



MEMOIRE

DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN

Electrotechnique industrielle

THEME

**Modélisation et commande d'un moteur
brushless – Application aux véhicules
électrique**

Présenté par le binôme :

- Fares Yahya
- Daani Akram

Devant le jury :

- | | | |
|---------------------|------------|------------------|
| - Mr. Soufi Youcef | Professeur | Président |
| - Mr. Metatla Samir | MCB | Encadreur |
| -Mr. Boukadoum Aziz | MCA | Examineur |

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Résumé:

Les moteurs CC sans balais à aimant permanent rivalisent désormais avec de nombreux autres types de moteurs dans les applications industrielles mondiales. Cependant, pour les applications de faible à moyenne puissance, les moteurs CC sans balais sont souvent le premier choix en raison de leurs avantages. Il était nécessaire d'améliorer les performances du moteur à courant continu sans balais, en contrôlant sa vitesse et son couple. Les travaux de recherches ont proposé des modèles avec leurs contrôles dans le but de se rapprocher de la réalité à travers des programmes de simulations. Ce mémoire présente une simulation d'un moteur à courant continu sans balais et le contrôle de sa vitesse par un régulateur PI fractionnaire. Le problème était l'ajustement des gains : proportionnel et intégral et lambda. Parmi les solutions, à cette problématique c'est l'algorithme PSO (Particle Swarm Optimization).

ملخص :

تتنافس الآن محركات التيار المستمر بدون فرش ذات المغناطيس الدائم مع العديد من أنواع المحركات الأخرى في التطبيقات الصناعية العالمية. ومع ذلك، بالنسبة لتطبيقات الطاقة المنخفضة إلى المتوسطة، غالبًا ما تكون محركات التيار المستمر بدون فرش هي الخيار الأول نظرًا لمزاياها. كان من الضروري تحسين أداء محرك التيار المستمر بدون فرش، من خلال التحكم في سرعته وعزم دورانه. واقترح العمل البحثي نماذج مع ضوابطها بهدف الاقتراب من الواقع من خلال برامج المحاكاة. تقدم هذه الأطروحة محاكاة لمحرك تيار مباشر بدون فرش والتحكم في سرعته بواسطة منظم PI الجزئي وكانت المشكلة هي تعديل المكاسب: التناسبي والتكاملي و λ . ومن بين الحلول لهذه المشكلة خوارزمية PSO. (تحسين سرب الجسيمات).

Abstract :

Permanent magnet brushless DC motors now compete with many other motor types in global industrial applications. However, for low to medium power applications, brushless DC motors are often the first choice due to their advantages. It was necessary to improve the performance of the brushless DC motor, by controlling its speed and torque. The research work proposed models with their controls with the aim of getting closer to reality through simulation programs. This thesis presents a simulation of a brushless direct current motor and the control of its speed by a fractional PI regulator. The problem was the adjustment of the gains: proportional and integral and lambda. Among the solutions, to this problem it is PSO algorithm (Particle Swarm Optimization).

REMERCIEMENTS

Nous remercions, en premier lieu, ALLAH qui nous a donné la force et la patience
pour terminer ce travail.

Nous tenons à remercier profondément notre encadrant "**M. Metatla Samir**" pour le temps qu'il nous a consacré et nous a hébergés Il nous a donné confiance dans la mise en œuvre du sujet qui nous était présenté, pour sa patience et ses encouragements, nous exprimons notre profonde gratitude et notre grand respect.

Nos plus sincères et profonds remerciements à messieurs les membres du jury pour avoir accepté de faire partie de la commission d'examineur et de juger notre travail.

Nous remercions tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à notre étude et à l'élaboration de ce mémoire

Nous remercions tout le staff d'enseignants qui a participé à notre étude tout au long de notre cursus.

DEDICASES

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

Et Je dédie ce mémoire à mes parents en particulier,
mon cher père qui est une source d'inspiration infinie.

À ma chère maman qui m'a beaucoup aidée pendant mes études.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon
Respect, ma considération et mes profonds
Sentiments envers eux.

A tous les membres de ma famille petits et grands

A mes meilleurs amis les plus fous que j'ai connus

A tous les professeurs qui ont contribué à mes études et qui m'ont
accompagné durant mon cursus de l'enseignement supérieur je les remercie pour
leur sens du partage et leurs conseils si précieux qui ont pu influencer le succès
de ma formation.

Enfin, je me remercie pour tous ces efforts.

Fares yahya

DEDICASES

First and foremost, I would like to dedicate this work to myself, above all, for being strong and dedicated and not giving up in the hardest times.

***To my beloved mother,** who has always been my anchor and ray of hope, and never doubted me or my potential, and without whom I wouldn't be who I am today. I hope you will be able to witness all of my successes, for they will all be dedicated to you, always.*

***To my beloved father,** who has always been a great listener and supporter. I wouldn't have gone through half the challenges if it weren't for his guidance and love. May you always be my side at the most critical points in my life, for I only have the courage to make big decisions when you are with me.*

To my siblings** who I love so much, my brothers, my sister **Nour el houda

To my partnerrrrrr

Daani Akram

Liste des figures

Chapitre I

Figure I. 1 : Différentes structures du rotor à aimant permanent	3
Figure I. 2 : moteur sans balais.....	4
Figure I. 3 : Structure du moteur BLDC.....	5
Figure I. 4 : Stator et rotor d'un moteur BLDC	6
Figure I. 5 : Disposition du capteur à effet hall.....	7
Figure I. 6 : moteur brushless outrunner.....	10
Figure I. 7 : Moteur brushless inrunner.	10
Figure I. 8 : Moteurs brushless disque.....	11

Chapitre II

Figure II. 1 : Fonctionnement de l'onduleur et du moteur brushless.....	12
Figure II. 2 : Exemple de situation de commutation.	13
Figure II. 3 : Modèle équivalent du moteur BLDC.....	14
Figure II. 4 : Ensemble de changement de vitesse du moteur	17
Figure II. 5 : Schéma de l'onduleur IGBT-Diode Sur SimPowerSystems	18
Figure II. 6 : Symbole de l'onduleur IGBT-Diode disponible sur Matlab-SimPowerSystems.	18
Figure II. 7 : Organigramme de la logique de commande 120° de l'onduleur.	19
Figure II. 8 : Schéma de l'onduleur triphasé.....	20
Figure II. 9 : Schéma de la simulation d'un model du moteur BLDC	23
Figure II. 10 : Evolution de la vitesse.....	23
Figure II. 11 : Evolution du couple.	24
Figure II. 12 : Evolution du courant.	24
Figure II. 13 : Evolution de la tension.	25

Chapitre III

Figure III. 1 : Schéma de régulation PI	27
Figure III. 2 : Schéma fonctionnel d'un régulateur P	27
Figure III. 3 : Exemple de réalisation électronique du régulateur P	28

Figure III. 4 : Régulateur I.....	29
Figure III. 5 : Exemple de réalisation électronique du régulateur I.....	30
Figure III. 6 : régulateur PI.....	30
Figure III. 7 : Structure en série du régulateur PI	31
Figure III. 8 : Structure en parallèle du régulateur PI	31
Figure III. 9 : Exemple de réalisation électronique du régulateur PI.....	31
Figure III. 10 : Possibilités des correcteurs à trois actions	34
Figure III. 11 : Schéma fonctionnel d'un régulateur PI λ	35
Figure III. 12 : Organigramme de l'algorithme de PSO utilisé.	39

Chapitre IV

Figure IV. 1 : Transmission mécanique dans les véhicules électriques : (a) Un seul moteur avec boîte de vitesses ; (b) Un seul moteur avec réducteur de vitesse ; (c) Entraînement multimoteur avec réducteur ; (d) Entraînement multimoteur direct.	41
Figure IV. 2 : Circuit équivalent d'un hacheur BUCK-BOOST	43
Figure IV. 3 : Opération de calcul l'erreur pour chaque itération.....	45
Figure IV. 4 : Schéma de la simulation d'un modèle du moteur BLDC avec PSO	45
Figure IV. 5 : Comparaison de la vitesse du moteur. (a) Vitesse mesuré avec régulateur FOPI ; (b) Vitesse mesuré avec régulateur PI.....	46
Figure IV. 6 : Comparaison de couple du moteur. (a) Couple mesuré avec régulateur FOPI ; (b) Couple mesuré avec régulateur PI.....	46
Figure IV. 7 : Comparaison de la tension du moteur. (a) Couple mesuré avec régulateur FOPI ;(b) Couple mesuré avec régulateur PI	47
Figure IV. 8 : Comparaison de courant du moteur. (a) Courant mesuré avec régulateur FOPI ;(b) Courant mesuré avec régulateur PI.....	47

