

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 : SCIENCE ET TECHNOLOGIE  
FILIERE : ELECTRONIQUE  
OPTION : INSTRUMENTATION

**Mémoire présenté pour l'obtention**

**Du diplôme de Master Académique**

**Par :**

RAMLI Abdelkarim

MEHNANA Wafa

**Intitulé**

**Contrôle de moteur BLDC**

**(Courant continu sans balais)**

**avec et sans capteur à effet Hall à l'aide d'une  
carte Arduino**

**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

**ANNEE UNIVERSITAIRE: 2022/ 2023**

# Remerciements

**Ma** gratitude doit d'abord être

Exprimée envers « الله » le Tout puissant,  
qui m'a donné la sagesse, La patience,  
le courage et la volonté pour qu'on puisse  
terminer ce travail

**Je** ne dois pas oublier mes professeurs

Ont eu le plus grand rôle en me soutenant  
Et en me donnant de précieuses informations

**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**

**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 RAMLI et MEHNANA  
ET a tous mes chères amies .**

**Surtout l'ami OUANANI AHMED qui m'a aidé  
avec ma thème de fin d'études**

**À toute la promotion 2023 de la spécialité**

**INSTRUMENTATION**

تفرض الحاجة المتزايدة للصناعة لزيادة الإنتاجية متطلبات جديدة على الآليات المتصلة بالمحركات الكهربائية. هذا يؤدي إلى مشاكل مختلفة في عملية العمل بسبب الديناميكيات السريعة وعدم الاستقرار. أصبحت محركات DC بدون فرشاة (BLDC) مستخدمة على نطاق واسع في العديد من الأنظمة الاستهلاكية والصناعية، مثل محركات المؤازرة والأجهزة المنزلية والأجهزة الطرفية للكمبيوتر وتطبيقات السيارات في السنوات الأخيرة بسبب كفاءتها العالية وتشغيلها الصامت والشكل المضغوط و الموثوقية والصيانة المنخفضة. الهدف من الأطروحة هو تصميم نموذج محاكاة لمحرك مغناطيسي دائم بدون فرش (PMBLDC) والتحكم في موضعه. في النموذج المطور، تمت مراقبة وتحليل خصائص السرعة، عزم الدوران، EMF الخلفي، الفولتية وكذلك التيارات بشكل فعال. يتم استخدام وحدة تحكم PID

### Abstract :

Growing need of industry for higher productivity is placing new demands on mechanisms connected with electrical motors. This is leading to different problems in work operation due to fast dynamics and instability .

Brushless DC (BLDC) motor drives are becoming widely used in various consumer and industrial systems, such as servo motor drives, home appliances, computer peripherals, and automotive applications in recent years because of their high efficiency, silent operation, compact form, reliability, and low maintenance.

The aim of the thesis is to design a simulation model of Permanent Magnet Brushless DC (PMBLDC) motor and to control its position. In the developed model, the characteristics of the speed, torque, back EMF, voltages as well as currents are effectively monitored and analyzed. The PID controller is used

### Résumé :







Le besoin croissant de l'industrie pour une productivité plus élevée impose de nouvelles exigences aux mécanismes liés aux moteurs électriques. Ce la conduit à différents problèmes dans le fonctionnement du travail en raison de la dynamique rapide et de l'instabilité .

Les entraînements de moteur CC sans balais (BLDC) sont de plus en plus utilisés dans divers systèmes grand public et industriels, tels que les entraînements de servomoteurs, les appareils ménagers, les périphériques informatiques et les applications automobiles ces dernières années en raison de leur rendement élevé, de leur fonctionnement silencieux, de leur forme compacte, de leur fiabilité et de leur faible maintenance .

L'objectif de la thèse est de concevoir un modèle de simulation de moteur à courant continu sans balai à aimant permanent (PMBLDC) et de contrôler sa position. Dans le modèle développé, les caractéristiques de la vitesse, du couple, de la force contre-électromotrice, des tensions ainsi que des courants sont efficacement surveillés et analysés. Le contrôleur PID est utilisé .

# Sommaire

---

 Dédicaces .....	
 Résumé .....	
 Sommaire .....	
 Liste des figures .....	
 Nomenclature et Glossaire .....	
 Introduction générale.....	
	<b>la Page</b>
<b>CHAPITRE I : Introduction au moteurs électriques .....</b>	<b>1-9</b>
I-1 Introduction.....	1
I-2 Définition Moteur électrique .....	1
I-3 Historique de moteur électrique .....	2
I-4 Variétés de moteur électrique .....	2
I-4-1 Moteur à courant continu.....	2
I-4-2 les moteurs universels .....	3
I-4-3 Moteur à courant alternatif .....	4
I-5 Moteur BLDC : .....	5
I-5-1 Principe fonctionnement :.....	6
I-5-2 Caractéristique du moteur BLDC : .....	6
I-5-3 Application de moteur BLDC.....	6
I-5-4 Avantages et inconvénients Mc BLDC .....	8
I-6 Conclusion : .....	9
<b>CHAPITRE II : Modélisation du moteur BLDC.....</b>	<b>10-22</b>
II.1 Introduction.....	10
II.2 Partie Opérative.....	10
II.2.1 Composition d'un moteur BLDC .....	10
II.2.2 Constitution du Moteur BLDC .....	12
II.2.3 Architecture et représentation du Moteur BLDC. ....	13
II.3 Partie Commande .....	14
II.3.1 Arduino.....	14
II.4 Composants électroniques : .....	15
II.4.1 Transistor MOSFET :.....	15
II.4.2 IR2104S : .....	16

# Sommaire


---


II.5 Principe de fonctionnement du moteur BLDC .....	16
II.6 Modélisation mathématique du Moteur BLDC .....	18
II.6.1 Les Équations Électrique .....	18
II.6.2 La Force Électromotrice .....	19
II.6.3 L'Équation Mécanique du Mouvement .....	20
II.6.4 Couple Électromagnétique .....	20
II.6.5 Génération de couple.....	21
II.7 conclusion .....	23
<b>CHAPITRE III : Simulation et réalisation de la commande d'un moteur BLDC .....</b>	<b>24-31</b>
III.1 INTROUDUCTION.....	24
III.2 La commutation électrique .....	25
III.2.1 La commutation en bloc avec capteurs à effet hall .....	25
III.2.2 La commutation sans capteur .....	26
III.3 Modèle de l'ensemble Machine-Commutateur Electronique .....	26
III.4 Détection de l'événement de passage à zéro .....	27
III.5 Commande de moteur BLDC sans capteur avec circuit Arduino.....	29
III .6 conclusion.....	31
<b>CHAPITRE IV : Simulation sur MATLAB/SIMULINK d'un contrôleur PID de moteur BLDC .</b>	<b>32-42</b>
IV.1 INTRODUCTION .....	32
IV.2 CONTRÔLE DES POSITIONS .....	32
IV.2.1 Présentation .....	32
IV.2.2 Contrôleur PID.....	33
IV.2.3 Théorie du contrôleur PID .....	34
IV.2.3.1 Terme proportionnel.....	35
IV.2.3.2 Terme intégral.....	35
IV.2.3.3 Terme dérivé .....	36
IV.2.4 Réglage de boucle.....	36
IV.2.4.1 Réglage manuel.....	37
IV.3 Modèle Simulink du moteur BLDC.....	38
IV.4 VI.4 Résulta de Simulation .....	39

# Sommaire

---

IV.4 Conclusion .....42

 **Conclusion générale** .....

 **Bibliographie** .....

 **Annexe** .....

# Liste des Figures

---

	<b>Page</b>
<b>CHAPITRE I :</b> .....	1-9
Figure I-1 : Moteur Électrique .....	1
Figure I-2 : Moteur à courant continu .....	3
Figure I-3 : le moteur universel.....	4
Figure I-4 Moteur à courant alternatif.....	4
Figure I-5 : Classification des moteurs électriques .....	5
Figure I-6 : DVD Brushless Moteur.....	7
Figure I-7: DRONE Brushless Moteur.....	7
Figure I-8: Moteur Brushless Baldor.....	8
Figure I-9: Moteur Brushless robotique .....	8
<b>CHAPITRE II :</b> .....	10-22
Figure II.1 : Les Composant d'un moteur BLDC.....	10
Figure II.2 configuration électrique du stator (trois phases, trois bobines).	
Figure II.3 sections transversales de l'aimant du rotor.....	12
Figure II.4Palliers.....	12
Figure II.5 Parties principales du moteur BLDC : (a)Machine Synchrone, (b) Circuit de commutation électronique, (c) Source continu DC.....	13
Figure II.6 Bobinages de différents moteurs .....	14
Figure II.7 : La carte Arduino UNO.....	15
Figure II.8 Transistor MOSFET.....	16
Figure II.9 Le Driver onduleur IR2104S .....	16
FigureII.13: Fonctionnement de l'onduleur et du moteur brushless.....	17
FigureII.14: Exemple de situation de commutation .....	18
Figure III.15 Modèle électrique simplifié du BLDC.....	18
Figure III.16 Formes typiques des courants et des FEM.....	20
Figure II -17: Schéma block Modèle mathématique du Moteur BLDC .....	22
<b>CHAPITRE III:</b> .....	25-30
Figure III.1 La commutation.....	25
Figure III.2 Commutation en bloc .....	25
Figure III.3 Commutation sans capteur .....	26

## Liste des Figures

---

Figure III.4 Ensemble moteur-commutateur .....	27
Figure III.5 Signaux à effet hall .....	27
Figure III.6 passage à zéro .....	28
Figure III.7 Le schéma du circuit du projet .....	29
Figure III.8 le chronogramme d'entrée et de sortie .....	30
<b>CHAPITRE IV .....</b>	<b>33-40</b>
Figure VI.1 : Contrôle de position et vitesse du moteur PMBLDC .....	33
Figure VI.2 : Schéma fonctionnel de base du contrôleur PID .....	34
Figure VI . 3 moteur BLDC avec contrôleur PID .....	39
Figure VI.4 la vitesse du moteur BLDC.....	39
Figure VI.5 Courante de Stator (A).....	40
Figure VI.6 Couple de Moteur BLDC .....	41

# Nomenclature et Glossaire

---

## Glossaire

**MCC** : Moteur à courant continu

**PMSM** : les moteur synchrones

**BLDC** : Brushless Direct Current

**FEM** : la force Electromotrice

**P** : Contrôleur (proportionnelle)

**PI** : Contrôleur (proportionnelle, Intégral)

**PID** : Contrôleur (proportionnelle intégrale dérivé)

# Nomenclature et Glossaire

---

## Nomenclature

$B^{\rightarrow}$  : champ magnétique statorique

$Cm^{\rightarrow\rightarrow\rightarrow\rightarrow}$  : couple magnétique

$Ra, Rb, Rc$  : les résistances des trois phases

$La, Lb, Lc$  : les inductances des trois phases

$M$  : inductance mutuelle entre les phases

$va, vb, vc$  : les tensions de phase du stator

$vab, vbc, vca$  : les tensions entre phases du stator

$ia, ib, ic$  : les courants de phase du stator

$\omega r$  : est la vitesse angulaire

$Ce$  : est le couple électromagnétique développé

$C$  : est le couple de charge

$f$  : est le coefficient de frottement

$p$  : nombre de paires de pôles

$kp$  : gain proportionne

$ki$  : gain intégré

$kd$  : gain dérivé



# **Introduction Générale**

# INTRODUCTION GENERALITE

---

Le besoin croissant de l'industrie pour une productivité plus élevée impose de nouvelles exigences aux mécanismes liés aux moteurs électriques. Cela conduit à différents problèmes dans le fonctionnement du travail en raison de la dynamique rapide et de l'instabilité.

La stabilité du système est essentielle pour travailler aux objectifs fixés souhaités. Les effets non linéaires causés par un moteur réduisent fréquemment la stabilité, ce qui réduit la capacité du contrôleur à maintenir la vitesse ou la position aux points de consigne.

Les moteurs CC sans balais à aimant permanent (PMBLDC) sont l'un des entraînements électriques qui gagnent rapidement en popularité, en raison de leur rendement élevé, de leur bonne réponse dynamique et de leur faible maintenance.

Les moteurs et variateurs CC sans balais (BLDC) se sont considérablement développés ces dernières années dans l'industrie de l'électroménager et l'automobile. Les variateurs BLDC sont très préférables pour les systèmes compacts, à faible coût, nécessitant peu d'entretien et à haute fiabilité. Dans ce travail de thèse, un modèle mathématique de moteur à courant continu sans balai est développé.

Le modèle mathématique est présenté sous forme de schéma bloc. La simulation du moteur CC sans balais à aimant permanent est effectuée à l'aide du progiciel MATLAB/SIMULINK et sa tension de phase, son courant de phase, sa force contre-électromotrice et sa forme d'onde de couple sont analysés. Un contrôleur PID a été utilisé pour le contrôle de position du moteur PMBLDC.

L'efficacité du modèle est établie par la prédiction des performances sur une large gamme de conditions de fonctionnement. Le contrôleur de position a été conçu avec succès pour un fonctionnement en boucle fermée du moteur PMBLDC et le moteur tourne presque jusqu'à la position de référence. Les résultats montrent que MATLAB associé à simulink est un bon outil de simulation pour modéliser et analyser un moteur PMBLDC contrôlé par PID

mémoire se compose de 4 chapitres :

## **Le premier chapitre:**

Ce chapitre reprend toutes les définitions des moteurs, l'histoire de leur émergence, de leur développement et de leur diffusion dans le monde, et les domaines dans lesquels ils sont utilisés, ainsi que leurs aspects positifs et négatifs, etc.

# INTRODUCTION GENERALITE

---

## **Le deuxième chapitre :**

Dans ce chapitre, nous découvrirons les différents matériels et logiciels utilisés dans ce projet, ainsi que leur connexion, leur fonctionnement et leur méthode de contrôle.

## **Dans le troisième chapitre :**

Dans ce chapitre, nous allons construire notre propre projet, appliquer tout ce qui est mentionné dans nos chapitres précédents, et travailler sur la modélisation et la simulation de l'utilisation tout logiciel

## **Dans le dernier chapitre :**

Ce chapitre détaille un modèle MATLAB simulé pour un aimant permanent sans balai  
Contrôle de la position et de la vitesse du moteur à l'aide d'un microcontrôleur PID.

# **CHAPITRE I**

## **Introduction au moteurs électriques**

## I.1 Introduction :

Grâce au développement des matériaux magnétiques et aux avancées remarquables dans le domaine de l'électronique de puissance qui ont été réalisées ces dernières années, les moteurs ont réussi à occuper une place importante dans l'industrie. En fait, la prospérité que connaissent ces machines est principalement due à leurs hautes performances, leur rapport puissance/poids élevé, leur couple important mais aussi à leurs faibles pertes, leur grande fiabilité ainsi que leur faible coût.

Avec toutes les qualités que possèdent ces machines, leur application devient possible dans de nombreux domaines tels que la robotique, l'aérospatial, les énergies renouvelables ainsi que les véhicules électriques ou hybrides.

Ce premier chapitre est consacré à présenter les différents types de moteurs, leurs caractéristiques et leurs domaines d'application, tout en mentionnant certains de leurs avantages et inconvénients. De plus, nous fournirons d'abord des définitions et un bref historique des moteurs BLDC. Ensuite, on donne leurs caractéristiques, leurs avantages et inconvénients.

## I.2 Définition Moteur électrique :

Un moteur électrique transforme de l'énergie électrique en énergie mécanique, disponible sur un axe (appelé arbre). Cette énergie, entraînant l'axe dans un mouvement de rotation, peut aussi bien servir à faire fonctionner une perceuse, un robot de cuisine ou un véhicule électrique.

