de texte tel que le Bloc-notes, puis enregistré en tant que fichier asm avant de le tester et de l'utiliser comme code source pour le MCU. Il peut être modifié à l'aide de l'éditeur de code source. En utilisant la fonction de dialogue Ajouter/supprimer des fichiers de code source, le code source peut être parcouru et attaché au MCU. Le MCU prendra le signal du capteur Hall comme entrée pour générer une séquence de commutation en six-step ou trapézoïdal et produire six sorties aux ports RC0 à RC5. Le circuit complet est simulé à l'aide de composants virtuels. Comme Proteus VSM fournit un modèle de moteur BLDC, les opérations du moteur peuvent être visualisées de manière animée lors de l'exécution de la simulation.

### III.7 Résultats de la simulation den Proteus

La figure III.17 montre la fenêtre MPLAB IDE qui comprend le circuit simulé, le débogage logiciel et les formes d'onde de sortie. En utilisant Proteus VSM comme outils de débogage, le matériel de la carte de développement est exclu, ce qui facilite grandement la conception, la modification et le test du code source.

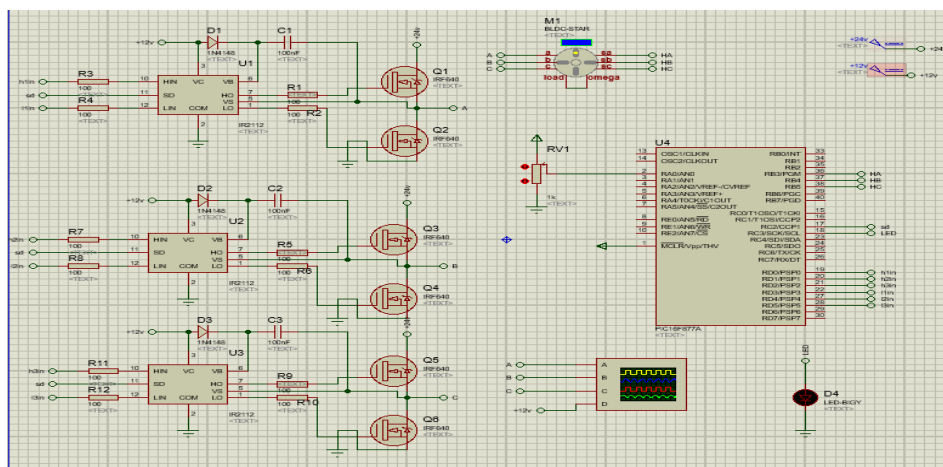
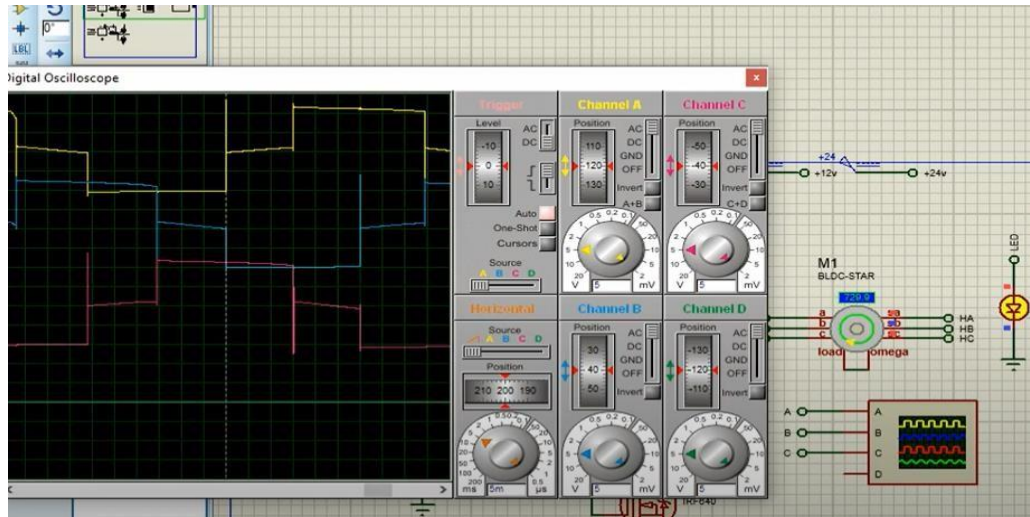


Figure III.17 Proteus VSM comme outil de débogage dans MPLAB IDE.