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II.1 : Signaux du capteur et états des interrupteurs (rotation dans le sens horaire)...	19
Tableau II.2 : Séquence de commutation en utilisant les signaux des capteurs à effet Hall...	22
Tableau II.3 : Paramètre du moteur BLDC.....	22

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Paramètre du moteur BLDC.....	44
Tableau IV.2 : Paramètre de PSO	44

Sommaire

Abstract	I
Remerciements	II
Dédicace	III
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VII
Introduction générale	A

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE MOTEUR BRUSHLESS (BLDC)

I.1	Introduction	1
I.2	Rappels Theorique Sur Les Machines Synchrones	1
I.3	Origine Du Moteur Sans Balais.....	1
I.4	Avantages Et Inconvenients De BLDC	2
I.4.1	Les Avantages Des Moteurs Sans Balais (Brushless).....	2
I.4.2	Inconvénients Des Moteurs Sans Balais (Brushless)	2
I.5	Moteur Synchrone A Aimant Permanent (Brushless)	3
I.6	Description D'un Brushless Dc Moteur.....	3
I.7	Structure Du Moteur A Courant Continu Sans Balais (BLDC)	4
I.7.1	Le Stator	5
I.7.2	Le Rotor.....	6
I.7.3	Paliers	6
I.7.4	Capteur A Effet Hall (Hall Sensors)	6
I.8	Applications Des Moteurs BLDC.....	7
I.8.1	Les Moteurs BLDC Dans L'automobile	7
I.8.2	Moteur BLDC Dans L'industrie	8
I.8.3	Moteur BLDC Dans L'aérospatiale	8
I.8.4	Moteur BLDC En Bureautique	9
I.9	Differents Types Des Moteurs Brushless.....	9

I.9.1	Moteurs Brushless Outrunner	9
I.9.2	Moteurs Brushless Inrunner.....	10
I.9.3	Moteurs Brushless Disques.....	11
I.10	Conclusion.....	11

CHAPITRE II : LA MODELISATION ET SIMULATION DU MOTEUR BLDC

II.1	Introduction	12
II.2	Principe De Fonctionnement Du Moteur BLDC.....	12
II.3	Modelisation Mathematique Du Moteur (BLDC)	14
II.3.1	Modèle Electrique.....	14
II.3.2	Modèle Mécanique	15
II.4	Modélisation De L'alimentation Du Moteur BLDC	17
II.4.1	Modèle De L'onduleur.....	17
II.4.2	Logique De Commande De L'onduleur	18
II.4.3	Modèle Mathématique De L'onduleur De Tension.....	20
II.5	Sequence De Commutation Du Capteur A Effet Hall Et Du Transistor	21
II.6	Simulation Du Moteur BLDC	22
II.7	Conclusion.....	25

CHAPITRE III : DIMENSIONNEMENT DES REGULATEURS

III.1	Introduction	26
III.2	Le Principe De Controle De Vitesse Des Moteurs BLDC	26
III.3	Le Controleur PI	27
III.3.1	Régulateur à Action Proportionnelle (P).....	27
III.3.2	Régulateur à Action Intégrale (I).....	29
III.3.3	Régulateur à Action Proportionnelle-Intégrale (PI)	30
III.4	Le Calcul D'ordre Fractionnaire	32
III.4.1	Les Opérateurs D'ordre Fractionnaires	32
III.5	Les Correcteurs Fractionnaires.....	33

III.5.1	Correcteur Pi Fractionnaire ($PI\lambda$)	34
III.6	La Difference Entre Le PI Standard Et Le PI Fractionnaire	36
III.7	Optimisation Par Essaim Particulaire (PSO) :.....	36
III.7.1	Principe De Fonctionnement De PSO	37
III.8	Conclusion.....	39

**CHAPITRE IV : CONTROLE DE LA VITESSE DU MOTEUR BLDC A L'AIDE DE
REGULATEUR PI FRACTIONNEL**

IV.1	Introduction	40
IV.2	Historique Du Vehicule Electrique.....	40
IV.2.1	Caractéristiques Des Véhicules Electriques	41
IV.3	Les Convertisseurs Dc-Dc (Hacheurs).....	42
IV.3.1	Hacheur Dévolteur-Survolteur (Buck-Boost)	42
IV.4	Simulation	44
IV.4.1	Résultat De La Simulation	46
IV.4.2	Interprétation Des Résultats	48
IV.5	Conclusion.....	48
	Conclusion générale	49
	Références Bibliographique	

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Ce travail vise à améliorer les performances des moteurs robustes, en particulier en termes de durabilité, de fiabilité électromécanique, d'efficacité, de couple et de capacité à fonctionner à grande vitesse. Parmi les moteurs étudiés, on trouve les moteurs à aimants permanents, et plus précisément les moteurs à courant continu sans balais (BLDC). Ces moteurs reprennent le principe des moteurs à courant continu classiques, mais avec une commutation électronique au lieu d'une commutation mécanique par balais. Cette commutation électronique se fait sans contact entre le stator et le rotor, ce qui offre plusieurs avantages, notamment une plus grande flexibilité de contrôle et une durée de vie accrue. L'absence de balais réduit également le bruit acoustique.

Le principal inconvénient des moteurs BLDC est la nécessité d'un contrôle électronique complexe, généralement réalisé par un régulateur PI. Cependant, les progrès de l'électronique de puissance et l'émergence de microcontrôleurs performants ont permis de surmonter ce problème. De plus, l'utilisation de techniques d'optimisation avancées, comme l'optimisation par essaim de particules (PSO), permet d'obtenir des moteurs BLDC encore plus performants. Le reste du mémoire est structuré comme suit :

Dans le premier chapitre, nous donnerons un aperçu historique des moteurs BLDC, discuterons de leurs différentes structures et discuterons des circuits de base pour leur conduite, leurs principes de fonctionnement, leurs différents types et l'importance de ce moteur avec le reste des autres moteurs. Enfin, nous présenterons les domaines de son application.

Dans le deuxième chapitre nous simulerons à l'aide de MATLAB pour évaluer les avantages d'un moteur BLDC et tester ses performances, il est nécessaire de disposer d'un modèle dynamique sous forme d'équations différentielles.

Dans le troisième chapitre Nous avons parlé sur le contrôle de la vitesse du moteur BLDC par un régulateur PI fractionnaire le problème était l'ajustement des gains : proportionnel et intégral et lambda, Parmi les solutions, à cette problématique c'est l'algorithme PSO (Particle Swarm Optimization).

Dans le quatrième chapitre nous faisons fonctionner un moteur BLDC dans un véhicule électrique, nous avons besoin d'un convertisseur DC-DC (HACHEUR) pour réguler la tension fournie au moteur permettant un contrôle précis de la vitesse de ce véhicule.

*Chapitre I : Généralités Sur Le
Moteur Brushless (BLDC)*

I.1 INTRODUCTION

Les moteurs brushless, souvent appelés moteurs sans balais, représentent une avancée technologique majeure dans le domaine de l'électromécanique, offrant des performances améliorées, une efficacité énergétique accrue et une fiabilité exceptionnelle par rapport à leurs homologues à balais. Cette classe de moteurs a révolutionné divers secteurs, de l'industrie de l'automobile à l'électronique grand public, en passant par les domaines de l'aérospatiale et de l'automatisation industrielle. Cette introduction approfondie explore les principes fondamentaux, la conception innovante et les applications diverses qui font des moteurs brushless des acteurs essentiels dans l'ère moderne de l'électro mobilité et de l'automatisation.

I.2 RAPPELS THEORIQUE SUR LES MACHINES SYNCHRONES

Le terme machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant.

Parmi les machines synchrones on trouve le moteur pas à pas qui permet de transformer une impulsion électrique en un mouvement angulaire. On trouve aussi le moteur brushless ou le moteur sans balais, c'est une machine électrique qui classée dans la catégorie de machine synchrone il comporte les mêmes éléments qu'un moteur à courant continu, excepté le collecteur. Par ailleurs, l'emplacement des bobines et des aimants permanents est inversé. Le rotor est composé d'un ou plusieurs aimants permanents, et le stator de plusieurs bobinages.
[1]

Le moteur brushless contient deux types, il y a le BLAC « Brushless Alternating Current » et le BLDC « Brushless Direct Current » la différence entre les deux réside dans la forme d'onde de la tension de sortie lorsqu'elle est entraînée en arrière (ou en rotation mécanique plutôt qu'électrique). Les moteurs BLAC génèrent une forme d'onde sinusoïdale lorsqu'ils sont entraînés en arrière, tandis que les moteurs BLDC génèrent une forme d'onde trapézoïdale.