Le moteur électrique est réversible. Si on fait tourner mécaniquement son axe, il produit de l'électricité et fonctionne alors en génératrice. Cette réversibilité est, par exemple, utilisée sur un véhicule électrique : lors du freinage, les roues entraînent le moteur pour recharger les batteries. Les moteurs électriques ont un excellent rendement : plus de 90 % de l'énergie électrique est transformée en énergie mécanique. [1]



Figure I\_1 : Moteur Électrique

### I.3 Historique de moteur électrique :

Après la découverte du lien entre l'électricité et le magnétisme en 1821 par le chimiste danois Hans Christian Ørsted, les physiciens britanniques Michael Faraday et Peter Barlow font dès l'année suivante la démonstration de dispositifs transformant un courant électrique en un mouvement, mais la « roue de Barlow » est juste capable de tourner, pas encore de produire une véritable force mécanique.

En 1871, le physicien belge Zénobe Gramme présente à l'Académie des sciences de Paris la première génératrice industrielle de courant continu.

En 1887, le physicien serbe Nikola Tesla dépose le premier brevet du moteur électrique actuel, à courant alternatif. [2]

### I.4 Variétés de moteurs électriques

Toutes les machines électriques rotatives sont constituées d'une partie fixe appelée **stator** et d'une partie mobile : le **rotor**.

#### I.4 1 Moteur à courant continu :

Le moteur DC, appelé aussi moteur à courant continu, fait partie de la classe des moteurs électriques et sert essentiellement à transformer de l'énergie électrique en énergie mécanique. La plupart des formes de moteurs DC reposent, dans ce contexte, sur les forces magnétiques et disposent de mécanismes internes de types électronique ou électromécanique. Les moteurs à courant continu conventionnels se caractérisent d'abord par le collecteur qui change périodiquement le sens du flux électrique à l'intérieur du moteur. Une des plus puissantes versions du moteur DC classique que l'on retrouve dans de nombreuses applications est le moteur DC sans balais ; celui-ci fonctionne sans frottement et offre donc notamment une durée de vie plus longue.

Malgré l'utilisation croissante et la grande rivalité avec les moteurs **AC**, lesquels, en tant que moteurs triphasés, font également partie des moteurs électriques, les moteurs **DC** jouent aujourd'hui encore un rôle très important. Ils sont souvent utilisés dans les applications industrielles, en raison de leurs propriétés — notamment la possibilité qu'ils offrent d'ajuster leur couple et leur vitesse de manière précise et extrêmement variable — C'est par exemple le cas des servo actionneurs de la série **PMA** de Harmonic Drive **AG** qui sont composés d'un moteur à courant continu à haute dynamique et d'une mini-cartouche de réduction **PMG** avec codeur

incrémental. Ils sont parfaitement adaptés aux applications de l'industrie des semi-conducteurs, de la technique médicale et des machines de mesure et de tests.[3]

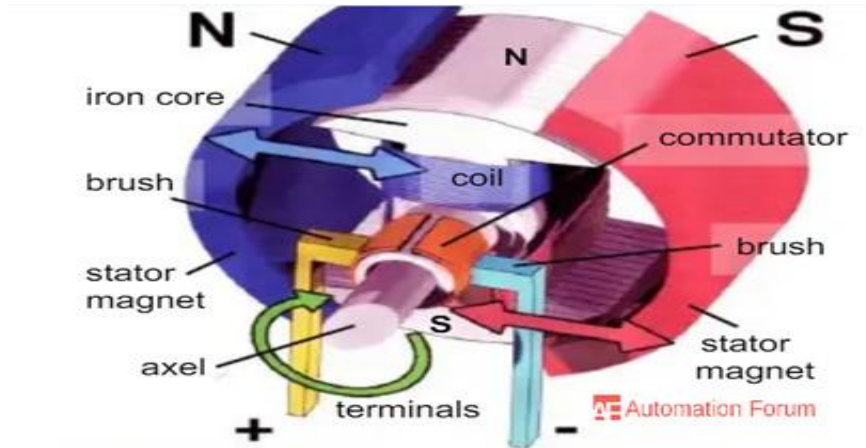


Figure I\_2 : Moteur à courant continu

#### I.4.2 Moteur universels :

Un moteur universel est une machine à courant continu à excitation série :

le rotor est connecté en série avec l'enroulement inducteur. Le couple de la machine est indépendant du sens de circulation du courant (couple proportionnel au carré du courant) et peut donc être alimenté en courant alternatif. Pour limiter les courants de Foucault qui apparaissent systématiquement dans toutes les zones métalliques massives soumises à des champs magnétiques alternatifs, son stator est feuilleté .

Il tient son nom du fait qu'il **peut être alimenté indifféremment en courant continu ou en courant alternatif**.

Les moteurs universels sont utilisés dans des dispositifs exigeant un couple assez fort, tel que les robots de cuisine, l'outillage électroportatif de faible puissance (jusqu'à 1200 W) ou encore les aspirateurs.

La vitesse de ces moteurs dépend de la valeur de la tension d'alimentation. En régime de courant alternatif, elle peut être facilement réglée par un dispositif peu coûteux tel que le gradateur à angle de phase (le même variateur qui sert à régler l'intensité lumineuse des luminaires) [4]



Figure I\_3 : Moteur universel

### I.4.3 Moteur à courant alternatif :

Existe deux types de moteurs à courant alternatif :

- ❖ Les moteurs synchrones
- ❖ Les moteurs asynchrones

Nous allons nous limiter à la description des moteurs synchrones dont le BLDC en fait partie et constitue l'objet de notre étude aux chapitres suivants.

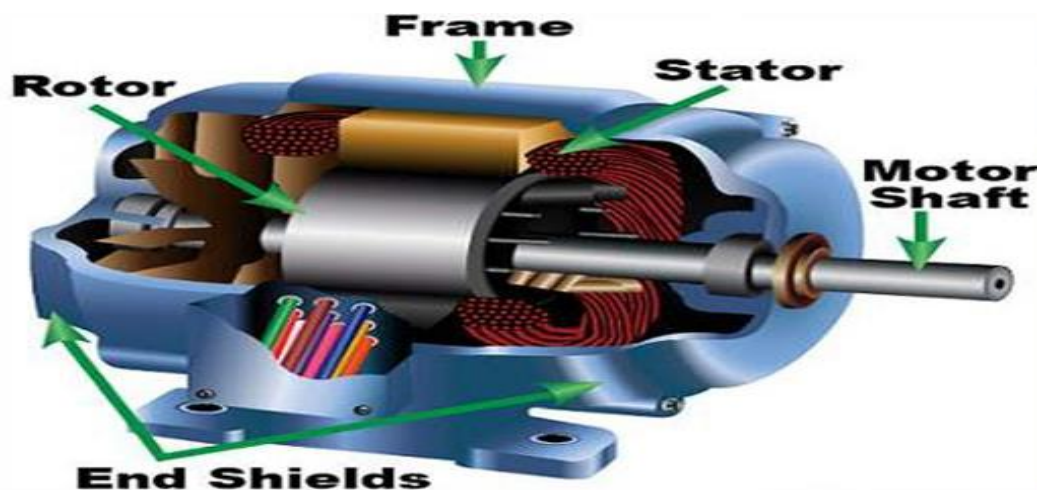


Figure I\_4 : Moteur à courant alternatif

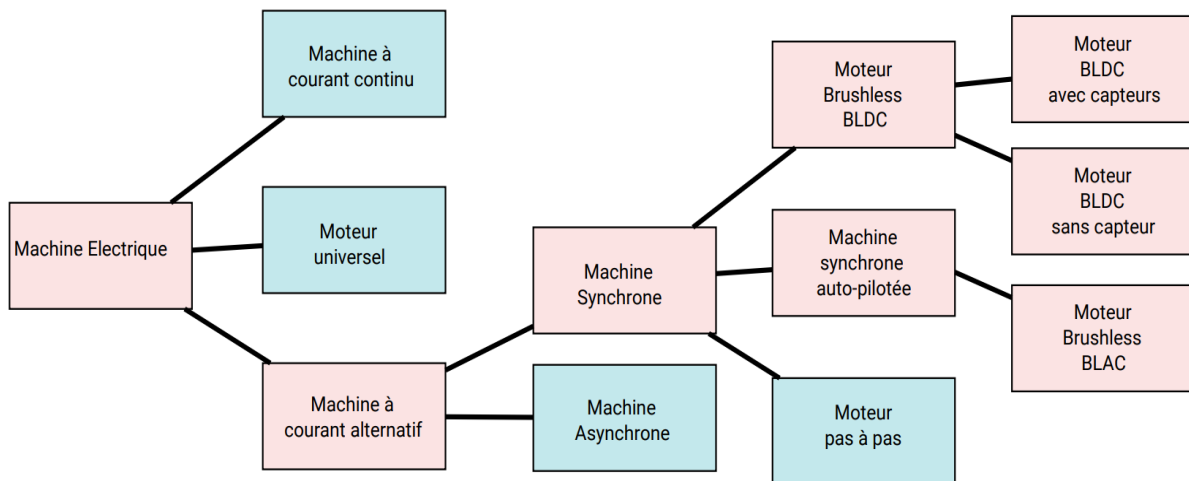
- Les moteurs synchrones :

Le moteur synchrone à aimants permanents (PMSM) est un moteur synchrone en courant AC, qui dispose d'une forme d'onde sinusoïdale et dont l'excitation du champ est fournie par des aimants permanents. Le PMSM est le croisement d'un moteur à induction et d'un moteur DC sans balais. Comme un moteur DC sans balais, il a un rotor à aimant permanent et des enroulements sur le stator.

Cependant, la structure du stator ressemble à celle d'un moteur à induction, avec des enroulements construits pour produire une densité de flux sinusoïdale dans l'entrefer de la machine. Sa densité de puissance est plus élevée que celle des moteurs à induction avec les mêmes valeurs nominales, puisqu'il n'y a pas de puissance du stator dédiée à la production de champ magnétique. [5]

**I.5 Moteur BLDC :**

Un moteur sans balais, ou « moteur brushless », ou machine synchrone auto-pilotée à aimants permanents, est une machine électrique de la catégorie des machines synchrones, dont le rotor est



**Figure I\_5 : Classification des moteurs électriques**

constitué d'un ou de plusieurs aimants permanents et pourvu d'origine d'un capteur de position rotorique : capteur à effet Hall, synchro-résolver, codeur rotatif (par exemple codeur incrémental), ou tout autre système permettant l'auto-pilotage de la machine. [6]

**I.5.1 Principe de Fonctionnement :**

Les bobines sont alimentées de façon séquentielle. Cela crée un champ magnétique tournant à la même fréquence que les tensions d'alimentation. L'aimant permanent du rotor cherche à chaque instant à s'orienter dans le sens du champ. Pour que le moteur brushless tourne, les tensions

d'alimentation doivent être adaptées continuellement pour que le champ reste en avance sur la position du rotor, et ainsi créer un couple moteur. [7]

### **I.5.2 Caractéristique du moteur BLDC :**

Il existe deux types de moteurs BLDC :

➤ **Caractéristiques électriques [8] :**

- ❖ sa tension d'alimentation.
- ❖ son courant nominal.
- ❖ sa puissance nominale.
- ❖ le nombre de phases.
- ❖ polarités (nombre de pôles).
- ❖ rapport vitesse/tension

➤ **Caractéristiques mécaniques [8] :**

- ❖ sa vitesse de rotation nominale.
- ❖ son couple nominal.
- ❖ l'inertie du rotor.

### **I.5.3 Application de moteur BLDC :**

Les moteur BLDC trouvent des applications dans beaucoup de secteurs du marché : ils sont largement utilisés dans l'industrie, particulièrement dans les servomécanismes des machines –outils , les graveurs DVD, le moteur de lecteur de disquette d'ordinateur

Une forme simplifiée et populaire de ces technologies est utilisée dans les ventilateurs assurant le refroidissement des micro-ordinateurs et dans ce cas , le stator est a l'intérieur et le rotor est à l'extérieur.

**Exemple d'application de moteur BLDC :**

Automobiles, la commande industrielle,

L'automatisation, l'aviation, la robotique . . . etc. :[10]

➤ DVD / CDROM :



Figure I\_6 : DVD Brushless Moteur

➤ DRONE :



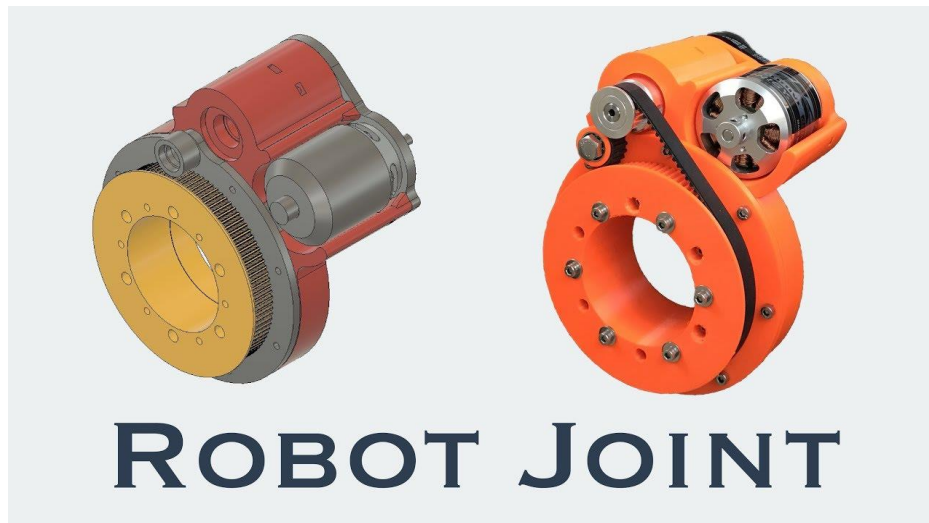
Figure I\_7: DRONE Brushless Moteur

➤ INDUSTRIEL :



Figure I\_8: Moteur Brushless Baldor

➤ **la robotique**



**Figure I\_9: Moteur Brushless robotique**

### **I\_5\_4 Avantages et inconvénients des moteurs BLDC :**

➤ **Avantages :**

Les moteurs BLDC ont beaucoup d'avantages face aux moteurs DC avec balais et face aux moteurs d'induction. Certains de ces avantages sont [9] :

- ❖ Meilleure relation vitesse/couple moteur
- ❖ Meilleure réponse dynamique
- ❖ Meilleure efficacité
- ❖ Plus grande durée de vie
- ❖ Moins bruyant
- ❖ Plus grand éventail de vitesse
- ❖ Moins de perte et moins d'échauffement
- ❖ Pas d'étincelles à cause du collecteur
- ❖ Contrôle de la commutation électronique
- ❖ Moins de bruit acoustique

➤ **Les inconvénients des moteurs BLDC : [9]**

- ❖ Leur coût plus élevé
- ❖ Ils requièrent un contrôle plus complexe
- ❖ Risque de mauvais démarrage ou de décrochages

## **I\_6 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons défini les moteurs électriques, donné leur classification et leurs architectures. Le moteur à courant continu s'est imposé face au moteur à courant alternatif grâce aux avantages multiples qu'il a apportés notamment la facilité de le commander en position, vitesse et couple et avec une grande précision. Néanmoins son inconvénient principal réside dans son système de commutation mécanique balais collecteur qui nécessite une maintenance accrue à cause de son usure. Ce qui a permis l'émergence d'un nouveau type de moteur électrique : le moteur BLDC (Brushless DC Moteur ) sans balais dont la commutation est purement électronique.