**Figure III.18** Tension aux bornes 3-phase

La figure III.18 montre la tension aux bornes du système d'entraînement surveillée à l'aide d'un oscilloscope numérique. La forme d'onde jaune est la phase A de tension terminale, la phase B de forme d'onde bleue et la phase C de forme d'onde rouge.

### III.8 Conclusion

Le contrôleur PID est plus performant pour le contrôle de la vitesse d'un moteur BLDC. Car, il réduit le temps de montée de la vitesse (au démarrage). Aussi, il réduit énormément les écarts en régime permanent et ainsi il améliore la réponse dynamique et la stabilité du système. La stabilité du système en boucle ouverte et en boucle fermée a été simulée. Les résultats obtenus ont montré que la stabilité du système est améliorée en introduisant un régulateur PID en boucle fermée.

# **CONCLUSION**

## **GENERALE**

## Conclusion générale

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire, concerne la commande PID classique de courant et de vitesse du moteur à courant continu sans balais (BLDCM).

Le moteur BLDC présente plusieurs avantages par rapport aux autres moteurs pour le système de propulsion électrique, tels que réduction au niveau de volume, rendement élevé (dû à l'absence des pertes au niveau du rotor), la fiabilité élevée à cause de l'élimination de certains problèmes au niveau de l'excitation.

Nous avons commencé ce mémoire par un bref aperçu sur le principe du moteur BLDC, puis donné les caractéristiques et la construction de cette machine et enfin explicité les équations électrique et mécanique. Pour tester les performances du moteur BLDC on doit disposer d'un modèle dynamique sous forme des équations différentielles du courant de phases, pour les deux modes de fonctionnement (moteur et génératrice). Pour établir ces équations on a tenu compte les chutes de tension dues aux composants à semi-conducteur du commutateur. Ces équations ont servi à établir un programme de MATLAB, qui simuler le fonctionnement du moteur.

Enfin, les résultats de la simulation ont montré que le contrôleur PID classique appliqué à la vitesse du moteur BLDC fonctionnait bien car les résultats montrés

à travers les courbes d'erreur entre la vitesse réelle et la vitesse de consigne tend vers zéro ce qui signifie que les courbes de vitesse réelle et la consigne sont confondues .

Comme perspective nous proposons la réalisation pratique de ma commande du BLDC dont le schéma a été déjà réalisé avec le logiciel Proteus.