I.3 ORIGINE DU MOTEUR SANS BALAIS

Les premiers concepts de moteurs sans balais remontent au début du dix-neuvième siècle, mais ce n'est que grâce aux progrès de la technologie des semi-conducteurs dans les années 1960 que les moteurs sans balais sont devenus une réalité. Ce moteur est le fruit de recherche de T. G. Wilson et P. H. Trickey. En 1962, ils ont publié un travail de recherche décrivant un moteur sans balais fonctionnant avec du courant continu et doté d'une technologie où le magnétisme d'aimants est mis en opposition successivement par un

dispositif électrique. La découverte dans ce travail de recherche est le concept du moteur sans balais. Ce qui signifie, l'absence d'un commutateur physique servant à transmettre le courant. [2]

Aujourd'hui, Les moteurs sans balais sont largement utilisés dans une grande variété d'applications, des petits appareils électroniques aux véhicules électriques. Les progrès de la recherche et du développement continuent d'améliorer les performances, l'efficacité et la fiabilité des moteurs sans balais.

I.4 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE BLDC

Si les machines synchrones à aimants permanents ont s'imposer dans plusieurs domaines et devenir aussi intéressantes pour ces performantes, c'est grâce à ses avantages. Et elles ont aussi des inconvénients comme toutes les autres machines

I.4.1 Les avantages des moteurs sans balais (brushless)

- Moins d'entretien global en raison de l'absence de balais.
- Taille réduite avec des caractéristiques thermiques bien supérieures.
- Plage de vitesse plus élevée et génération de bruit électrique plus faible.
- Il n'a pas de commutateur mécanique et les problèmes associés.
- Rendement élevé et rapport puissance/taille de sortie élevé grâce à l'utilisation d'un rotor à aimant permanent.
- Grande vitesse de fonctionnement même dans les conditions chargées et déchargées en raison de l'absence de balais qui limite la vitesse.
- Géométrie du moteur plus petite et plus légère que les moteurs à courant continu à balais et à induction à courant alternatif.
- Longue durée de vie car aucune inspection ni maintenance n'est requise pour le système de collecteur.
- Réponse dynamique plus élevée en raison de la faible inertie et des enroulements porteurs dans le stator.
- Faible bruit dû à l'absence de balais. [I.3]

I.4.2 Inconvénients des moteurs sans balais (brushless)

- Nécessité d'un bon variateur.
- Risque de mauvais démarrage ou de décrochage.

- Plus petites séries, peu de séries économiques.
- Il faut ajouter une alimentation continue.
- Cout élevé. [3]

I.5 MOTEUR SYNCHRONE A AIMANT PERMANENT (BRUSHLESS)

Le terme "machines sans balais" couvre toutes les machines synchrones autoguidées et leurs commandes associées. Le terme "sans balais" provient du fait que certaines de ces machines fonctionnent de la même manière que les machines à courant continu, le convertisseur de puissance faisant office de commutateur électronique.

Dans ce type de moteur, le rotor est constitué d'aimants permanents et ne comporte ni bagues ni balais. Le flux de champs est fixé par ces aimants. Par conséquent, les pertes en cuivre sont concentrées dans le stator et peuvent être facilement évacuées par une ventilation externe. Elles présentent également un rapport poids/puissance et un rendement plus élevés que les autres technologies. En outre, la disponibilité d'aimants plus performants à un coût inférieur signifie qu'ils jouent un rôle majeur dans les changements de vitesse, en particulier dans la robotique, la traction électrique et d'autres applications industrielles. [4]

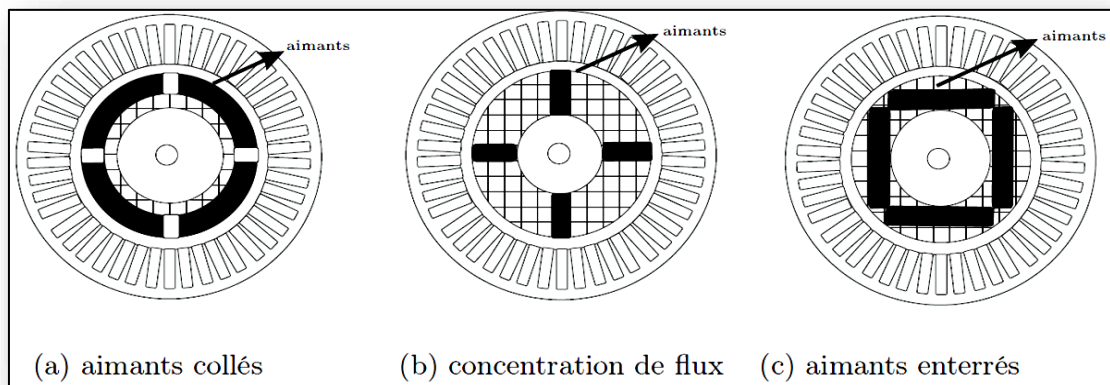


Figure I. 1 : Différentes structures du rotor à aimant permanent

I.6 DESCRIPTION D'UN BRUSHLESS DC MOTEUR

Les moteurs à courant continu sans balais (nommées Brushless), sont de plus en plus utilisés dans différentes applications et dans de nombreux domaines tels que l'aéronautique, la médecine, les véhicules électriques, etc. Le moteur BLDC est une machine composée d'un stator bobiné et d'un rotor à aimants permanents. Contrairement aux moteurs avec balais, où les enroulements du rotor sont alimentés par des balais, la commutation du moteur BLDC est réalisée électroniquement.

En appliquant le courant approprié dans les enroulements du stator, un champ magnétique est généré et attire les aimants permanents du rotor. La rotation du moteur est ensuite obtenue en modifiant la direction du champ magnétique obtenue en alimentant la phase de stator appropriée. Ceci est effectué par un système d'asservissement électronique.

La commutation du courant d'une phase à une autre, assurée via des interrupteurs, est accomplie à partir de la position du rotor par rapport au stator, tandis que pour contrôler la vitesse de rotation, la magnitude du courant fournie dans les bobines du stator est ajustée. [27]

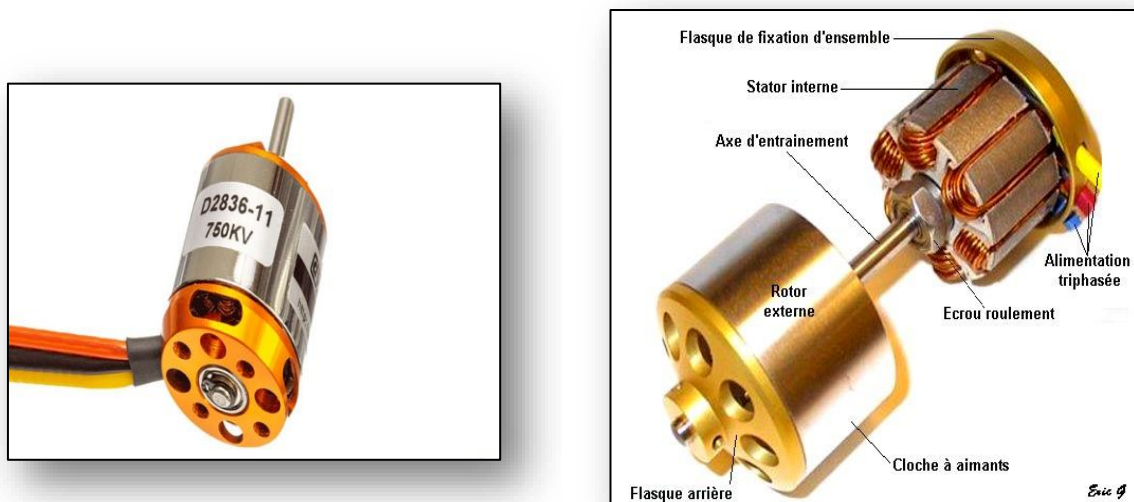


Figure I. 2: moteur sans balais

I.7 STRUCTURE DU MOTEUR A COURANT CONTINU SANS BALAIS (BLDC)

Le moteur à courant continu sans collecteur, ou "Brushless DC Motor", que l'on appelle aussi parfois MCE ("Moteur à commutation électronique"), est la 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 ne soit nécessaire [5].