Les moteurs à courant continu sans balais sont utilisés depuis plus de cinquante ans. Leur domaine d'application va d'un appareil grand public de petite taille à un système d'automatisation industrielle complexe . Le système de commande entièrement électronique augmente le couple, améliore la régulation de la vitesse à large plage et améliore d'autres caractéristiques du moteur.

# **CHAPITRE II**

## **Modélisation du moteur BLDC**

## II.1 INTROUDUCTION

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 Courant BLDC")

## II.2 Partie Opérative

### II.2.1 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 II.1 : Les Composant d'un moteur BLDC

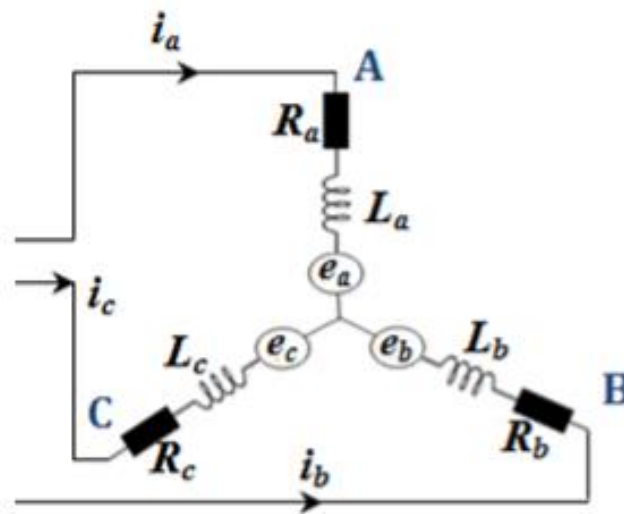
#### II.2.1.1 Stator :

Le stator d'un moteur BLDC se compose de tôles d'acier empilées avec des enroulements placés dans les fentes qui sont découpées axialement le long de la périphérie interne. La

plupart des moteurs BLDC ont trois enroulements de stator connectés en étoile. Chacun de ces enroulements est construit avec de nombreuses bobines interconnectées pour former un enroulement. Une ou plusieurs bobines sont placées dans les fentes et elles sont interconnectées pour faire un enroulement. Chacun de ces enroulements est distribué sur la périphérie du stator pour former un nombre pair de pôles.

Il existe deux types de variantes d'enroulements de stator : moteurs trapézoïdaux et sinusoïdaux. Cette différenciation est faite sur la base de l'interconnexion des bobines dans les enroulements du stator pour donner les différents types de force contre électromotrice. Le moteur trapézoïdal donne une force contre-électromotrice de manière trapézoïdale. Le moteur sinusoïdal donne une force contre-électromotrice de manière sinusoïdale.

La figure (II.2) montre le schéma électrique du stator. Il se compose de trois bobines comprenant chacun trois éléments en série, une inductance, une résistance et une force contreélectromotrice.[11]



**Figure II.2 configuration électrique du stator (trois phases, trois bobines).**

### II.2.1.2 Rotor :

Le rotor est constitué d'aimants permanent et peut varier de deux à huit paires de pôles avec alternance des pôles Nord (N) et Sud (S). Basé sur la densité de champ magnétique requise, on doit choisir le matériau magnétique approprié pour concevoir le rotor. Les aimants en ferrite sont traditionnellement utilisés pour réaliser des aimant permanents. Néodyme (Nd), le samarium cobalt (SmCo) et l'alliage de néodyme, de ferrite et Bore (NdfeB) sont quelques exemples de rares aimants en alliage de terre. La recherche continue

a amélioré la densité du flux et ainsi comprimer le rotor davantage. L'aimant de rotor vient en section transversale différente [12].

- Noyau circulaire avec des aimants à la périphérie.
- Noyau circulaire avec des aimants rectangulaires intégrés dans le rotor
- Noyau circulaire avec des aimants rectangulaires insérés dans le noyau de rotor



Figure II.3 sections transversales de l'aimant du rotor

### II.2.1.3 Paliers :

Ils sont le seul lien mécanique entre le stator et le rotor. La durée de vie de l'ensemble en dépend. Ces roulements à billes permettent d'obtenir une longue durée de vie. Cette durée de vie est également proportionnelle à la vitesse maximale, au déséquilibre résiduel et à la charge appliquée aux paliers créés pour fonctionner des dizaines de milliers d'heures. Les moteurs brushless sont des moteurs à courant continu de haute qualité. Le rotor est fixe et l'aimant permanent tourne dans le champ généré par le bobinage triphasé . [28]



Figure II.4 Paliers

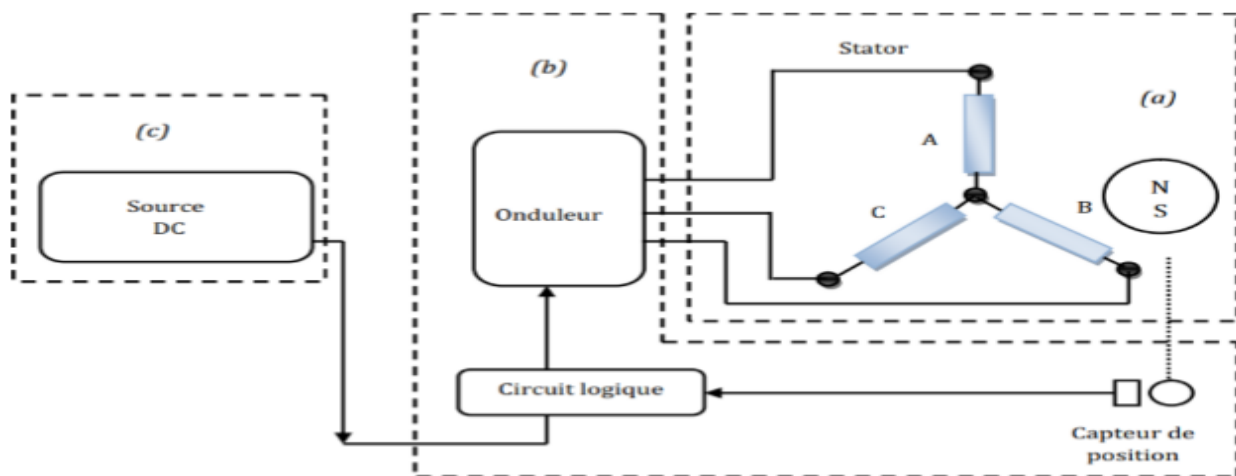
### II.2.2 Constitution du Moteur BLDC :

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. Les parties principales du moteur BLDC, représentées sur **Figure II.5**, sont:

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

Le moteur est alimenté par une source de courant continu à travers une commutation Electronique



**Figure II.5** Parties principales du moteur BLDC : (a)Machine Synchrone, (b) Circuit de commutation électronique, (c)source DC.

### II.2.3 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 II.6) ou au contraire des bobines isolées sur une encoche sur les petits moteurs à bas coût.



**Figure II.6 Bobinages de différents moteurs**

### **II.3 Partie Commande :**

La commande des moteurs BLDC comprend essentiellement, une unité de calcul qui fournit les signaux de commande aux drivers des transistors mosfet de commutation de l'onduleur triphasé alimentant le BLDC. Ces signaux sont générés en synchronisme avec les instants de commutation fournis par les capteurs à effet Hall dans le cas de la commande avec capteurs (Sensored) ou par les instants de passage par zéro des forces contre-électromotrice générés dans les phases du BLDC sans capteurs (sensorless). Ces signaux sont en plus modulés par des PWMs (Pulse Wide Modulation) pour permettre la variation de vitesse du moteur BLDC. Pour cela nous avons utilisé une carte Arduino Uno.

#### **II.3.1 Arduino :**

##### **II.3.1.1 Définition :**

Arduino est un circuit imprimé en matériel libre sur lequel se trouve un microcontrôleur qui peut être programmé pour analyser et produire des signaux électriques, de manière à effectuer des tâches très diverses comme la domotique (le contrôle des appareils domestiques - éclairage, chauffage...), le pilotage d'un robot, etc. C'est une plateforme basée sur une interface entrée/sortie simple. Il était destiné à l'origine principalement mais pas exclusivement à la programmation multimédia interactive en vue de spectacle ou d'animations artistiques. C'est une partie de l'explication de la descendance de son interface de programmation de Processing. Lui-même Inspiré de l'environnement de programmation Wiring.

Arduino peut être utilisé pour construire des objets interactifs indépendants (prototypage rapide), ou bien peut être connecté à un ordinateur pour communiquer avec ses logiciels

(exemple : Macromedia Flash, Processing, Max MSP, Usine Hollyhock, Pure Data, SuperCollider) [13]

### II.3.1.2 Le Type La carte Arduino :

#### ❖ La carte Arduino UNO :

C'est la carte idéale pour découvrir l'environnement ARDUINO. Elle permet à tout débutant De se lancer dans tous ses premiers petits projets. Comme c'est la carte la plus utilisée, il est Très facile de se référer aux tutoriels très nombreux sur le net et ainsi de ne pas rester seul dans son exploration.

Sa simplicité devient par contre un handicap lorsqu'il s'agit de multiplier les périphériques, de manipuler des algorithmes lourds ou d'interagir avec les OS Android pour lesquels d'autres cartes Arduino sont plus adaptées [14]



Figure II.7 : La carte Arduino UNO.

## II.4 Composants électroniques :

### II.4.1 Transistor MOSFET :

Un transistor à effet de champ à grille isolée plus couramment nommé MOSFET (acronyme anglais de metal-oxide-semi conductor field-effect transistor — qui se traduit par transistor à effet de champ à structure métal-oxyde-semi conducteur), est un type de transistor à effet de champ. Comme tous les transistors, le MOSFET module le courant qui le traverse à l'aide d'un signal appliqué sur son électrode nommée grille. Il trouve ses applications dans les circuits intégrés numériques, en particulier avec la technologie CMOS, ainsi que dans l'électronique de puissance .[16]

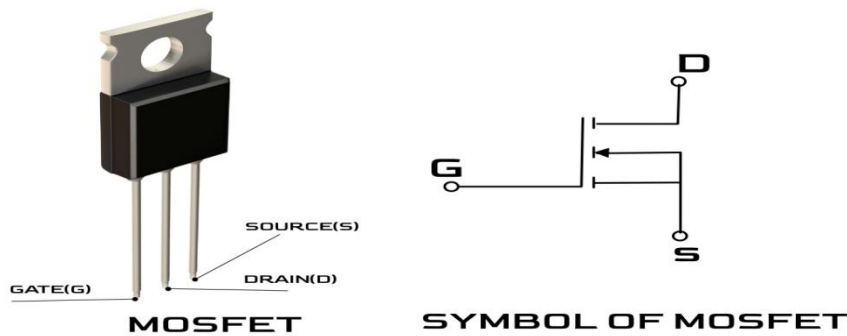
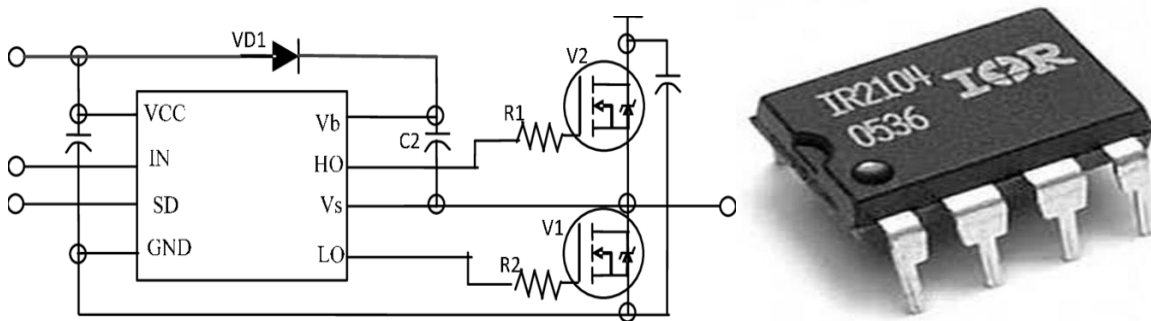


Figure II.8 Transistor MOSFET

**II.4.2 IR2104S :**

Les **IR2104S** sont des pilotes MOSFET et IGBT de puissance haute tension et haute vitesse avec des canaux de sortie référencés côté haut et bas dépendants. Les technologies exclusives HVIC et CMOS à immunité au verrouillage permettent une construction monolithique renforcée. L'entrée logique est compatible avec la sortie standard CMOS ou LSTTL, jusqu'à 3,3 V logique. Les pilotes de sortie disposent d'un étage tampon à courant d'impulsion élevé conçu pour une conduction croisée minimale du pilote. Le canal flottant peut être utilisé pour piloter un MOSFET de puissance à canal N ou un IGBT dans la configuration côté haut qui fonctionne de 10 à 600 volts. [17]



. Figure II.9IR2104S

**II-5 Principe de fonctionnement du moteur BLDC :**

Le moteur brushless fonctionne à partir de trois sources de tensions variables, fournies par un onduleur, et permettant de générer un champ magnétique tournant. Le rotor, généralement équipé d'un aimant permanent, tend à suivre le champ magnétique tournant. La figure **II.13** montre l'architecture du moteur et de son onduleur.

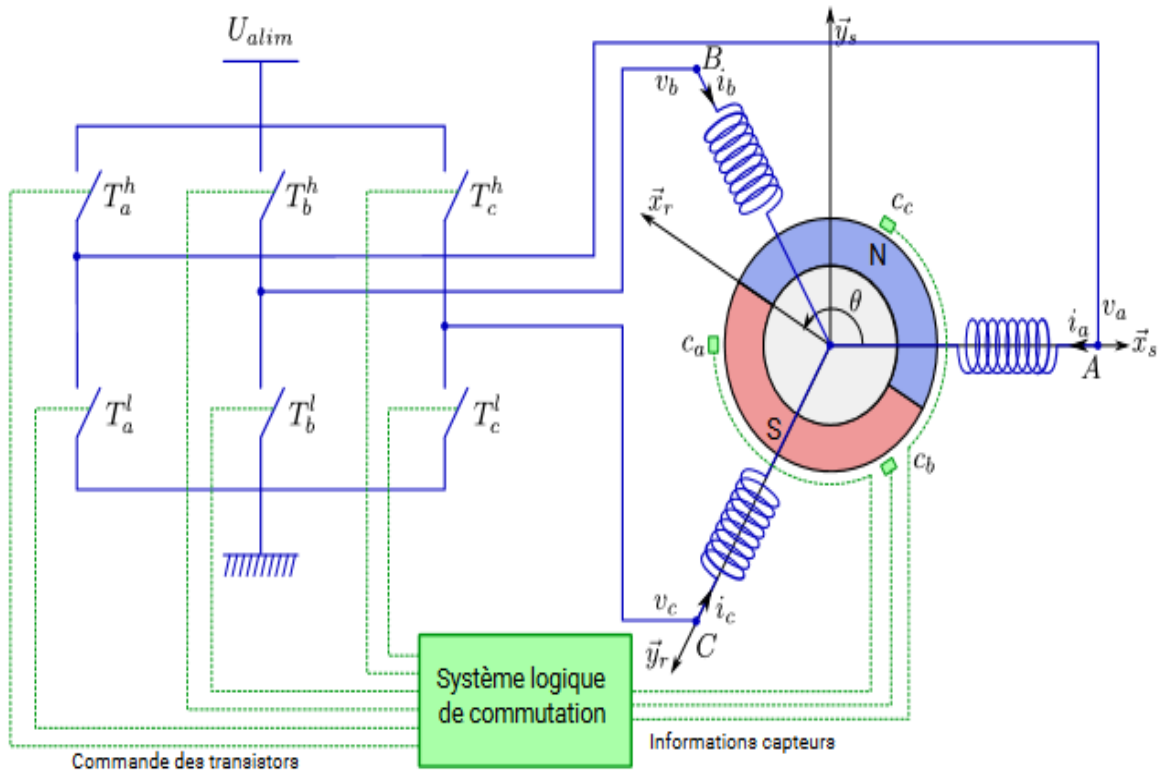


Figure II.13: Fonctionnement de l'onduleur et du moteur brushless

Dans le cas simple du moteur BLDC, à chaque commutation, deux phases sont reliées respectivement à la tension d'alimentation et à la masse, et une phase n'est pas connectée. Prenons l'exemple de la figure II.14, la phase A n'est pas reliée, la phase B est reliée à la tension d'alimentation et la phase C est reliée à la masse. Un courant parcourt les bobines de B vers C et génère un champ magnétique statorique  $\vec{B}$  dans le moteur dirigé suivant  $\vec{y}_s$ . Le rotor supporte un aimant dont le moment magnétique  $\vec{m}$ , orienté du sud vers le nord, tend à s'aligner avec le champ magnétique statorique en tournant dans le sens trigonométrique