**REFERENCES**

**BIBLIOGRAPHIQUE**

## **References Bibliographies**

- [1]: A. Varsani: « Low Cost Brushless DC Motor Controller ». Bachelor of Engineering. University of Queensland. November 2003.
- [2]: R. K. Srivastava et al: « PM enhanced sensing of internal EMF variation—a tool to studyPMBLDC/AC motors», International journal on smart sensing and intelligent systems, VOL. 6, NO. 4, September 2013.
- [3]: <https://fr.scribd.com/document/318725455/moteur-brushless-pdf>
- [4]: B. AZOUI: « Conception and Realization of a Three-Phase Brushless DC Motor (BLDCM) for Solar Application ». Doctorate Thesis. University of Batna (Algérie).Mai 2002.
- [5]: W. H. YEADON, A. W. YEADON: « Handbook of Small Electric Motors ».McGraw-Hill. Two Penn Plaza, New York. 2001.
- [6]: A. VARSANI: « Low Cost Brushless DC Motor Controller ». Bachelor of Engineering. University of Queensland. November 2003.
- [7]: « Magtech Brushless Motor Source Book ». Axsys Technologies, Inc. Motion Control Products San Diego. April, 2002.
- [8]:H. B. Hansen et al: « A Hybrid Model of a Brushless DC Motor ». 16th IEEE International Conference on Control Applications Part of IEEE Multi-conference on Systems and Control. Singapore. October. 2007.
- [9]: K. Joiset all: « implementation of BLDC motor drive for automotive water pump». International Journal of Research in Engineering & Advanced Technology, Volume 1, Issue 1, March, 2013.
- [10]: T. KENJO, S. NAGAMORI: « Permanent-Magnet and Brushless DC Motors ».Ecole Normale Supérieure. Oxford. 1985.
- [11]: <https://www.electromecanique.net/2015/01/principe-de-fonctionnement-dun-moteur.html>
- [12]: M. Arrouf : « Optimisation d l'ensemble onduleur, moteur et pompe branche sur un générateur photovoltaïque ». Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2007.
- [13]: <http://fr.rmbttmotor.com/news/what-re-the-advantages-and-disadvantages-of-br-8515392.html>
- [14] MOHAMMED KETIECH, « Commande vectorielle sensorless des moteurs brushless de mini-drones », mémoire de master, Supélec-département DCSD à GIF-sur- Yvette, septembre 2012.
- [15] V. LELEUX, « Circuit de commande d'un moteur brushless DC par onduleur triphasé commandé en modulation de largeur d'impulsion par microcontrôleur », article, 2005

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [16] :S. Rama Reddy et all: « Modeling and simulation of closed loop controlled VSI fed PMBLDC motor », International Journal of Advanced Engineering Technology EISSN 0976-3945.
- [17] : T.V. Narmadha et all : «speed control of PMBLDC drive with gate control method using conventional and fuzzy controller», International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 2(11), 2010, 6663-6674.
- [18] : J. Faiz et all: « Simulation and Analysis of Brushless DC Motor Drives Using Hysteresis, Ramp Comparison and Predictive Current Control Techniques ». Simulation Practice and Theory 3 (1996) 347-363. Science Direct. December 1994.
- [19] : H. B. Hancen, et all: « A Hybrid Model of a Brushless DC Motor ».16th IEEE International Conference on Control Applications Part of IEEE Multi-conference on Systems and Control. Singapore. October. 2007.
- [20] : C. Gencer, ET all: « Modeling and Simulation of BLDCM Using MATLAB/SIMULINK ». IEEE Journal of Applied Sciences 6 (3): 688-691, 2006
- [21] : A. Moussi, A. Torki: « An improved efficiency permanent magnet brushless DC motor PV pumping system». LARHYSS Journal, N°.01, Mai 2002.
- [22] : S.D. Sudhoff, P.C. Krause: « Average-Value Model of the Brushless DC Motor 120° Inverter System». IEEE Transactions on Energy Conversion, VOL, 5, No. 3, Septembre 1990.
- [23] : A. Terki: « control flou-génétique hybride d'un moteur BLDC dans un Système de pompe photovoltaïque ».thèse de doctorat, université de Beskra. 2011.
- [24] :S.D. SUDHOFF, P.C. KRAUSE: « Average-Value Model of the Brushless DC Motor 120 ° Inverter System ». IEEE Transactions on Energy Conversion, VOL, 5, No. 3. September 1990.
- [25] : S.D. SUDHOFF, P.C. KRAUSE: « Operating Modes of the Brushless DC motor120° Inverter ». IEEE Transactions on Energy Conversion, VOL, 5, No. 3. Septembre, 1990.
- [26] : M. BOUHRIK: « Impact des Nouveaux Matériaux (NdFeB et SmCo) sur les Moteurs (BLDCM) Destinés aux Véhicules Electriques ». Mémoire de magister en électrotechnique. Université de Batna (Algérie), Mars, 2007.
- [27] :M. ETIQUE: « Entraînements Régés MET2 ».Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du canton de Vaud. Mars, 2006.
- [28] :M. TELLAA, M. DJEMAI : « Commande de la Vitesse et de la Position d'un Moteur à Courant Continu sans Balais pour les Applications en Robotique ». PFE en Automatique. Ecole national polytechnique (ENP), Alger (Algérie), Juin 2007.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [29] Rahman, S. M. A. Motakabber, M. I. Ibrahimy and A. H. M. Zahirul Alam, "PLL-Based 3 $\phi$  Inverter Circuit for Micro grid System Operated by Electrostatic Generator," IJUM Engineering Journal, 2019, vol. 20(1), pp. 177-193.
- [30] T. Rahman, S. M. A. Motakabber, M. I. Ibrahimy and Aliza 'Aini, "A PWM Controller of a Full Bridge Single-phase Synchronous Inverter for Micro-grid System," Journal of Physics: Conference Series, 2017, pp.1-13.
- [31] B. Su and L. Wang, "Application of Proteus Virtual System Modelling (VSM) in Teaching of Microcontroller", International Conference on E-Health Networking, Digital Ecosystem and Technologies (EDT), April 2010, Vol.2, pp 375-378.
- [32] M. Bates, "Interfacing PIC Microcontrollers, Embedded Design By Interactive Simulation", Elsevier, 2006, UK.
- [33] S. Wei and L. Jianhui, "The Construction of Single-Chip Virtual Experiment Platform Based on Proteus", International Forum on Information Technology and Applications, IFITA '09, May 2009, Vol.1, pp 548-550.
- [34] W. C. Chen and Y. Y. Tzou, "Efficiency Optimization for Single-Phase Brushless DC Fan Motors", IEEE Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC '09, May 09, pp. 1913-1918.