- L'excitation, réalisée jusqu'ici au niveau du stator par l'aimant, voire un enroulement, est maintenant créé par le rotor. La partie tournante de la machine (on considère ici le cas le plus fréquent d'un moteur à rotor intérieur), que l'on munit d'aimants Permanents. Le rotor joue donc maintenant le rôle d'inducteur sans qu'il soit toutefois nécessaire de lui transmettre de l'énergie par le biais d'un contact mécanique ;
- Les trois enroulements toujours couplés en étoile, sont logés dans les encoches du stator, lequel fait désormais office d'induit.

- Le collecteur est supprimé.
- Trois sondes à effet Hall (H1, H2 et H3) sont utilisées pour détecter le champ d'induction produit par l'aimant et pour ainsi mesurer grossièrement la position du rotor. Elles sont solidaires du stator, logées directement dans celui-ci ou sur une pièce fixée au stator en face d'un aimant auxiliaire solidaire du rotor ayant les mêmes caractéristiques que les aimants permanents du rotor. Comme indiqué précédemment, elles sont espacées de 60°, voire 120°. C'est sur la base de l'information qu'elles délivrent que les phases seront commutées.

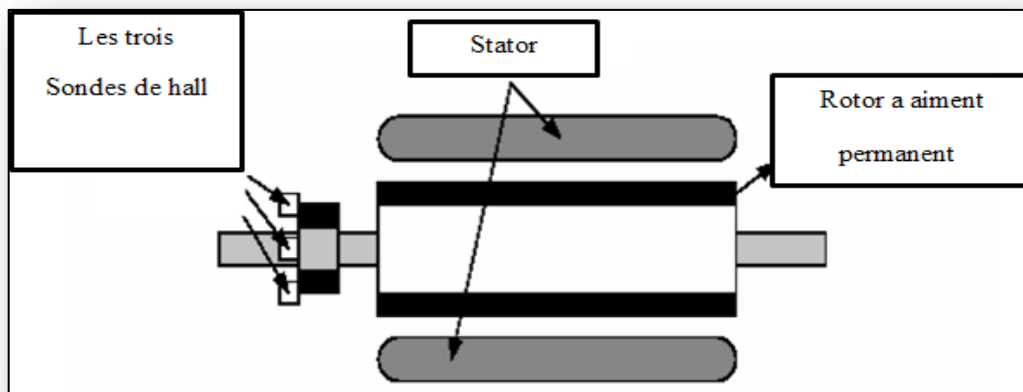


Figure I. 3 : Structure du moteur BLDC

I.7.1 Le stator

Le stator d'un moteur BLDC (Brushless DC) est un élément essentiel de son fonctionnement, étant constituée de plaques d'acier empilées avec des fentes coupées axialement pour la bobine, l'enroulement dans BLDC est légèrement différent d'un moteur à induction conventionnel.

En général, la plupart des moteurs BLDC sont constitués de trois enroulements de stator connectés en étoile (sans point neutre). De plus, en fonction des interconnexions des enroulements, les enroulements du stator sont divisés en moteurs trapézoïdaux et sinusoïdaux [6].

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.

I.7.2 Le rotor

Le rotor est constitué d'aimants permanent et peut varier de deux à huit paires de pôles avec alternance des Nord (N) et Sud (S) pôles. 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. Tels que les alliages néodyme (Nd), samarium cobalt (SmCo) et néodyme, ferrite et bore (NdFeB). Selon l'application, le nombre d'arbres peut varier entre deux et huit Avec les pôles nord (N) et sud (S) placés en alternance. [28]

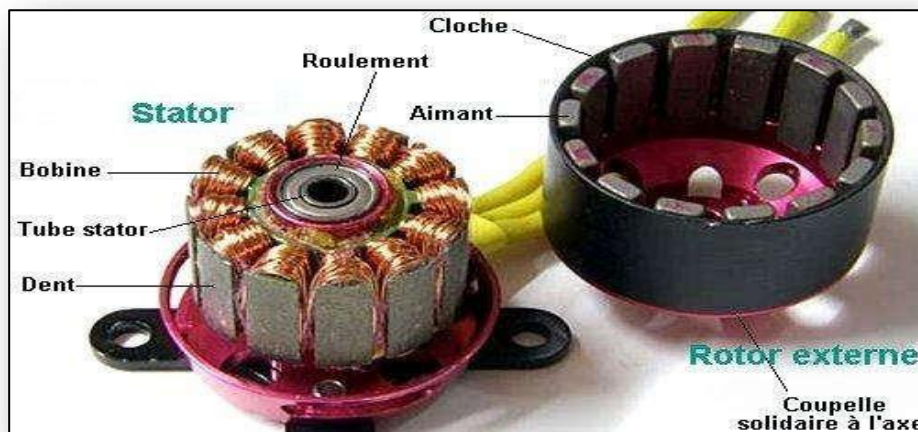


Figure I. 4 : Stator et rotor d'un moteur BLDC

I.7.3 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 BLDC 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. [7]

I.7.4 Capteur à effet hall (Hall sensors)

Certains moteurs CC sans balais (BLDC) sont équipés de trois capteurs à effet Hall internes sont disposés d'une manière, (120° de chaque) à savoir à tout instant la position du rotor. 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. Cette information sert à envoyer des impulsions aux interrupteurs pour leurs commandes. Dans tous les cas, les capteurs à effet Hall peuvent également être utilisés pour la détection

précise de la position et une meilleure commande. Cependant, l'addition de ces capteurs cause l'effet de surcoût et un risque de panne supplémentaire. [29]

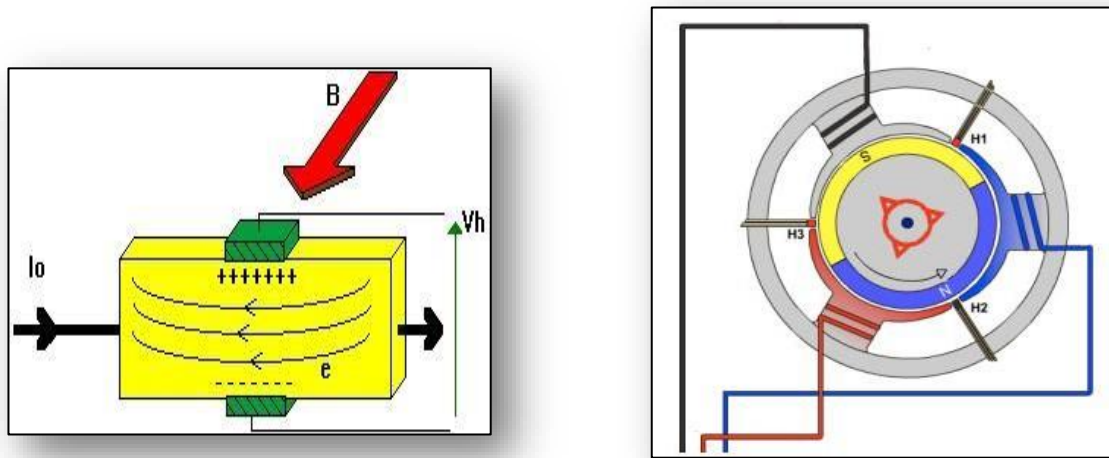


Figure I. 5: Disposition du capteur à effet hall

I.8 APPLICATIONS DES MOTEURS BLDC

Les moteurs BLDC trouvent leur utilité dans divers domaines d'application, parmi lesquels figurent notamment :

I.8.1 Les moteurs BLDC dans l'Automobile

L'automobile, en tant que moyen de transport quotidien, se distingue par sa praticité et son efficacité. L'intégration de moteurs BLDC (Brushless DC) dans les véhicules ouvre la voie à une amélioration significative de l'efficacité énergétique et économique, tout en respectant l'environnement. Ces moteurs peuvent être utilisés dans diverses applications, telles que les entraînements d'air conditionné, les balais d'essuie-glace, les coussins gonflables, les portes électriques et les sièges électriques.

La climatisation représente l'un des accessoires les plus cruciaux. La performance des climatiseurs automobiles est directement liée au moteur et à son système de commande. Les compresseurs de climatiseurs, entraînés par des moteurs BLDC, évoluent vers des solutions plus économes en énergie et offrant un confort accru. Avec le développement continu des technologies telles que l'électronique de puissance, l'automatisme et l'informatique, les techniques de régulation de la vitesse des moteurs BLDC deviennent de plus en plus matures, avec une meilleure qualité et des coûts plus bas. [8]

Il est crucial de noter que l'utilisation et l'installation de capteurs de position augmentent non seulement le coût des moteurs, mais impactent également la fiabilité et la durée de vie du

système de commande. De plus, leur encombrement représente un inconvénient majeur dans le domaine automobile. Ainsi, la mise en place d'une stratégie de commande sans capteurs est essentielle pour favoriser le développement significatif des systèmes d'entraînement à moteur BLDC pour les automobiles.