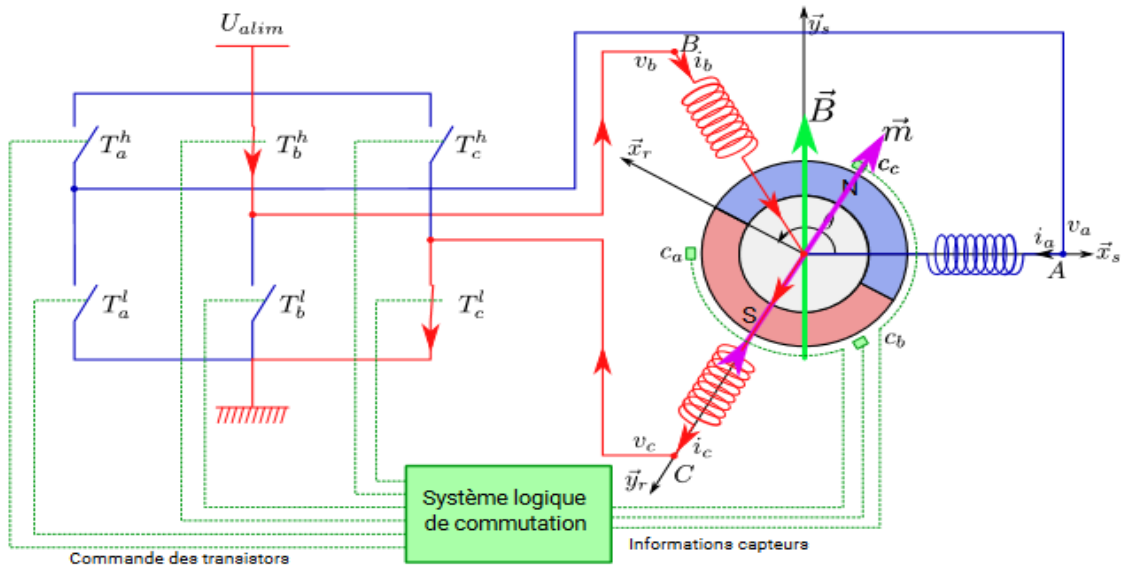


Figure II.14: Exemple de situation de commutation

Dès que le rotor s'approche de  $\vec{y}_s$ , la commutation sera modifiée pour faire circuler le courant de B vers A, le champ magnétique statorique  $\vec{B}$  tourne de  $\pi/6$ , de façon à attirer le rotor et poursuivre la rotation dans le sens trigonométrique. L'angle entre  $\vec{m}$  et  $\vec{B}$  conduit à un couple magnétique  $\vec{C}_m = \vec{m} \wedge \vec{B}$ [21]

## II.6 Modélisation mathématique du Moteur BLDC : [17]

### II.6.1 Les Équations Électrique :

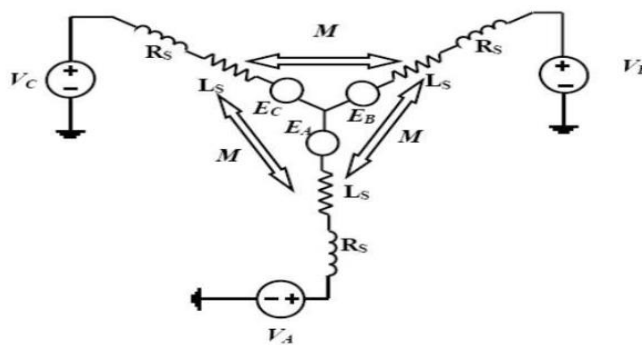


Figure III.15: Modèle électrique simplifié du BLDC

- Modélisation mathématique du moteur à BLDC :

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + M_{ab} \frac{di_b}{dt} + M_{ac} \frac{di_c}{dt} + e_a$$

$$V_b = R_b i_b + L_b \frac{di_b}{dt} + M_{ba} \frac{di_a}{dt} + M_{bc} \frac{di_c}{dt} + e_b$$

$$V_c = R_c i_c + L_c \frac{di_c}{dt} + M_{ca} \frac{di_a}{dt} + M_{cb} \frac{di_b}{dt} + e_c$$

R : Résistance statorique par phase, supposée égale pour toutes les phases .

L : Inductance statorique par phase, supposée égale pour toutes les phases .

M : Inductance mutuelle entre les phases .

$i_a, i_b, i_c$  : Courant stator/phase .

$V_a, V_b, V_c$  : sont les tensions de phase respectives de l'enroulement .

Les inductances propres du stator sont indépendantes de la position du rotor, donc

$$L_a = L_b = L_c = L$$

Et les inductances mutuelles auront la forme :

$$M_{ab} = M_{ac} = M_{ba} = M_{bc} = M_{ca} = M_{cb} = M$$

En supposant un système triphasé équilibré, toutes les résistances de phase sont égales :

$$R_a = R_b = R_c = R$$

Réorganiser les équations ci-dessus :

$$V_a = R i_a + L \frac{di_a}{dt} + M \frac{di_b}{dt} + M \frac{di_c}{dt} + e_a$$

$$V_b = R i_b + L \frac{di_b}{dt} + M \frac{di_a}{dt} + M \frac{di_c}{dt} + e_b$$

$$V_c = R i_c + L \frac{di_c}{dt} + M \frac{di_a}{dt} + M \frac{di_b}{dt} + e_c$$

Négliger l'inductance mutuelle :

$$V_a = R i_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a$$

$$V_b = R i_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b$$

$$V_c = R i_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c$$

### II.6.2 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 :

$$E_p = k_e \omega_r$$

Les formes typiques des FEMs induites et des courants dans les trois phases sont illustrées par la figure III.16:

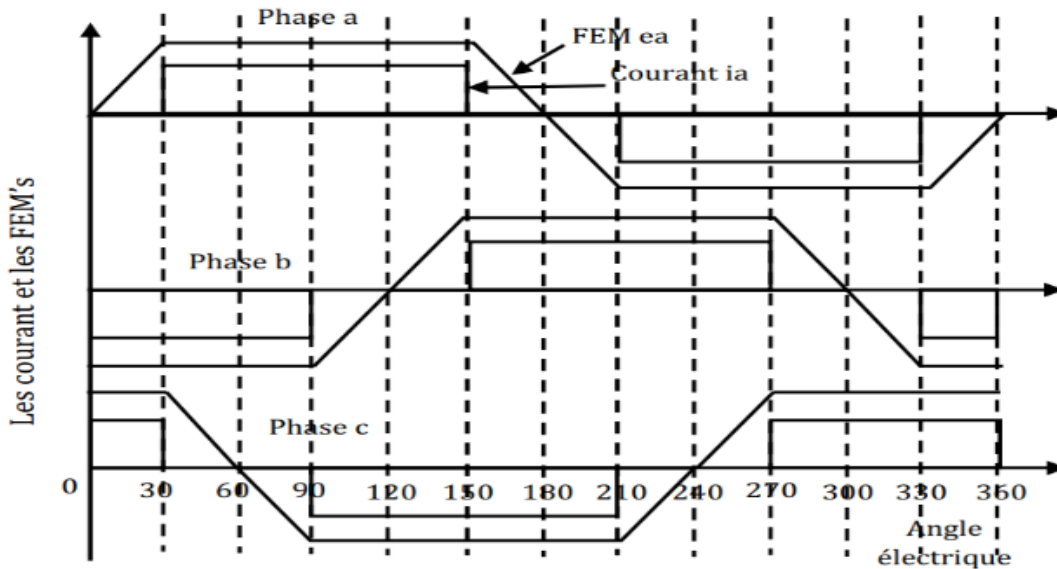


Figure III.16 Formes typiques des courants et des FEM

### II.6.3 L'Équation Mécanique du Mouvement :

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

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = C_e - f\omega_r - C_r$$

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) · s<sup>-1</sup>**

### II.6.4 Couple Électromagnétique :

Le couple électromagnétique développé par le moteur BLDC est donné par

$$C_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_r}$$

### II.6.5 Génération de couple

Le couple est le produit de la constante théorique du moteur «  $K$  » par le courant fourni «  $I$  ». Dans un système unipolaire, le couple utilisable n'est produit que pour 1/3 de la rotation. Pour produire un couple utile tout au long de la rotation du stator, des bobines supplémentaires, ou "phases", sont ajoutées au stator fixe. Le couple développé par chaque phase est le produit de la constante du moteur " $K_e$ " et du courant " $I$ ". La somme des couples vaut :  $T_a + T_b + T_c$

L'hypothèse faite est que toutes les phases ont une symétrie parfaite

$$K_t(\text{moteur}) = K_t(a) = K_t(b) = K_t(c)$$

$$i_{\text{moteur}} = i_a = i_b = i_c$$

À un angle  $e$  donné, le couple appliqué mesuré sur l'arbre du rotor est

$$T_{\text{moteur}} = 2 * K_t(\text{moteur}) * i_{\text{moteur}}$$

La clé d'un contrôle efficace du couple et de la vitesse d'un moteur BLDC est basée sur des équations relativement simples de couple et de force contre-électromotrice, qui sont similaires à celles du moteur à courant continu. Le couple électromagnétique généré est donné par

$$T_e = [e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c] / \omega \text{ (en N.m)}$$

Le couple électromagnétique est également lié à la constante du moteur et au produit du courant avec la position électrique du rotor qui est donnée par :

$$T_e = K_t \{f_a(\theta) i_a + f_b(\theta) i_b + f_c(\theta) i_c\}$$

L'équation du mouvement pour un système simple est :

$$J \cdot (d\omega / dt) + B\omega = T_e - T_I$$

Où :

$T_I$  est le couple de charge,  $J$  est l'inertie du moteur,  $B$  est la constante d'amortissement. La relation entre la vitesse angulaire et la position angulaire (électrique) est donnée par :

$$d\theta / dt = (P/2) * \omega$$

Où,  $P$  est le nombre de pôles,

Le diagramme Simulink basé sur les équations mathématiques décrites ci-dessus est conçu dans MATLAB/SIMULINK comme le montre la figure II.17. Le bloc fonctionnel Matlab dans la figure décrit la fonction contre-électromotrice EMF. Les équations de la fonction EMF arrière doivent être introduites dans "S-Fonction Block" dans Matlab Simulink qui transmet le programme écrit en fichier M à l'espace de travail Matlab.

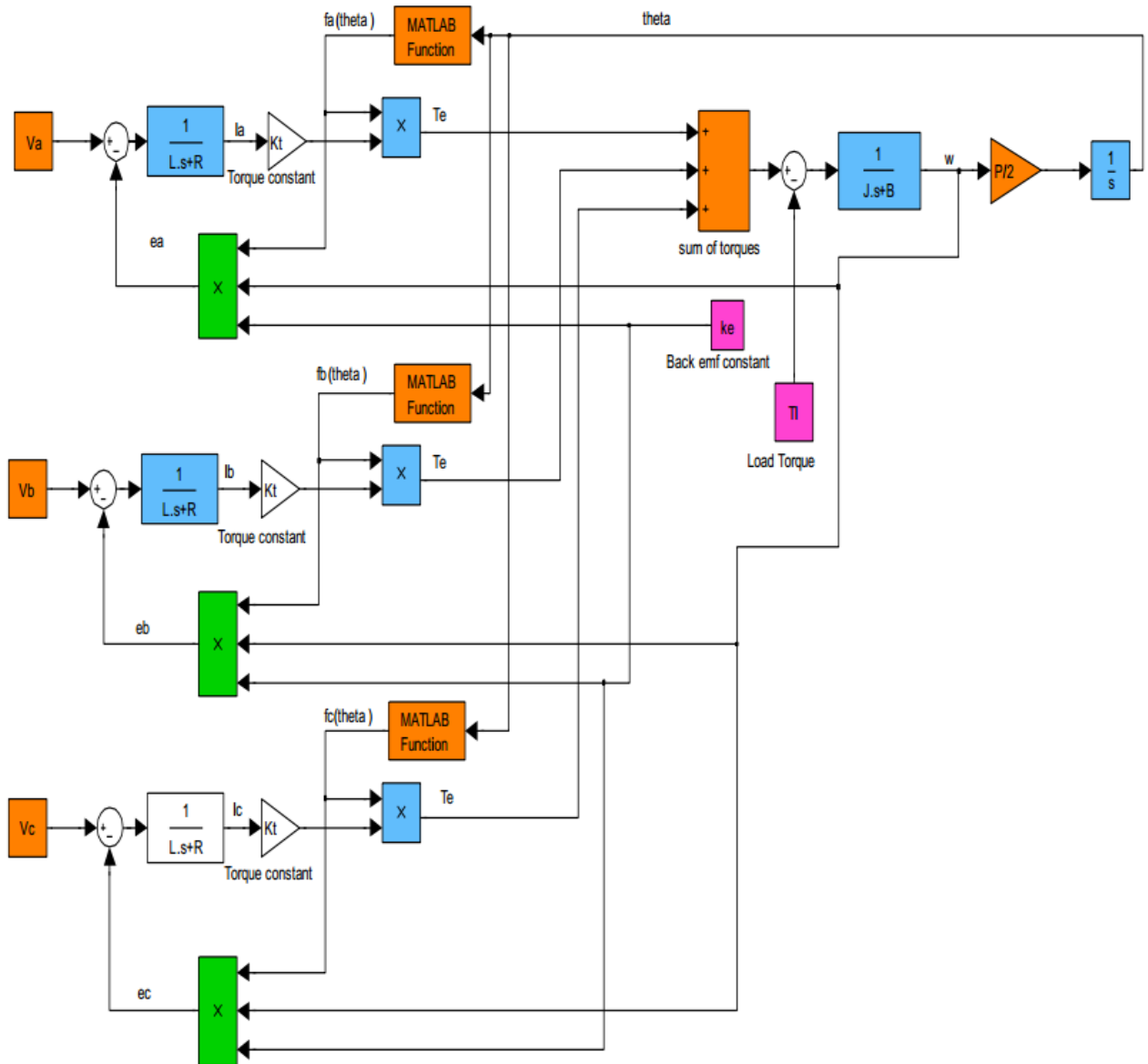


Figure II-17: Schéma block Modèle mathématique représentation du Moteur BLDC

## II.7 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons traité les différents composants du moteur BLDC commandé par ordinateur et alimenté par un onduleur triphasé. Nous avons détaillé le modèle mathématique du moteur BLDC pour pouvoir le simuler sur la plate-forme MATLAB/SIMULINK. Nous avons explicité le processus de commutation des alimentations des phases du moteur qui dépend de la position du champ magnétique rotorique qui tend à s'aligner avec le champ statorique. Dès que l'alignement a lieu la commutation s'effectue le champ statorique tourne de  $\pi/6$ , le processus de commutation se renouvelle donc 6 fois pour un tour complet .