# RESUME

**الملخص:**

العمل المزمع في هذه الأطروحة يتعلق بوصف ونمذجة محرك (BLDC) ونمنا بتطبيقات التحكم PID للثبات السرعة. يعتبر محرك DC بدون فرش (BLDC) محركًا ممتازًا مغناطيسيًا دائمًا، وقد أصبح أداة ال غنى عنها في العديد من التطبيقات اليوم نظرًا لأدائها الموثوق. هذا هو السبب في أننا نرررنا في عملنا التحكم في محرك BLDC عن طريق "التحكم PID"، والذي تم إجراء محاكاته باستخدام برنامج Matlab / Simulink و Proteus

**الكلمات المفتاحية :**

المحرك BLDC، التحكم (PID) لمسشعر (Effet hall)

**Résumé :**

Les travaux présentés dans ce mémoire portent sur la description, et la modélisation d'un moteur (BLDC), Nous avons appliqué la commande PID pour la stabilisation de la vitesse. Le moteur à courant continu sans balais (BLDC) est considéré comme étant un moteur synchrone à aimant permanent, et est devenue, aujourd'hui, un outil indispensable dans diverses applications grâce à ses performances supérieures. C'est pourquoi nous avons décidé dans notre travail une commande sur le moteur BLDC par "la commande PID", dont la simulation a été réaliser à l'aide du programme Matlab/Simulink et Proteus

**Mots clés :** Moteur BLDC, capteur a effet hall, régulateur PID.

**Abstract:**

The work presented in this thesis relates to the description and modeling of a motor (BLDC). We have applied the PID control for speed stabilization. The brushless DC motor (BLDC) is considered to be a permanent magnet synchronous motor, and has become, today, an indispensable tool in various applications thanks to its superior performance. This is why we decided in our work to control the BLDC motor by "PID control", the simulation of which was carried out using the Matlab/Simulink program and Proteus.

**Key words:**

BLDC motor, Hall Effect sensor, PID regulator.