I.8.2 Moteur BLDC dans l'industrie

Les moteurs BLDC représentent une intégration électromécanique novatrice, combinant les atouts des systèmes de commande de moteurs à courant continu à balais et des moteurs asynchrones à courant alternatif. Cette solution, alliant performances accrues et maîtrise des coûts, trouve une place de choix dans le domaine des robots, où elle tend à supplanter les moteurs pas à pas et les servomoteurs traditionnels. Ces moteurs, à la fois puissants et économiques, se révèlent prometteurs pour diverses applications, y compris dans des conditions exigeantes telles que les basses vitesses. [8]

Par exemple, dans les secteurs des entraînements de moteurs de traction d'ascenseur sans engrenage et de la transmission des laminoirs, les moteurs BLDC affichent des avantages tels qu'une réactivité dynamique, une faible marge d'erreur, un rapport statique optimal et une vaste plage de régulation de vitesse. Cette technologie émergente représente ainsi une solution polyvalente et efficace dans le paysage des systèmes électromécaniques modernes.

I.8.3 Moteur BLDC dans l'aérospatiale

Les avancées technologiques dans l'aérospatiale ont conduit à une transition significative vers l'utilisation de moteurs Brushless DC (BLDC). Cette évolution remplace progressivement les dispositifs de transmission pneumatiques et hydrauliques, marquant une tendance notable dans l'industrie. Les exigences spécifiques de l'aérospatiale, telles que la compacité et la simplicité structurale, font des moteurs BLDC un choix privilégié. [8]

Les moteurs BLDC sont souvent sollicités dans des conditions de charge variable, exigeant une régulation précise à haute vitesse et une réactivité dynamique optimale. Dans l'aérospatiale, certains moteurs BLDC, utilisés notamment dans des équipements tels que les pompes centrifuges à grande vitesse et les caméras à grande vitesse, peuvent atteindre des vitesses de dizaines de milliers de tours par minute. Par conséquent, il devient impératif de prendre en compte les exigences mécaniques et électriques spécifiques aux performances lorsque ces moteurs fonctionnent à des vitesses élevées.

I.8.4 Moteur BLDC en bureautique

La plupart des moteurs utilisés dans les équipements bureautiques et périphériques informatiques sont des moteurs BLDC, qui sont une combinaison de technologie de pointe et de microélectronique moderne. L'adoption de servo-système de moteur BLDC haute performance améliore la qualité et augmente la valeur des produits. Par exemple, le moteur BLDC utilisé sur l'arbre principal des disques durs peut tourner à grande vitesse avec le disque magnétique. La tête magnétique, qui réalise la fonction exécutive pour les données sur le disque. Les moteurs BLDC peuvent également être les moteurs à broche pour lecteurs de disques optiques et de disquettes, et dans ce cas, Le moteur BLDC présente les avantages de faible bruit, de basse température et de tolérance à haute température et peut résister à un choc et à une certaine vibration, ce qui améliore la stabilité du système. Les ventilateurs de refroidissement. Les moteurs de conduite pour ordinateurs sont généralement nécessaires pour avoir des caractéristiques telles que le bruit faible, la construction compacte, une longue durée de vie et une vitesse élevée. [8]

I.9 DIFFERENTS TYPES DE MOTEURS BRUSHLESS

Selon les applications, il existe une grande variété de moteurs brushless avec des caractéristiques de couples, vitesses, inertie différentes en fonction de leurs constitutions. Parmi les différents types de moteur brushless on trouve :

I.9.1 Moteurs brushless outrunner

Les moteurs « outrunner » ou les moteurs « en cloche » le rotor est autour du stator. Cette configuration est intéressante en termes de couple moteur, car les aimants sont disposés sur un 25 diamètre important, ce qui crée un bras de levier très intéressant. Comme pour un moteur pas à pas, 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°. 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. [30]



Figure I. 6: moteur brushless outrunner

I.9.2 Moteurs brushless inrunner

Les moteurs « inrunner » ou les moteurs « à rotor interne » Contrairement au type précédent, les moteurs brushless inrunner ont le rotor à l'intérieur du stator. Ils n'ont généralement qu'une seule paire de pôles sur le rotor, et 3 bobines au stator. L'inertie du rotor est beaucoup plus faible que pour un moteur outrunner, et les vitesses atteintes par ce type de moteur sont beaucoup plus élevées (jusqu'à 7700tr/min/V). La gestion électronique de la commutation est par contre plus simple car le rotor tourne à la même fréquence que le champ magnétique. Le couple des moteurs brushless inrunners est plus faible que pour un outrunner car les aimants sont sur un diamètre plus petit à taille de moteur égale. Ce type de moteur brushless est très utilisé dans l'industrie car il se rapproche beaucoup d'un moteur à courant continu à balais et collecteur. [31]

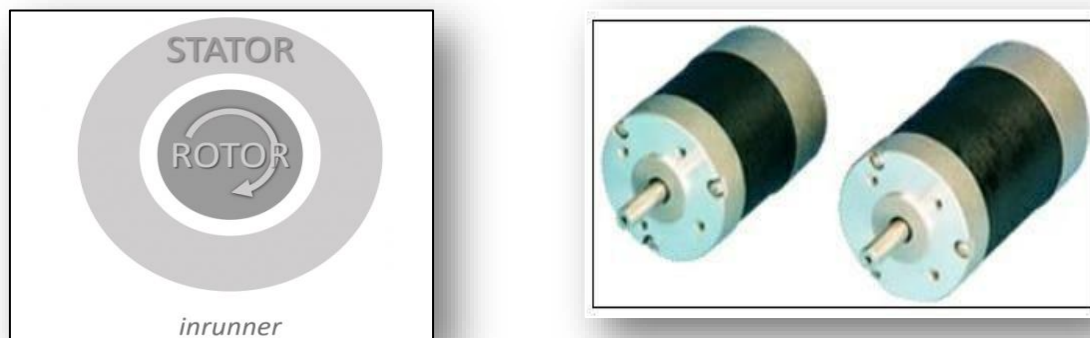


Figure I. 7: Moteur brushless inrunner.

I.9.3 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, sans offrir de différences notables au niveau des performances par rapport à un moteur brushless outrunner.[9]



Figure I. 8: Moteurs brushless disque.

I.10 CONCLUSION

Nous avons vu dans ce chapitre une présentation générale du moteur BLDC ce moteur défini comme un accouplement à un interrupteur électronique et des capteurs de position du rotor, ce type de moteur présente de bonnes caractéristiques de fonctionnement haut rendement, grande vitesse, durabilité, fiabilité électromécanique et les capacités de couple ont les mêmes composants qu'un moteur à courant continu En commençant par Rappels théoriques sur les machines synchrones en suite on a vu l'Origine du moteur sans balais, description d'un brushless DC moteur, applications des moteurs BLDC et leurs avantages et inconvénients.

Le chapitre suivant sera l'objet de la modélisation et simulation du moteur BLDC.

*Chapitre II : La modélisation
et simulation du moteur BLDC*

II.1 INTRODUCTION

Les moteurs synchrones à aimants permanents et en particulier ceux qui sont connus comme sans collecteur (brushless) ont connu une utilisation de plus en plus importante. Cette évolution est due à leur rendement élevé, densité de puissance élevée et un rapport couple inertie important [10].

Néanmoins, l'application de ce type de moteur ainsi que les technologies de contrôle, doivent nécessairement être précédée d'études et de calculs analytiques, et parfois même de simulations mathématiques. Dans ce contexte, ce chapitre aborde une description du moteur BLDC et leur fonctionnement, sa modélisation analytique, et une simulation du moteur BLDC.

II.2 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.1 montre l'architecture du moteur et de son onduleur.