# **CHAPITRE III**

**Simulation et réalisation de  
la commande d'un moteur  
BLDC**

## III.1 INTROUCTION

Le successeur, avec excellence, du moteur CC conventionnel est le moteur BLDC dans de nombreux cas. La caractéristique du moteur DC est conservée par le moteur BLDC, à l'exception des balais et du commutateur. En fait, pour les applications nécessitant une puissance élevée et une fiabilité élevée, le moteur BLDC à haute efficacité est le choix idéal. Il est alimenté par un commutateur électronique. Les moteurs BLDC les plus couramment utilisés trois phases . Ce chapitre est consacré à la simulation de la commande en vitesse moteur BLDC sur la plate-forme Proteus. L'étude est suivie d'une réalisation pratique de cette commande sur un moteur BLDC d'un lecteur DVD. La réalisation comprend deux parties : la partie commande comprenant la carte Arduino et les drivers de l'onduleur et la partie puissance comprenant l'onduleur alimentant le moteur BLDC.

### III.2 La commutation électrique :

Les 3 phases offrent 6 options dans la distribution du courant :

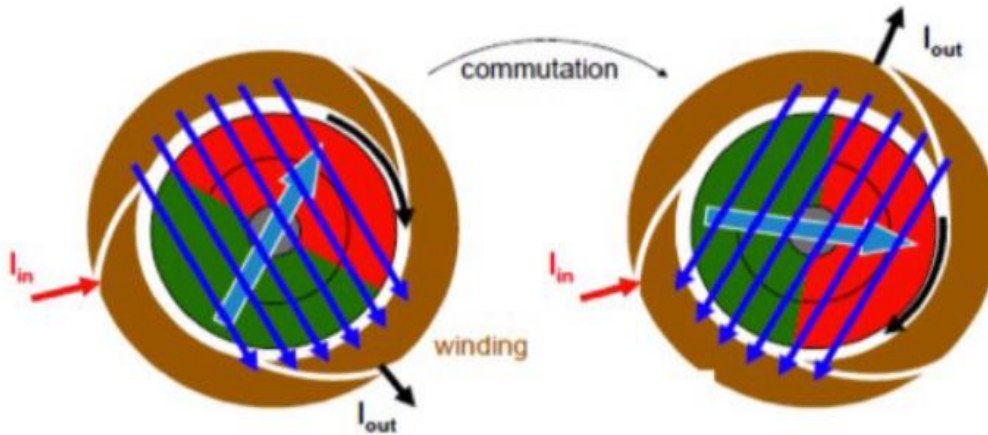


Figure III.1 La commutation

#### III.2.1 La commutation en bloc avec capteurs effet hall :

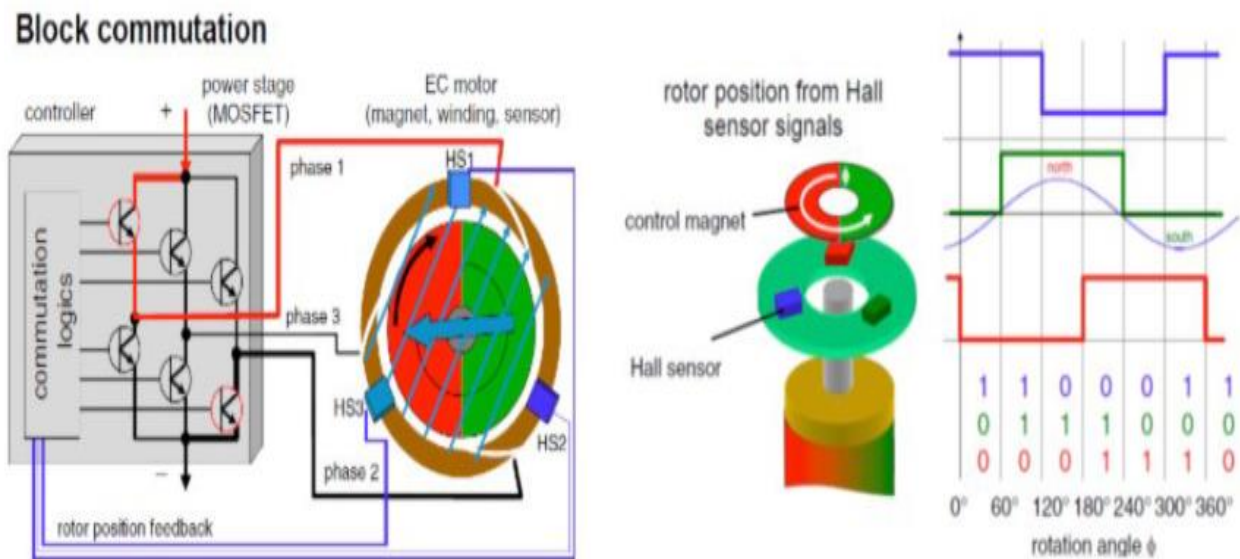
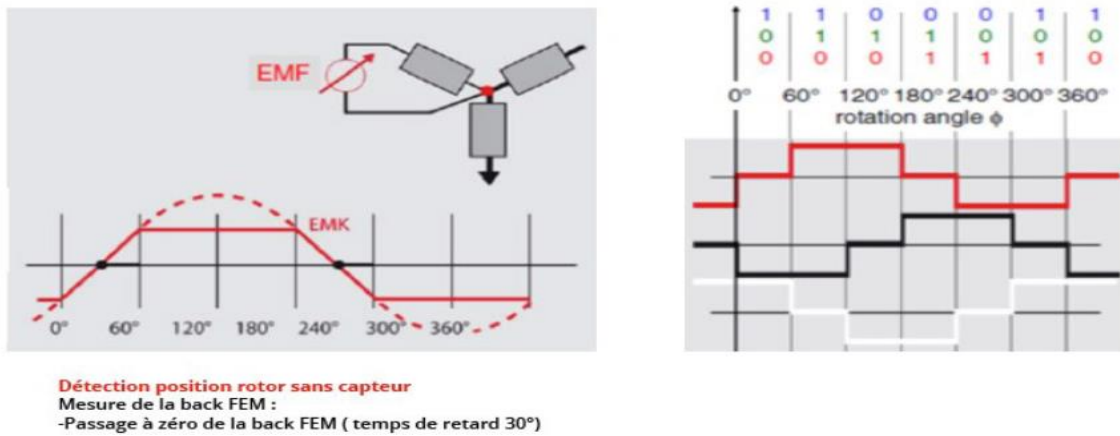


Figure III.2 Commutation en bloc

3 capteurs à effet hall fixés au rotor montrent la position de l'aimant par rapport au bobinage. Ils donnent 6 options de coupure différentes par séquence de commutation. Les 3 phases sont traversées par le courant durant 6 phases distinctes en fonction des informations fournies par les capteurs.

La commutation par bloc présente de nombreux avantages comme un démarrage maîtrisé avec un fort couple, une électronique simple et peu coûteuse ainsi qu'un fort couple d'accélération [13].

**III.2.2 La commutation sans capteur :**



**Figure III.3 Commutation sans capteur**

Le moteur démarre avec une séquence de commutation prédéfinie selon une rampe d'accélération. Ensuite, la tension induite définit la position du rotor. Son passage à 0 est reconnu par l'électronique qui commute le courant du moteur. L'amplitude de cette tension est fonction de la vitesse.

Cette valeur est trop faible pour le passage à 0 ne peut être reconnu pour des vitesses faibles ou l'arrêt. Ce point de passage à 0 est comparé avec le neutre. Pour que le moteur brushless en « triangle » puisse être commuté sans capteurs, un point neutre virtuel est créé par l'électronique dans un schéma en étoile.

La commutation sans capteurs est adaptée pour les applications d'entraînement continu [13]

**III.3. 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 les figure III.2 et III.3 :

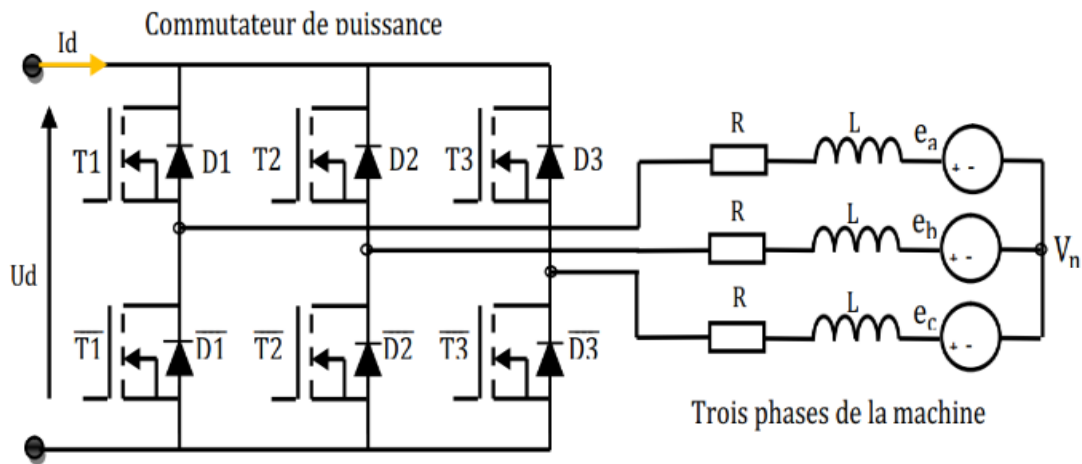


Figure III.4 Ensemble moteur-onduleur

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° électrique

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.5 ci-dessous).

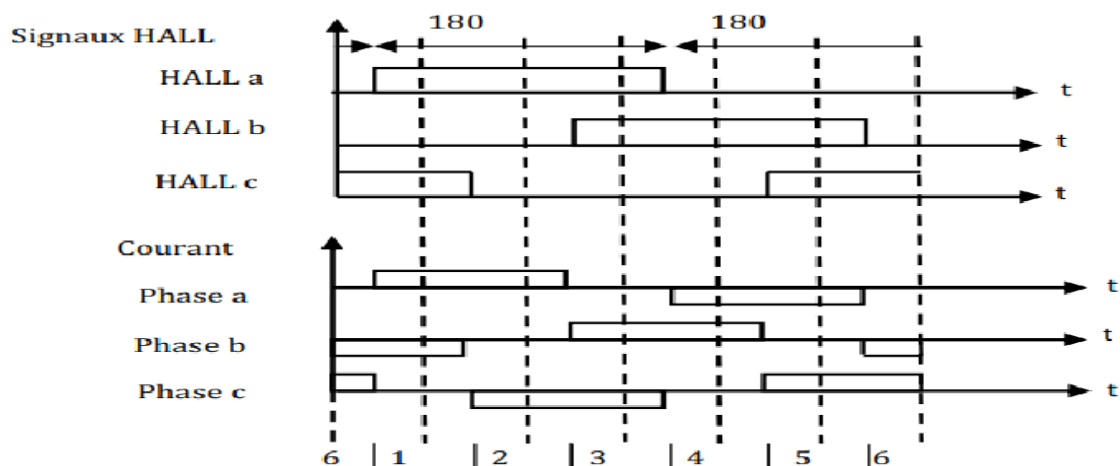


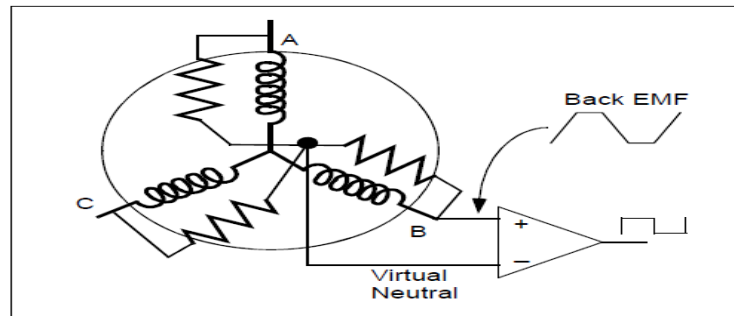
Figure III.5 Signaux à effet hall

### III.4 Détection de l'événement de passage à zéro :

Le moyen le plus simple de détecter les événements de passage à zéro consiste à utiliser des comparateurs. Le comparateur a 3 bornes principales : 2 entrées (positive et négative) et une négative, et logique basse si la tension positive est inférieure à la tension négative.

Fondamentalement, 3 comparateurs sont nécessaires pour ce projet, les connexions sont effectuées comme indiqué dans la figure ci-dessous (exemple pour la phase B).

La sortie du comparateur est logique haute si la tension positive est supérieure à la tension négative, et logique basse si la tension positive est inférieure à la tension négative.



**Figure III.6** Passage à zéro

Le point naturel virtuel est le même pour tous les 3 comparateurs, il est généré à l'aide de 3 résistances. Lorsque la BEMF générée dans l'enroulement flottant (ouvert) traverse le point zéro vers le côté positif, la sortie du comparateur effectue une transition de bas en haut. Lorsque la BEMF générée dans l'enroulement flottant traverse le point zéro vers le côté négatif, la sortie du comparateur effectue une transition de haut en bas. En ayant trois tels circuits comparateurs, un sur chacune des phases donne trois signaux numériques correspondant au signal BEMF dans les enroulements. La combinaison de ces trois signaux est utilisée pour dériver la séquence de commutation.