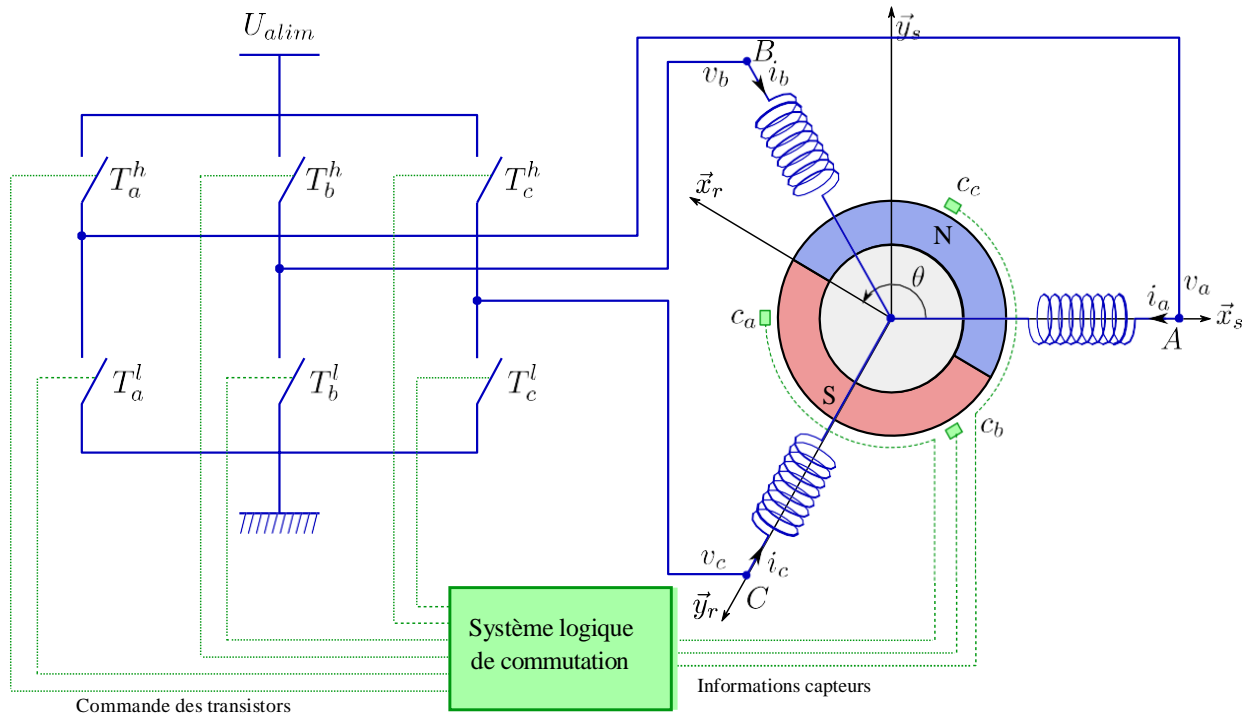


Figure II. 1: Fonctionnement de l'onduleur et du moteur brushless.

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.2, 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. [32]

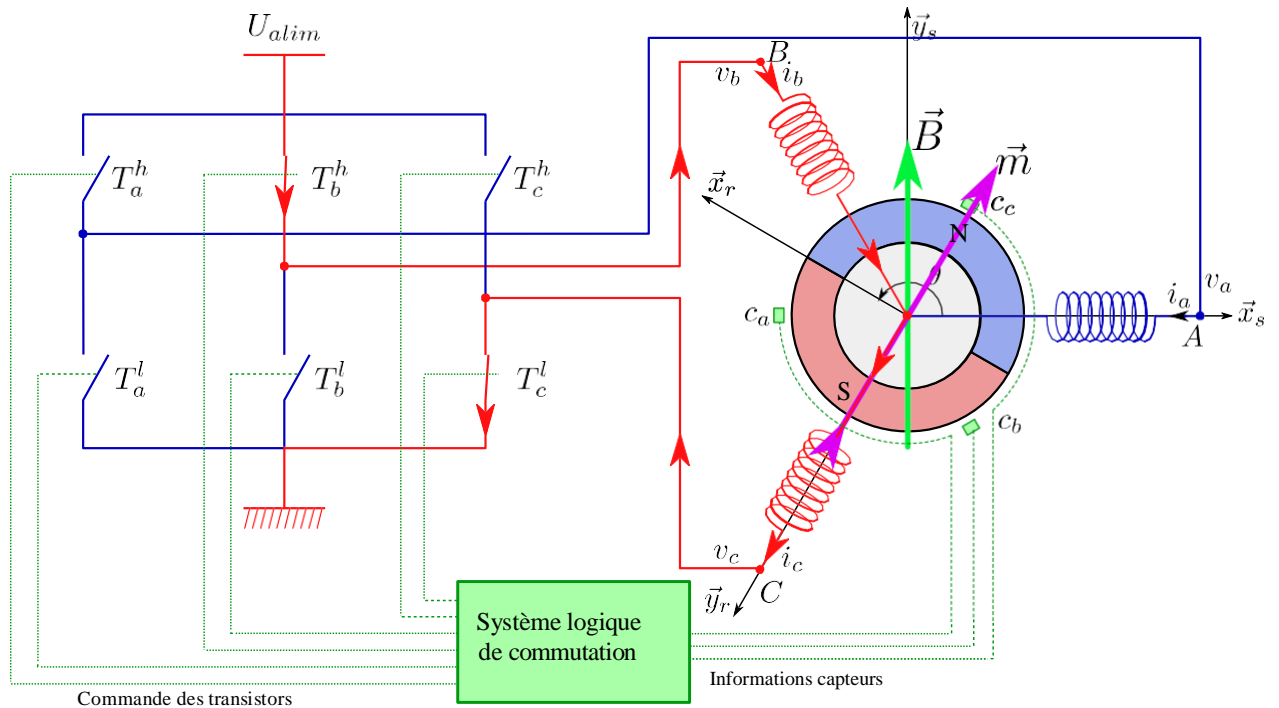


Figure II. 2: Exemple de situation de commutation.

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 $\frac{\pi}{6}$, 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 $\vec{C}_m = \vec{m} \wedge \vec{B}$.

II.3 MODELISATION MATHÉMATIQUE DU MOTEUR (BLDC)

II.3.1 Modèle électrique

Le moteur BLDC triphasé est généralement modélisé comme une connexion en série d'une résistance d'enroulement du stator, d'une inductance et d'une force CEM, comme illustré à la figure II.3.

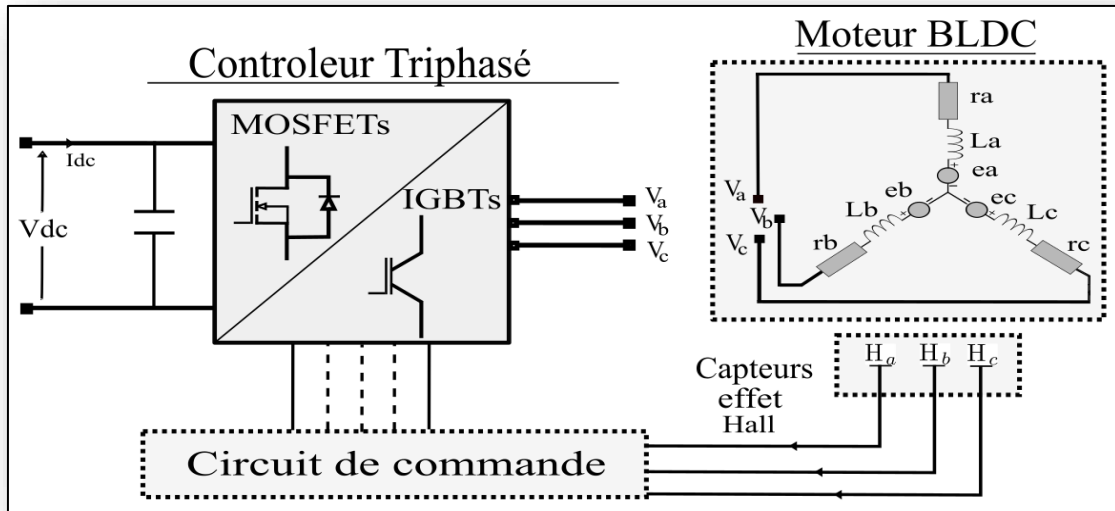


Figure II. 3: Modèle équivalent du moteur BLDC.

À des fins de simplification, le modèle reposera sur les hypothèses suivantes : L'entrefer est uniforme ; le circuit magnétique est non saturé et ne prend pas en compte les pertes par courants de Foucault ni par hystérésis ; les trois phases du stator sont symétriques et identiques. Par conséquent, L'équation (1) présente les tensions de moteur BLDC.

Ces équations restent valables que ce soit pour une structure out-runner ou in-runner.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 \\ 0 & 0 & r_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_b & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_n \\ v_n \\ v_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

Où V_a , V_b et V_c sont les tensions de phase, r_a , r_b et r_c sont les résistances d'enroulement de stator, L_a , L_b et L_c sont les self-inductances du bobinage du stator, M_{ab} , M_{ac} , et M_{cb} sont les inductances mutuelles, i_a , i_b et i_c sont les courants de phase, e_a , e_b et e_c sont les forces contre-électromotrices, et v_n est la tension du neutre.