#### Matériel requis :

- Carte Arduino UNO
- Moteur CC sans balais (BLDC)
- 6 x 06N03LA mosfet de type N (ou équivalent) – fiche technique
- 3 x IC de commande de porte IR2104S (IR2104) - fiche technique
- 6 résistances de 33k ohms
- 3 résistances de 10k ohms
- 6 résistances de 100 ohms
- 3 diodes IN4148
- Condensateur 3x10uF

- 3 condensateurs de 2,2 uF
- 2 x bouton poussoir
- alimentation 12V
- Planche à pain
- Fils de liaison

III.5 Commande de moteur BLDC sans capteur avec circuit Arduino :

Le schéma de circuit du projet est illustré ci-dessous :

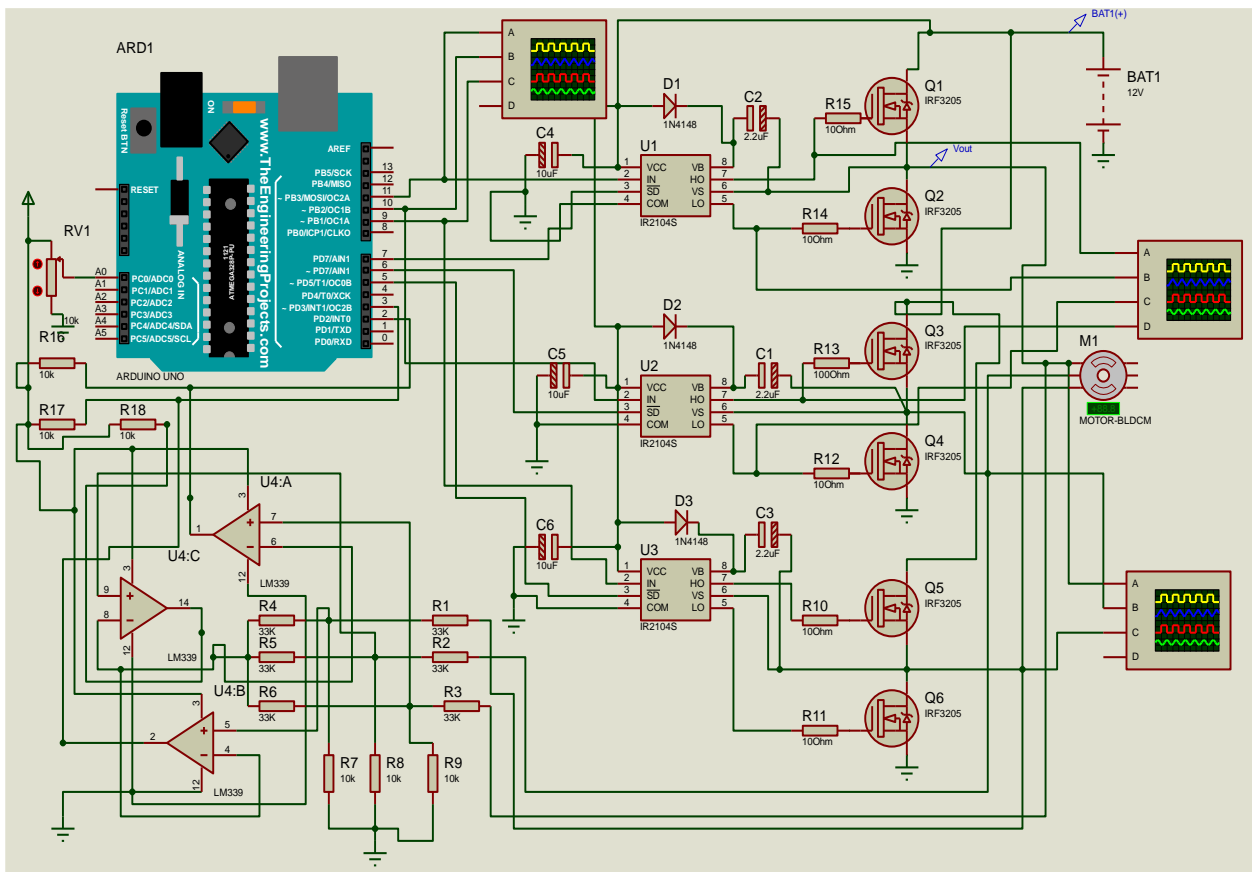


Figure III.7 Le schéma de circuit du projet

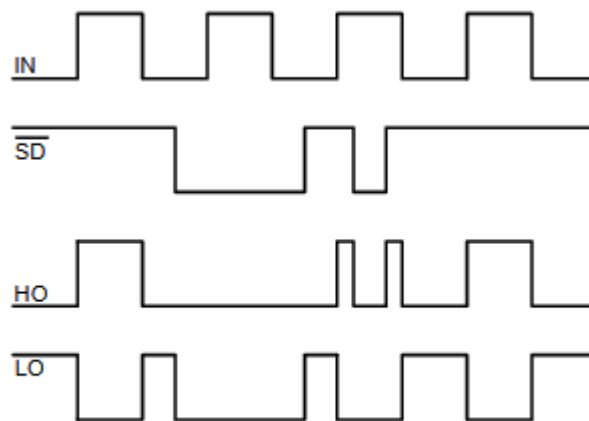
Notez que toutes les bornes mises à la terre sont connectées ensemble.

Dans le circuit, il y a 2 boutons-poussoirs, l'un est utilisé pour augmenter la vitesse du moteur BLDC et le 2ème est utilisé pour la diminuer. Les trois premières résistances de 33k (connectées aux phases du moteur) et les trois résistances de 10k servent de diviseurs de tension, car on ne peut pas

alimenter le microcontrôleur en 12V, les trois autres résistances de 33k génèrent le point naturel virtuel. Le point naturel virtuel est connecté à la broche 6 de l'Arduino.

La carte Arduino UNO est basée sur le microcontrôleur ATmega328P qui possède un comparateur analogique. L'entrée positive de ce comparateur est sur la broche Arduinouno 6 (AIN0) et l'entrée négative peut être la broche 7 (AIN1), A0 (ADC0), A1 (ADC1), A2 (ADC2), A3 (ADC3), A4 (ADC4) ou A5 (ADC5). J'ai donc connecté le point naturel virtuel à la broche positive du comparateur analogique (broche 6), la phase A BEMF à la broche 7 (AIN1), la phase B BEMF à la broche A2 et la phase C BEMF à la broche A3. A chaque fois le comparateur compare le point virtuel avec la BEMF d'une phase (c'est fait dans le logiciel). Cela minimise le matériel nécessaire et simplifie le circuit.

Les puces IR2104S sont utilisées pour contrôler les mosfets haut et bas de chaque phase. La commutation entre le côté haut et le côté bas se fait selon les lignes de commande IN et SD. La figure ci-dessous montre le chronogramme d'entrée et de sortie :



Input/Output Timing Diagram

Figure III.8 le chronogramme d'entrée et de sortie

Les lignes SD des trois IR2104S sont connectées aux broches 11, 10 et 9 respectivement pour la phase A, la phase B et la phase C. L'Arduino UNO peut générer des signaux PWM sur ces broches où seuls les mosfet côté haut sont PWMed.

Commande de moteur BLDC sans capteur avec code Arduino :  
Le code ci-dessous n'utilise aucune bibliothèque de moteur BLDC.

Comme mentionné ci-dessus, les broches Arduino 9, 10 et 11 peuvent générer des signaux PWM où les broches 9 et 10 sont liées au module Timer1 (OC1A et OC1B) et la broche 11 est liée au module Timer2 (OC2A). Les deux modules Timer sont configurés pour générer un signal PWM avec une fréquence d'environ 31KHz et une résolution de 8 bits. Les rapports cycliques des signaux PWM sont

mis à jour lors de l'appui sur un bouton poussoir (accélération ou décélération) en écrivant dans leurs registres (OCR1A, OCR1B et OCR2A).

Le comparateur analogique compare l'entrée positive AIN0 (broche Arduino 6) avec l'entrée négative qui peut être AIN1 (broche 7), ADC2 (broche A2) ou ADC3 (broche A3). Lorsque la tension de broche positive est supérieure à la tension de broche négative, la sortie du comparateur analogique ACO est définie, et lorsque la tension de broche positive est inférieure à la tension de broche négative, ACO est effacé.

### **III.6 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons expliqué comment obtenir les instants de commutation des alimentations des phases du moteurs BLDC pour les cas avec et sans capteurs. Nous avons ensuite simulé sur la plate-forme Proteus la commande de moteur BLDC sans capteur. Les résultats obtenus montrent que le moteur tourne lentement pour de faibles valeurs du potentiomètre et la vitesse augmente lorsque la valeur du potentiomètre augmente. Nous avons ensuite procédé à la réalisation pratique de cette commande sur un moteur BLDC d'un lecteur DVD. Les résultats obtenus indiquent que la commande nécessite quelques réglages mineurs pour sa mise au point final.

# **CHAPITRE IV**

**Simulation sur  
MATLAB/SIMULINK d'un  
contrôleur PID de moteur  
BLDC**

### IV. INTROUCTION

Pour commander un Vitesse moteur BLDC , on utilise la commande PID (Proportionnelle-Intégrale-Dérivée) qui est la méthode de régulation la plus répandue en industrie. Grâce aux trois actions qui composent cette commande, qui peuvent être utilisées soit combinées soit indépendamment les unes des autres .

#### CONTRÔLE DES POSITIONS :

##### Présentation :

Dans la plupart des processus industriels tels que l'électricité, la mécanique, la construction, l'industrie pétrolière, sidérurgie, secteurs énergétiques, chantiers de développement, industrie papetière, l'industrie des boissons le besoin d'une productivité plus élevée impose de nouvelles exigences sur des mécanismes liés à des moteurs électriques. Ils conduisent à différents problèmes dans le fonctionnement en raison de la dynamique rapide et de l'instabilité. C'est pourquoi le contrôle est nécessaire par des systèmes pour atteindre la stabilité et travailler sur les objectifs fixés souhaités. Le contrôle de position des moteurs électriques est le plus important en raison de divers effets non linéaires comme la charge et perturbation qui affecte le moteur de s'écarter de son fonctionnement normal. Le contrôle du moteur doit être largement mis en œuvre dans l'automatisation des machines.

La position du moteur est la rotation de l'arbre du moteur ou le degré de rotation qui doit être contrôlé en donnant le retour au contrôleur qui rectifie la sortie contrôlée pour atteindre la position souhaitée. L'application comprend des robots (chacun articulation dans un robot nécessite un servo de position), machines à commande numérique par ordinateur (CNC), et les imprimantes laser.

La caractéristique commune à tous ces systèmes est que La variable à contrôler (généralement la position ou la vitesse) est renvoyée pour modifier la commandes signal. Le moteur BLDC utilise une alimentation en courant continu commutée sur la phase du stator en roulements du moteur par des dispositifs de puissance, la séquence de commutation étant déterminée à partir du positionnement des rotors. Le courant de phase du moteur BLDC, de forme typiquement rectangulaire, est synchronisé avec la force contre-électromotrice pour produire un couple constant à une vitesse constante. Le commutateur mécanique du moteur à courant continu à balais est remplacé par des commutateurs électroniques, qui fournit du courant aux enroulements du moteur en fonction de la position du rotor.

Pour contrôler la position de l'arbre du moteur, la stratégie la plus simple consiste à utiliser un contrôleur avec gain K. La figure VI.1 montre le contrôle de position du moteur PMBLDC dans lequel la vitesse angulaire de sortie du moteur est intégrée pour obtenir la position réelle du moteur. La sortie est un retour vers l'entrée et le signal d'erreur qui est la différence entre le point de consigne et la position réelle du moteur agissent comme signal de commande pour le régulateur PID.

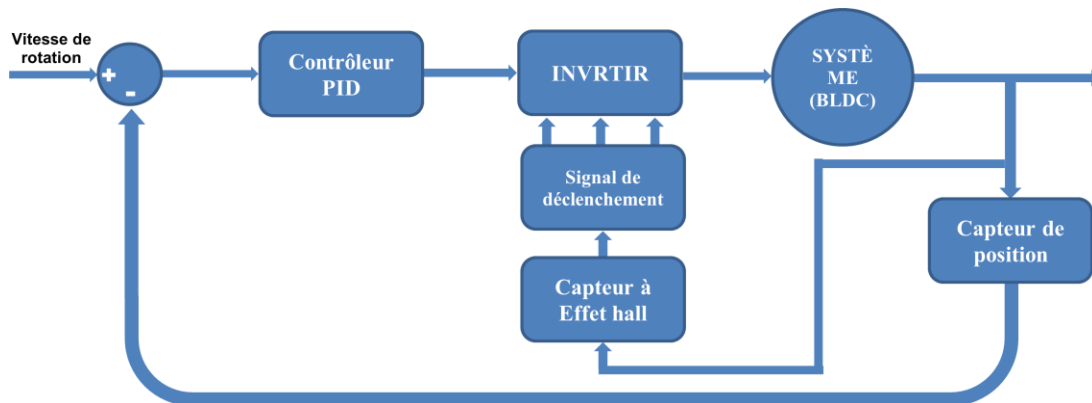


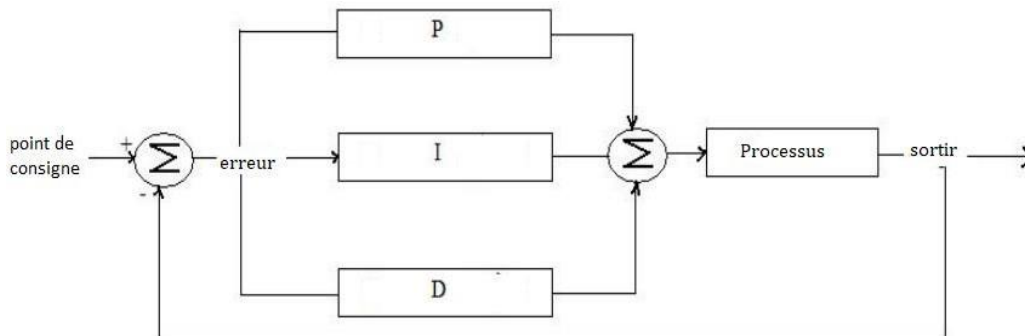
Figure VI.1 : Contrôle de position et vitesse du moteur PMBLDC

### VI.2.2 Contrôleur PID

Un régulateur proportionnel-intégral-dérivatif (régulateur PID) est une boucle de contrôle

Mécanisme (contrôleur) largement utilisé dans les systèmes de contrôle industriels, Le PID est le contrôleur de rétroaction le plus couramment utilisé. Un régulateur PID calcule une valeur "d'erreur" comme différence entre une variable de procédé mesurée et un point de consigne souhaité. Le contrôleur cherche à minimiser l'erreur en ajustant les entrées de contrôle de processus. Le contrôleur PID le calcul (algorithme) implique trois paramètres constants distincts, et est donc parfois appelé contrôle à trois termes : les valeurs proportionnelles, intégrales et dérivées, notés P, I et D respectivement. Ces valeurs peuvent être interprétées en termes de temps : P prend en compte l'erreur actuelle, I de l'accumulation des erreurs passées et D est une prédiction des erreurs futures, sur la base du taux de changement actuel. La somme pondérée de ces trois actions est utilisée pour ajuster le processus. En réglant les trois paramètres dans l'algorithme du contrôleur PID, le contrôleur peut fournir une action de contrôle conçue pour des exigences de processus spécifiques. La réponse du contrôleur peut être décrite en termes de réactivité du contrôleur à une erreur, le degré auquel le contrôleur dépasse le point de consigne et le degré d'oscillation du système. Notez que l'utilisation de l'algorithme PID pour le contrôle ne garantit un contrôle optimal du système ou la stabilité du système. Le contrôle PID est très utile méthode utilisée dans les systèmes de

contrôle à rétroaction. L'erreur générée après la comparaison entre le signal mesuré et le signal cible est proportionnellement multiplié (proportionnel), intégré (intégral) et différencié (dérivé) et les sorties des trois opérateurs sont sommés linéairement pour générer le signal appliqué à l'actionneur.



**Figure VI.2 : Schéma fonctionnel de base du contrôleur PID**

Certaines applications peuvent nécessiter l'utilisation d'une ou deux actions seulement pour fournir le contrôle du système. Ceci est réalisé en mettant les autres paramètres à zéro. Un contrôleur PID sera appelé régulateur PI, PD, P ou I en l'absence des actions de régulation respectives. Les contrôleurs PI sont assez courants, car l'action dérivée est sensible au bruit, alors que l'absence d'un terme intégral peut empêcher le système d'atteindre sa valeur cible due à l'action de contrôle.

### **Théorie du contrôleur PID**

Le schéma de contrôle PID est nommé d'après ses trois termes correcteurs, dont la somme constitue la variable manipulée (MV). Les termes proportionnel, intégral et dérivé sont sommés pour calculer la sortie du contrôleur PID. Définition de  $u(t)$  comme la commande, la forme finale de l'algorithme PID est :

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{d}{dt} e(t)$$

Où :

$k_p$  : Gain proportionnel, un paramètre de réglage

$k_i$  : Gain intégral, un paramètre de réglage

$k_d$  : gain dérivé, un paramètre de réglage

$e$  : erreur = SP – PV

$t$ : Time or instantaneous time (the present)

### **Terme proportionnel :**

Le terme proportionnel apporte un changement à la sortie qui est proportionnel à la valeur de l'erreur. La réponse proportionnelle peut être ajustée en multipliant l'erreur par une constante  $K_P$  appelée gain proportionnel. Le terme proportionnel est donné par :

$$P_{out} = k_p e(t)$$

Un gain proportionnel élevé entraîne une variation importante de la sortie pour une variation donnée de l'erreur. Si le gain proportionnel est trop élevé, le système peut devenir instable. En revanche, un petit gain entraîne une petite réponse de sortie à une grande erreur d'entrée, et une sortie moins sensible à l'erreur. Si le gain proportionnel est trop faible, l'action de contrôle peut être trop faible pour répondre aux perturbations du système. Théorie du réglage et pratique industrielle indiquent que le terme proportionnel devrait contribuer à l'essentiel de la variation de la production.