À partir des hypothèses mentionnées ci-dessus, on peut déduire que $L_a = L_b = L_c = L$, $r_a = r_b = r_c = R$, et $M_{ab} = M_{ac} = \dots = M_{cb}$

En outre, l'enroulement triphasé étant connecté en étoile, ce qui permet de mentionner la simplification suivante :

$$\mathbf{i}_a + \mathbf{i}_b + \mathbf{i}_c = \mathbf{0} \mathbf{i}_b \xrightarrow{-\mathbf{i}_c} \mathbf{i}_a (2)$$

L'équation (3) est ainsi dérivée comme suit :

$$L\mathbf{i}_a + M\mathbf{i}_b + M\mathbf{i}_c = L\mathbf{i}_a + M(-\mathbf{i}_a) = (L - M)\mathbf{i}_a (3)$$

Par conséquent, après avoir répété les mêmes étapes de calcul pour les deux autres phases, l'équation (1) devient :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_n \\ v_n \\ v_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

Où $L_s = L - M$ est l'inductance équivalente de phase. [11]

$$\text{Avec :} \quad e_j = \frac{d\phi_j}{dt} = \omega \phi'_j \quad (5)$$

Les variables ϕ'_j représentent la dérivée du flux induit par les aimants et peuvent être mesurées à partir d'un simple essai à vide. Ces variables sont égales aux forces contre-électromotrices mesurées à vide et divisées par la vitesse à laquelle ce relevé a été effectué.

II.3.2 Modèle mécanique

L'équation mécanique est définie par la relation :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = C_e - C_r \quad (6)$$

Avec :

J l'inertie des parties tournantes [N.m/rad/s²].

f le frottement visqueux [N.m/rad/s].

C_r le couple de charge [N.m].

C_e le couple électromagnétique [N.m].

Ω la vitesse rotorique [rad/s].

En ce qui concerne la vitesse du moteur, il est nécessaire de présenter dans un premier temps, les équations mécaniques du moteur. Le couple électromagnétique et la dérivée de vitesse sont exprimés comme suit :

$$C_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\Omega} \quad (7)$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} (C_e - C_r - B\Omega) \quad (8)$$

Où Ω est la vitesse mécanique du moteur (rad/s), J est le moment d'inertie, B est le coefficient de frottement et T_L est le couple résistif.

Les forces CEM et les courants de phase peuvent être exprimés comme suit :

$$e_a = -e_b = E \quad (9)$$

$$i_a = -i_b \text{ et } i_c = 0 \quad (10)$$

Où E est la valeur de la force CEM.

En combinant les équations (7), (9) et (10), le couple électromagnétique devient :

$$C_e = \frac{2EI}{\Omega} \quad (11)$$

Où I représente le courant d'entrée et s'exprime comme suit :

$$I = \frac{|i_a| + |i_b| + |i_c|}{2} \quad (12)$$

En vue de présenter l'équation de la vitesse, les hypothèses suivantes sont prises en compte : le moteur tourne à une vitesse constante et les ondulations de courant et de couple sont négligées. Les équations représentant le couple et la vitesse en régime permanent sont présentées dans (13) et (14) : [12].

$$C_e - C_r - B\Omega = 0 \quad (13)$$

$$\Omega = \frac{2EI - C_r}{B} \quad (14)$$

II.4 MODELISATION DE L'ALIMENTATION DU MOTEUR BLDC

Un moteur BLDC nécessite un commutateur électronique pour fournir une alimentation séquentielle aux bobines. Le schéma synoptique de cet interrupteur électronique est donné par la figure (II.5)

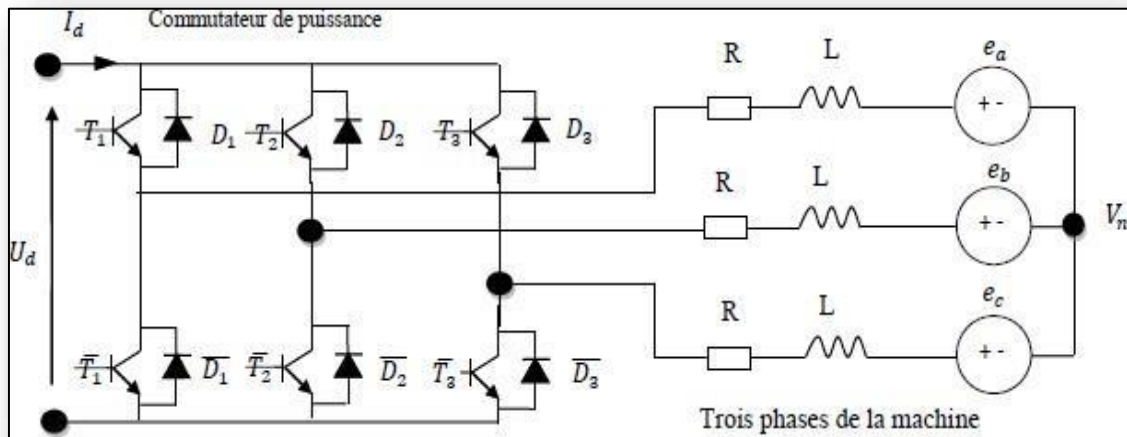


Figure II. 4: Ensemble de changement de vitesse du moteur

II.4.1 Modèle de l'onduleur

Un onduleur est un dispositif électronique appelé convertisseur statique qui a pour rôle la conversion continu-alternatif. Il permet d'obtenir un signal contrôlé en fréquence et en amplitude en agissant de manière périodique sur les connexions entre l'entrée et la sortie.

Il est composé d'un ensemble d'interrupteurs représentant les transistors et les diodes qui sont soit à l'état conducteur (on) ou à l'état bloqué (off). Il est constitué de trois bras. Chaque bras comporte deux transistors montés en anti parallèle avec deux diodes de récupération afin d'assurer la continuité des courants. [33]

Dans notre cas, nous avons choisi d'utiliser le modèle de l'onduleur triphasé que Matlab-SimPowerSystems nous propose dans sa librairie. Son schéma synoptique est représenté par la figure (II.6) ci-dessous :

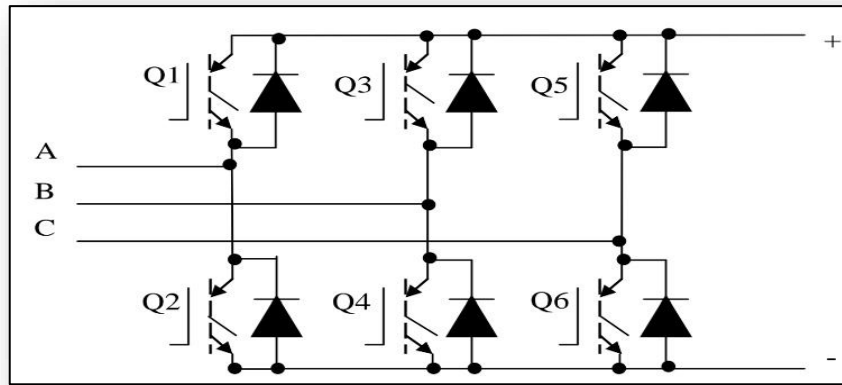


Figure II. 5: Schéma de l'onduleur IGBT-Diode Sur SimPowerSystems

Le symbole qui représente l'onduleur IGBT-diode sur SimPowerSystems est donné dans la figure (II.7) suivante :

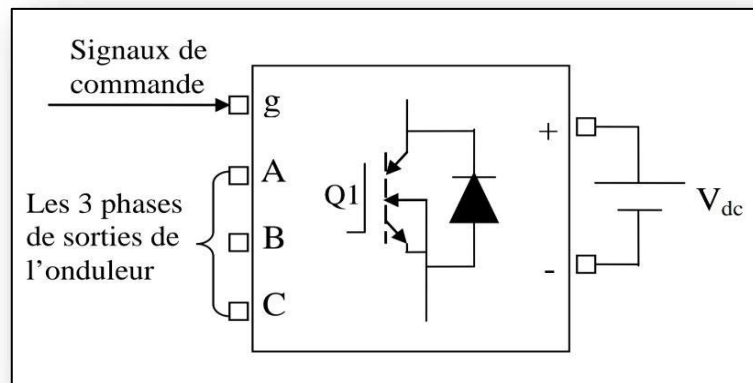


Figure II. 6: Symbole de l'onduleur IGBT-Diode disponible sur Matlab- SimPowerSystems.