### **Terme intégral :**

La contribution du terme intégral est proportionnelle à la fois à l'amplitude de l'erreur et la durée de l'erreur. L'intégrale dans un régulateur PID est la somme des erreurs instantanées dans le temps et donne le décalage cumulé qui aurait dû être corrigé précédemment. L'erreur accumulée est ensuite multipliée par le gain intégral ( $K_i$ ) et ajouté à la sortie du contrôleur. Le terme intégral est donné par

$$I_{out} = k_i \int_0^t e(t) dt$$

Le terme intégral accélère le mouvement du processus vers le point de consigne et élimine l'erreur résiduelle en régime permanent qui se produit avec un contrôleur proportionnel pur. Cependant, puisque le terme intégral répond aux erreurs accumulées du passé, il peut provoquer un dépassement de la valeur actuelle par rapport à la valeur du point de consigne.

### Terme dérivé :

La dérivée de l'erreur de processus est calculée en déterminant la pente de l'erreur surtemps et en multipliant ce taux de variation par le gain dérivé  $K_d$ . L'ampleur de la contribution du terme dérivé à l'action de contrôle globale est appelée la dérivée gagner,  $K_d$ . Le terme dérivé est donné par :

$$D_{out} = K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

Le terme dérivé ralentit le taux de variation de la sortie du contrôleur. Contrôle dérivé est utilisé pour réduire l'amplitude du dépassement produit par la composante intégrale et améliorer la stabilité combinée contrôleur-processus. Cependant, le terme dérivé ralentit la réponse transitoire du contrôleur. De plus, la différenciation d'un signal amplifie le bruit et donc ce terme dans le contrôleur est très sensible au bruit dans le terme d'erreur, et peut rendre un processus instable si le bruit et le gain dérivé sont suffisamment grand. Par conséquent, une approximation d'un différenciateur avec une bande passante limitée est plus couramment utilisé. Un tel circuit est connu sous le nom de compensateur d'avance de phase.

### Réglage de boucle

Le réglage d'une boucle de contrôle est le réglage de ses paramètres de contrôle (gain/bande proportionnelle, gain intégral/réinitialisation, gain/taux dérivé) aux valeurs optimales pour obtenir la réponse désirée. La stabilité (oscillation bornée) est une exigence de base, mais au-delà, différents systèmes ont un comportement différent, différentes applications ont un comportement différentes exigences et les exigences peuvent entrer en conflit les unes avec les autres. Certains processus ont un degré de non-linéarité et donc les paramètres qui fonctionnent bien dans des conditions de pleine charge ne travaille lorsque le processus démarre à vide ; cela peut être corrigé par le gain planification (utilisant différents paramètres dans différentes régions d'exploitation). Régulateurs PID fournissent souvent un contrôle acceptable en utilisant les réglages par défaut, mais les performances peuvent généralement être amélioré par un réglage minutieux, et les performances peuvent être inacceptables avec un réglage médiocre. PID le réglage est un problème difficile, même s'il n'y a que trois paramètres et en principe est simple à décrire, car il doit répondre à des critères complexes dans les limites de Contrôle PID. Il existe donc différentes méthodes de réglage de boucle, et plus en core les techniques sophistiquées font l'objet de brevets

; cette section décrit certaines méthodes manuelles pour le réglage de la boucle. Si les paramètres du régulateur PID (les gains des termes proportionnels, intégraux et dérivés) sont choisis de manière incorrecte, le processus contrôlé par l'entrée peut être instable, c'est-à-dire que sa sortie diverge, avec ou sans oscillation, et est limitée uniquement par saturation ou rupture mécanique. L'instabilité est causée par un gain excessif, en particulier en présence d'un décalage important. Généralement, la stabilité de la réponse est requise et le processus ne doit pas osciller pour toute combinaison de conditions de processus et de réglage points, même si parfois une stabilité marginale (oscillation bornée) est acceptable ou voulue.

Le comportement optimal lors d'un changement de procédé ou d'un changement de point de consigne varie en fonction de l'application. Deux exigences de base sont la réglementation (rejet des perturbations - rester à un point de consigne donné) et le suivi des commandes (mise en œuvre des changements de point de consigne) - ceux-ci se réfèrent à dans quelle mesure la variable contrôlée suit la valeur souhaitée. Critères spécifiques de la commande, le suivi comprend le temps de montée et le temps de stabilisation. Certains processus ne doivent pas permettre un dépassement de la variable de procédé au-delà du point de consigne si, par exemple, cela serait dangereux. Autre les processus doivent minimiser l'énergie dépensée pour atteindre un nouveau point de consigne. Il y a plusieurs méthodes pour régler une boucle PID. Les méthodes les plus efficaces impliquent généralement le développement d'une certaine forme de modèle de processus, puis en choisissant P, I et D en fonction des paramètres du modèle dynamique. Les méthodes de réglage manuel peuvent être relativement inefficaces, en particulier si les boucles ont des temps de réponse de l'ordre de quelques minutes ou plus. Le choix de la méthode dépendra en grande partie de la possibilité ou non de mettre la boucle "hors ligne" pour le réglage et le temps de réponse du système. Si le système peut être mis hors ligne, la meilleure méthode de réglage consiste souvent à soumettre le système à un changement progressif d'entrée, mesurer la sortie en fonction du temps et utiliser cette réponse pour déterminer la Paramètres de contrôle.

### **Réglage manuel :**

Si le système doit rester en ligne, une méthode de réglage consiste à définir d'abord les valeurs  $K_i$  et  $K_d$  sur zéro. Augmentez le  $K_p$  jusqu'à ce que la sortie de la boucle oscille, puis le  $K_p$  doit être réglé sur environ la moitié de cette valeur pour une réponse de type "décroissance d'un quart d'amplitude". Alors augmenter  $K_i$  jusqu'à ce que tout décalage soit correct dans un délai suffisant pour le processus. Cependant, aussi beaucoup de  $K_i$  causera de l'instabilité. Enfin, augmentez  $K_d$ , si nécessaire, jusqu'à ce que la boucle soit suffisamment rapide pour atteindre sa référence après

une perturbation de la charge. Cependant, trop de  $K_d$  entraînera une réponse excessive et un dépassement. Un réglage de boucle PID rapide dépasse généralement légèrement pour atteindre le point de consigne plus rapidement ; cependant, certains systèmes ne peuvent pas accepter dépassement, auquel cas un système en boucle fermée sur-amorti est nécessaire, ce qui nécessitent un réglage  $K_p$  nettement inférieur à la moitié de celui du réglage  $K_p$  provoquant une oscillation.

Effets de l'augmentation indépendante des paramètres :

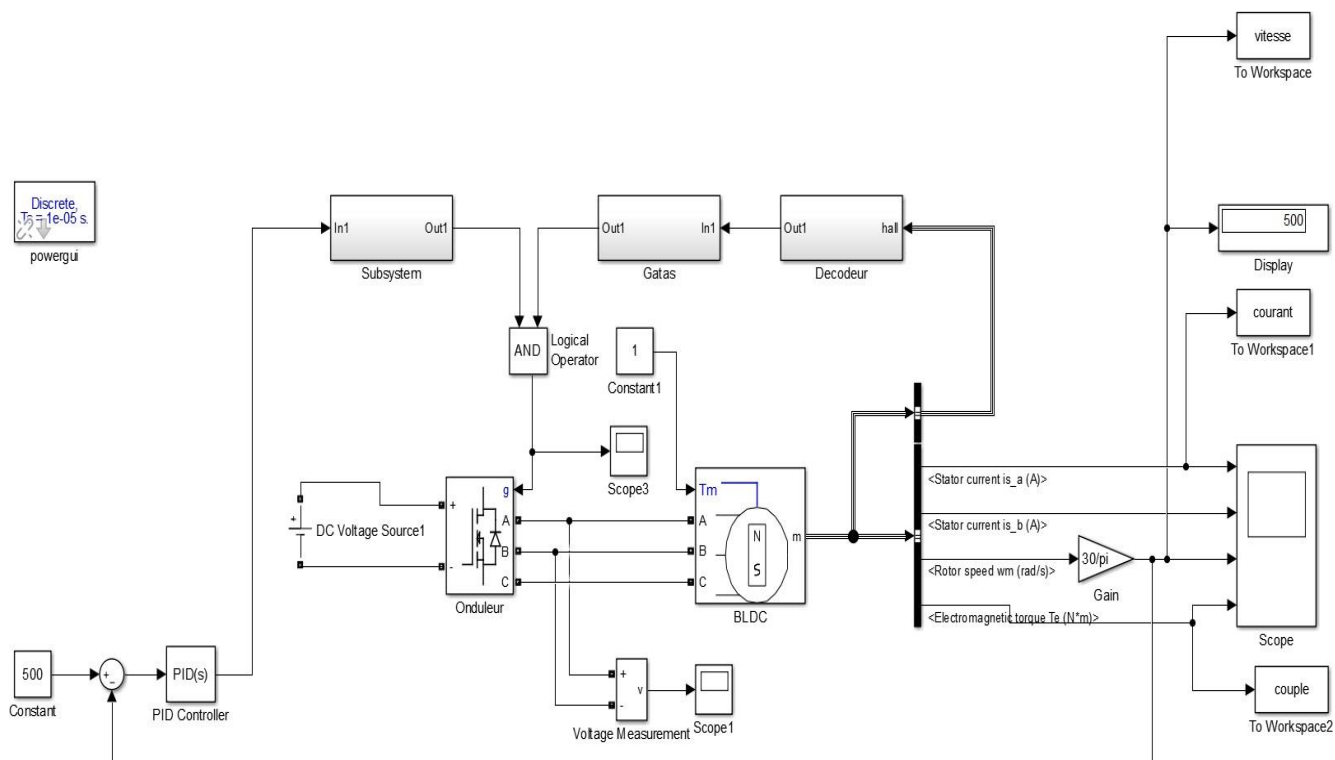
Parametre $r$	Temps de montée	Dépasser	Temps de prise	Erreur d'état stable	La stabilité
$k_p$	Diminuer	Augment er	Petite monnaie	Diminuer	Dégrade r
$k_i$	Diminuer	Augment er	Augmenter	Diminuer significativement	Dégrade r
$K_D$	Mineure diminuer	Mineure diminuer	Mineure diminuer	Aucun effet dans théorie	Améliorer si  Kd est petit

**Modèle Simulink de contrôle de position du moteur BLDC :**

La figure VI . 3 : a ci-dessous montre le contrôle de position du moteur BLDC avec contrôleur PID qui est réglé manuellement pour obtenir la position de rotor souhaitée. Les valeurs PID utilisées servent à calculer la moyenne du courant qui alimente l'onduleur.

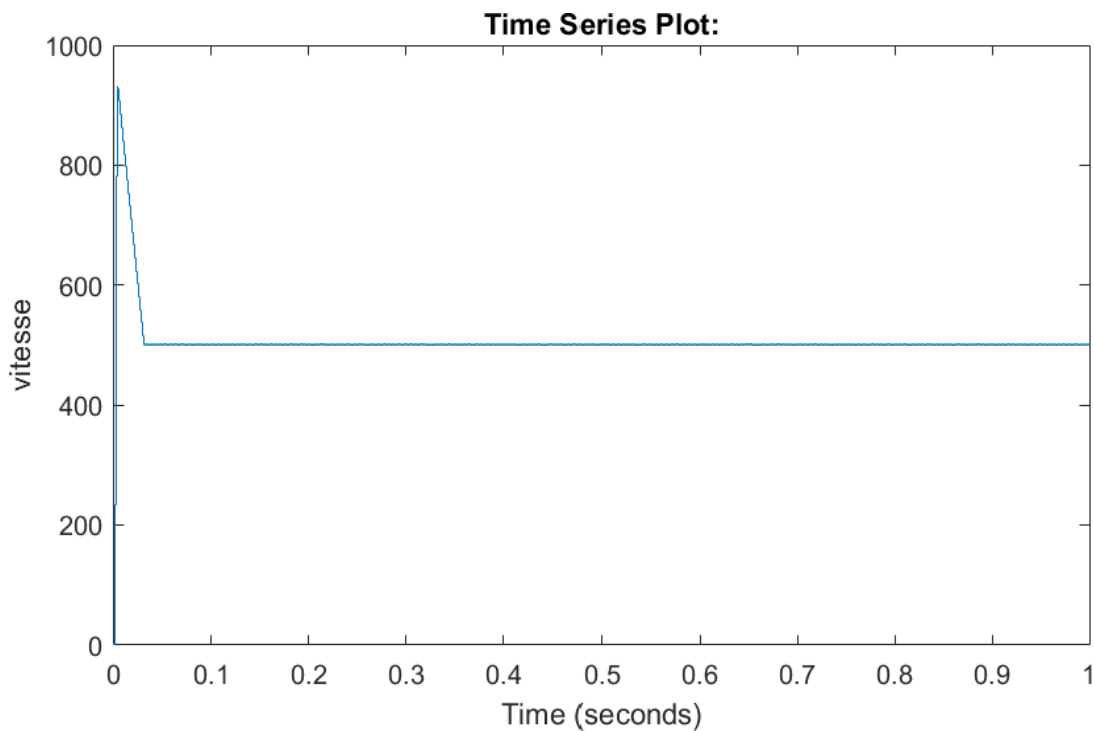
La valeur à laquelle la position est obtenue à

$$K_p=0.199 K_i=0,001 \text{ et } K_d=0.0000001$$



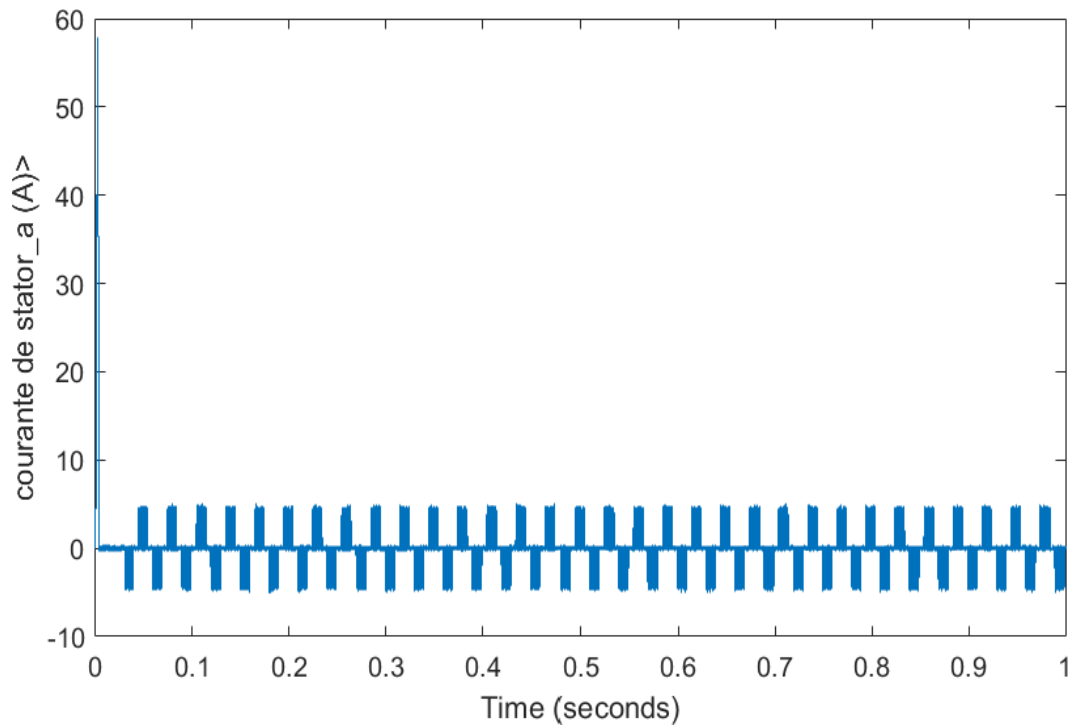
**Figure VI.3 moteur BLDC avec contrôleur PID**

**Résulta de Simulation :**



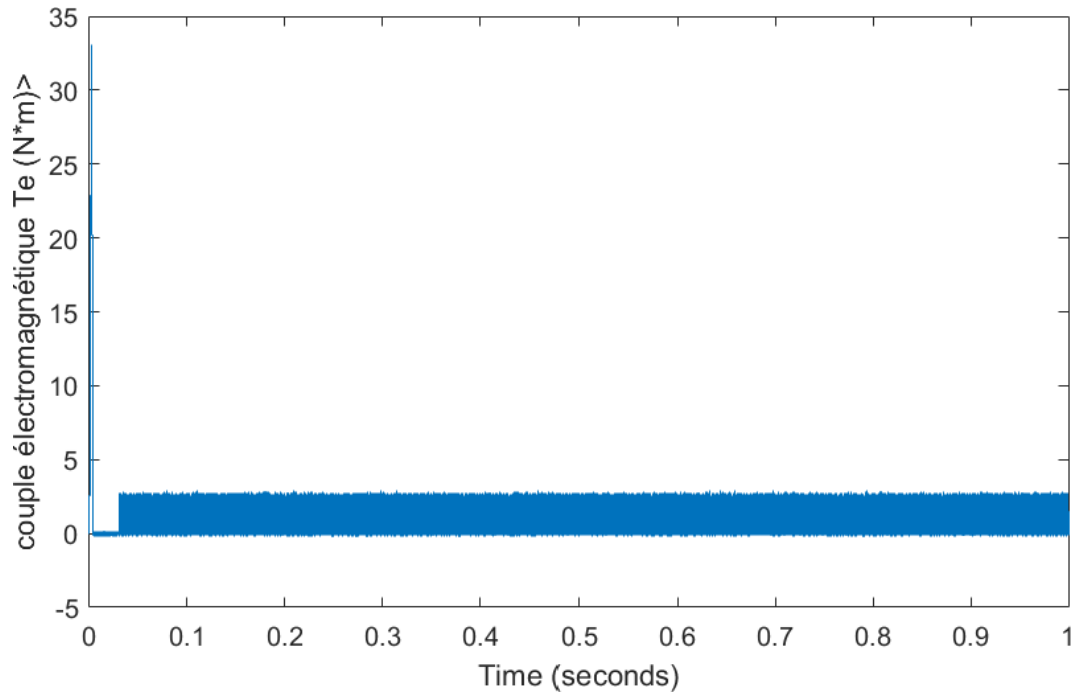
**Figure VI.4 la vitesse du moteur BLDC**

La figure ci-dessus montre que la vitesse du moteur BLDC monte à un pic 950 tours/mn au démarrage à  $t = 0s$  et ensuite descend rapidement à la vitesse de consigne 500 tours/mn à  $t = 0.025s$ . Ceci est dû à l'action du contrôleur PID qui réduit le transitoire en imposant un temps de réponse réduit de la réponse du système.



**Figure VI.5 Courante de Stator (A)**

Le schéma ci-dessus montre que les courants statoriques sont conformes aux commutations du bloc décodeur, car il alterne entre les états où le courant est nul puis négatif puis positif.





**Figure VI.6 Couple de Moteur BLDC**

On remarque que le couple électromagnétique atteint une forte valeur au démarrage de 33  $N \cdot m$  puis redescend à zéro puis continue avec des oscillations relativement de faible amplitude. Ce qui nécessite une autre boucle de régulation du couple électromagnétique.

## **IV.4 Conclusion :**

Nous constatons que d'après les résultats de simulation que le régulateur PID agit bien pour asservir la vitesse à la valeur de la consigne. Cependant il a été constaté des oscillations gênantes au niveau du couple électromagnétique. Ceci montre la limitation du régulateur PID pour ce type de moteur qui a la particularité d'être simple. Il faut envisager une autre commande plus élaboré tel que la commande vectorielle à flux orienté qui permet de stabilité la quasi-totalité des paramètres du moteur BLDC. Cependant celle-ci nécessite beaucoup de calcul et par conséquent nécessite un processeur puissant tel qu'un DSP pour son implémentation.



**Conclusion  
Générale**

## Conclusion Général

---

Les moteurs à courant continu sans balais présentent des avantages significatifs par rapport à leurs concurrents, tels que les moteurs à balais, principalement en raison de la commutation électronique. Il permet au contrôleur de commuter rapidement le courant et ainsi de réguler efficacement les caractéristiques du moteur. Dans cette étude, nous avons examiné les particularités d'un moteur à courant continu sans balais (BLDC). Nous avons présenté son architecture et ses principes de fonctionnement ainsi que les caractéristiques de conception de son module de commande.

L'histoire du premier moteur brushless DC (BLDC) remonte à 1962. La mise en place de ce nouveau type de moteur électrique a été rendue possible grâce à un interrupteur à transistor inventé peu de temps auparavant. L'utilisation de l'électronique au lieu d'un commutateur mécanique à balais était une percée dans le domaine de l'électrotechnique à cette époque.

Les moteurs BLDC ont trouvé une large application dans diverses industries - des disques durs informatiques aux transports électriques et aux robots industriels. Dans certains domaines, ils ont presque évincé les moteurs CC à balais (BDC). La haute performance et la durabilité sont parmi les principaux avantages d'un moteur à courant continu sans balais. Néanmoins, il ne dépassera guère complètement les moteurs BDC car il s'agit toujours d'une solution coûteuse avec une construction et un système de contrôle complexes. Un contrôleur de moteur BLDC nécessite un module de commutation électronique qui permet de piloter l'onduleur alimentant les phases de ce dernier.

Dans ce projet nous avons modélisé le moteur BLDC en vue de le simuler sur la plate-forme MATLAB/SIMULINK. Nous avons conçu une commande à base d'un calculateur Arduino et l'avons simulé sur la plate-forme Proteus. Les résultats obtenus ont été concluants, ce qui nous a permis de passer à sa réalisation. Enfin nous avons simulé un contrôleur PID et montré que ce dernier agit bien pour la régulation de la vitesse, mais le couple électromagnétique nécessite une autre boucle de régulation car il présente des oscillations un peu gênantes. Nous proposons comme perspectives d'implanter un régulateur plus élaboré tel que la commande vectorielle à flux orienté sur un processeur DSP.

# BIBLIOGRAPHIQUE

---

## **BIBLIOGRAPHIQUE:**

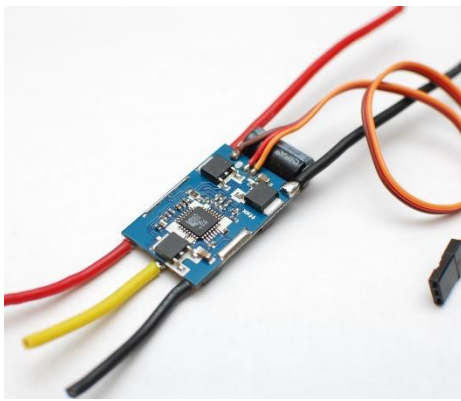
1. <https://junior.universalis.fr/encyclopedie/moteur-electrique/>
2. [https://fr.wikidia.org/wiki/Moteur %C3%A9lectrique](https://fr.wikidia.org/wiki/Moteur_%C3%A9lectrique)
3. <https://harmonicdrive.de/fr/glossaire/moteur-dc>
4. <https://www.techno-science.net/definition/182.html>
5. <https://fr.farnell.com/motor-control-permanent-magnet-sync-motor-pmsm-technology?ICID=I-CT-TP-BROWSE-4>
6. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur\\_sans\\_balais](https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_sans_balais)
7. <http://www.moteurindustrie.com/brushless/technique.html>
8. [http://jacob.patrick.free.fr/moteurs/co/brushless\\_web/co/caracteristiques.html](http://jacob.patrick.free.fr/moteurs/co/brushless_web/co/caracteristiques.html)
9. [https://www.masteringenieros.com/wp-content/uploads/2019/03/Motor\\_fr.pdf](https://www.masteringenieros.com/wp-content/uploads/2019/03/Motor_fr.pdf)
10. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00885a.pdf>
11. « MahdZeshanHaider, « Position Control of Permanent Magnet Brushless Dc Motor using PID Controller »Thèse de Master, Department of Electrical & Instrumentation Engineering, Thapar University, juin-2001.»
12. T. KENJO, S. NAGAMORI: « Permanent-Magnet and Brushless DC Motors ».Ecole Normale Supérieure. Oxford. 1985
13. M. DUMONT [/09/04/2020 .00:00pm], Définitions  
[https://www.academia.edu/39339945/Les\\_diff%C3%A9rents\\_type\\_dArduino](https://www.academia.edu/39339945/Les_diff%C3%A9rents_type_dArduino)
14. <http://blewando.fr/elv/Promo2018/th14/pag6.html>
15. <https://lab4sys.com/fr/le-logiciel-arduino/>
16. [https://sitelec.org/download.php?filename=cours/mdp/brushless.pdf\(10/05/2022\)](https://sitelec.org/download.php?filename=cours/mdp/brushless.pdf(10/05/2022))  
Technologie Brushless (BDLC) pdf
17. <https://matlabpourtous.com/formation/lesson/modelisation-du-moteur-brushless/>

### Contrôler un moteur Brushless :

Les **moteurs Brushless** sont de plus en plus fréquemment utilisés en raison de leurs performances nettement supérieures à celles des moteurs à courant continu « classiques ».

Mais contrairement à ces derniers, leur commande est plus complexe, étant donné qu'il s'agit de **moteurs synchrones** : il faut générer 3 signaux de fréquence multiple de la fréquence de rotation .

### Utilisation d'un ESC :



C'est la méthode la plus simple, car un **ESC** (Electronic Speed Control) est un circuit électronique dédié au contrôle de moteurs électriques.

Ils possèdent un **microcontrôleur** (parfois paramétrable), un **circuit de puissance** (régulation, pont en H, ...) et dans le cas des moteurs brushless, un **dispositif d'acquisition**. Ils permettent de gérer :

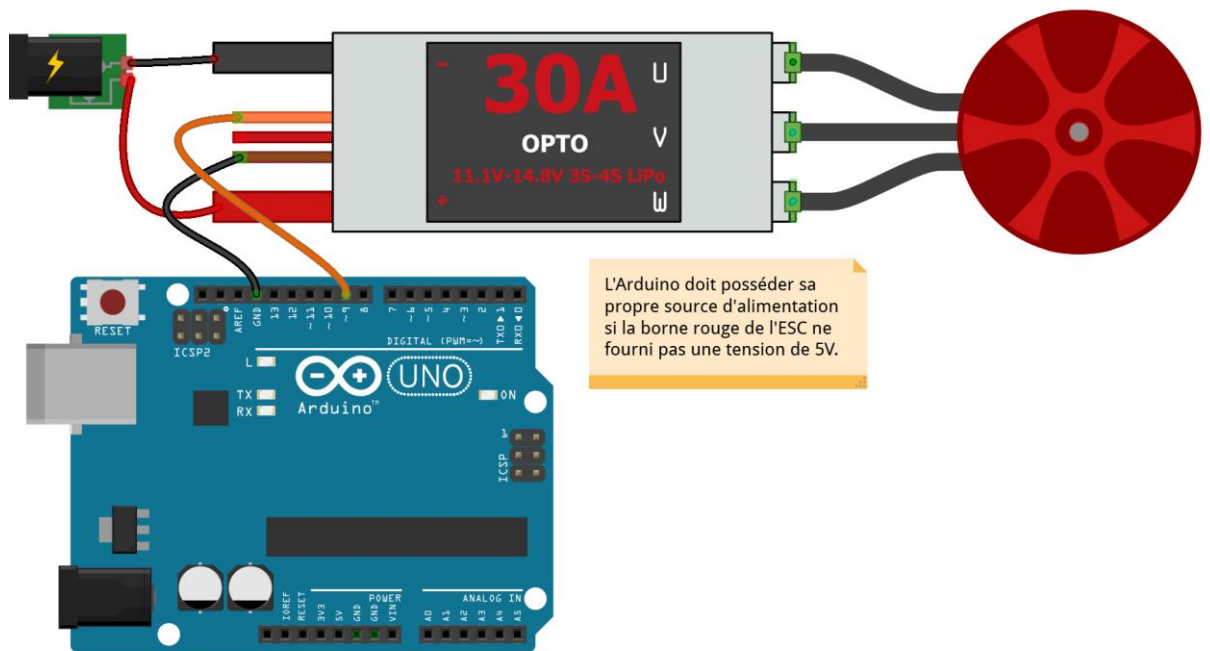
- la vitesse angulaire
- la direction
- le freinage

Ils sont couramment utilisés dans les systèmes radio-commandés et par conséquent possèdent une interface de commande de type

### Câblage :

Les ESC possèdent une interface de commande de type servomoteur à 3 fils (voir contrôle d'un servomoteur). Les deux fils d'alimentation (noir/marron et rouge) sont sensés être utiliser pour alimenter les autres composant reliés au même système, généralement reliés au même récepteur d'une radiocommande.

Le connecteur rouge de l'ESC ne doit être connecté au 5V de l'Arduino que si la tension fournie par l'ESC est compatible avec ce dernier ! (souvent, les ESC fournissent 3.3V seulement : un Arduino UNO devra par conséquent posséder sa propre source d'énergie)



## Programmation :

```
#include<Servo.h>
```

```
Servo esc;// Création de l'objet permettant le contrôle de l'ESC
```

```
int val = 0; //
```

```
voidsetup(){
```

```
esc.attach(9); // On attache l'ESC au port numérique 9 (port PWM obligatoire)
```

```
delay(15);
```

```
Serial.begin(9600);
```

```
// Initialisation de l'ESC
```

```
// (certains ESC ont besoin d'une "procédure d'initialisation"
```

```
// pour devenir opérationnels - voir notice)
```

```
esc.write(0);
```

```
delay(1000);
```

```
esc.write(180);
```

```
delay(1000);
```

```
esc.write(0);
```

```
// Quelques informations pour l'utilisateur
```

```
Serial.println("Saisir un nombre entre 0 et 179");
```

```
Serial.println("(0 = arrêt - 179 = vitesse maxi");
```

```
Serial.println(" démarrage partir de 20");
```

```
}
```

```
voidloop(){
```

```
if(Serial.available()> 0){
```

```
val = Serial.parseInt(); // lecture de la valeur passée par le port série
```

```
Serial.println(val);
```

```
esc.write(val); //
```

```
delay(15);
```

```
}
```

```
}
```