Tel que : $g = [Q 1, Q 2, Q 3, Q 4, Q 5, Q 6]$

II.4.2 Logique de commande de l'onduleur

En exploitant les signaux générés à la sortie du capteur de position, qui permettent l'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur, on impose une logique de commande de 120°électrique. Pour que cette commande soit correcte, les courants (champ statorique) doivent être synchronisés avec les f.c.e.m (champ rotorique) et l'angle de déphasage entre eux doit être nul (angle de calage nul).

Les signaux du capteur sont donnés dans la table de vérité suivante : [34]

Tableau II.1: Signaux du capteur et états des interrupteurs (rotation dans le sens horaire)

Angles	A	B	C	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
0°-60°	0	0	0	1	0	0	1	0	0
60°-120°	0	0	1	1	0	0	0	0	1
120°-180°	0	1	1	0	0	1	0	0	1
180°-240°	0	1	0	0	1	1	0	0	0
240°-300°	1	1	0	0	1	0	0	1	0
300°-360°	1	0	0	0	0	0	1	1	0

Le tableau précédent montre lesquels des interrupteurs de l'onduleur qu'il faut actionner en fonction des signaux du capteur, afin d'assurer les commutations adéquates des phases du moteur, ainsi que l'ordre de succession des commutations.

En utilisant la simplification de Karnaugh, on aboutit aux fonctions logiques des six transistors suivants :

$$Q1 = \bar{A} \cdot \bar{B}$$

$$Q2 = B \cdot \bar{C}$$

$$Q3 = \bar{A} \cdot B$$

$$Q4 = \bar{B} \cdot \bar{C}$$

$$Q5 = A \cdot \bar{C}$$

$$Q6 = \bar{A} \cdot C$$

La réalisation de la logique de commande a été faite sous Matlab-Simulink comme le montre la figure (II.8) suivante :

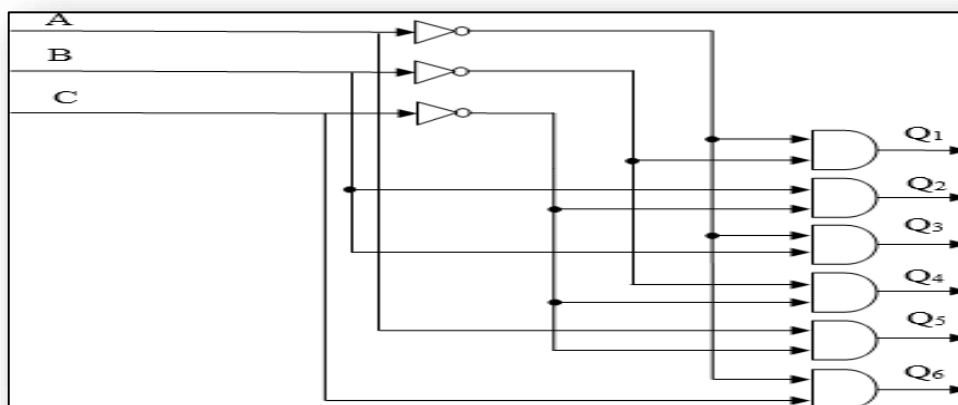


Figure II. 7: Organigramme de la logique de commande 120° de l'onduleur.

II.4.3 Modèle mathématique de l'onduleur de tension

L'état des interrupteurs, supposés parfaits peut être défini par trois grandeurs booléennes de commande S_i ($i = a, b, c$):

- $S_i = 1$ le cas où l'interrupteur de haut est fermé et celui d'en bas ouvert.
- $S_i = 0$ le cas où l'interrupteur de haut est ouvert et celui d'en bas fermé.

Dans ces conditions on peut écrire les tensions en fonction des signaux de commande s_i et en tenant compte du point fictif « 0 » représenté sur la figure (II.9) [13].

$$V_{i0} = V_{dc} \left(S_i - \frac{1}{2} \right) \quad (15)$$

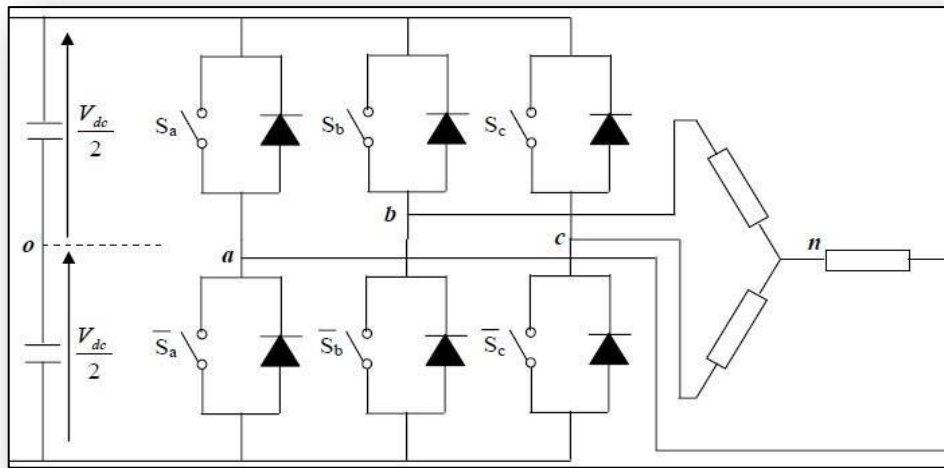


Figure II. 8: Schéma de l'onduleur triphasé.

Soit n le point neutre du côté alternatif (BLCD), alors les trois tensions composées : V_{ab}, V_{bc} et V_{ca} sont définies par les relations suivantes :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{an} - V_{bn} \\ V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \\ V_{ca} = V_{cn} - V_{an} \end{cases} \quad (16)$$

La charge constituée par le moteur est équilibrée ($V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$), on aura Donc :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3} (V_{ab} - V_{ca}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3} (V_{bc} - V_{ab}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3} (V_{ca} - V_{bc}) \end{cases} \quad (17)$$

En faisant apparaître le point « 0 », les tensions entre phases peuvent aussi s'écrire :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{a0} - V_{b0} \\ V_{bc} = V_{b0} - V_{c0} \\ V_{ca} = V_{c0} - V_{a0} \end{cases} \quad (18)$$

En remplaçant (17) dans (18) on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{b0} \\ V_{c0} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Des relations suivantes :

$$\begin{cases} V_{a0} = V_{an} + V_{n0} \\ V_{b0} = V_{bn} + V_{n0} \\ V_{c0} = V_{cn} + V_{n0} \end{cases} \quad (20)$$

On peut déduire le potentiel entre les points n et 0 :

$$V_{n0} = \frac{1}{3}(V_{a0} + V_{b0} + V_{c0}) \quad (21)$$

L'utilisation de l'expression (15) permet d'établir les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (22)$$

II.5 SEQUENCE DE COMMUTATION DU CAPTEUR A EFFET HALL ET DU TRANSISTOR

Selon la position angulaire de l'évolution du rotor entre 0° et 360° , on donne la position produite par les capteurs à effet Hall qui est décrite dans le tableau (II.2) ci-dessous.

Chaque capteur à effet Hall fonctionne, lors du passage des pôles en fonction des fronts montants et descendants. Ainsi, le front montant pour le pôle nord et descendant pour le pôle sud. En conséquence, le capteur indique respectivement 1 ou 0. Suivant cette logique de commutation des capteurs à effet Hall, la séquence de commutation de l'onduleur est exprimée dans le tableau (II.2), où la séquence de commutation pour la rotation de l'arbre est dans le sens des aiguilles d'une montre [14].

Tableau II.2 : Séquence de commutation en utilisant les signaux des capteurs à effet Hall

L'angle électrique (°)	N° de séquence	Capteur à effet Hall			Courant de phase			Interrupteur fermé	
		Ha	Hb	Hc	ia	ib	ic		
0 - 60	1	1	0	1	+	-	off	S1	S4
60 - 120	2	1	0	0	+	off	-	S1	S6
120 - 180	3	1	1	0	off	+	-	S3	S6
180 - 240	4	0	1	0	-	+	off	S3	S2
240 - 300	5	0	1	1	-	off	+	S5	S2
300 - 360	6	0	0	1	off	-	+	S5	S4

II.6 SIMULATION DU MOTEUR BLDC

Paramètres du moteur BLDC (Bosch SE-B2.040.060) [15]

Tableau II.3 : Paramètre du moteur BLDC.

$R = 2.875 \Omega$	Résistance des enroulements statorique.
$L_w = 8.5 \cdot 10^{-3} \text{ H}$	Inductance cyclique des enroulements statorique.
$\phi_f = 0.2158 \text{ Wb}$	Flux des aimants.
$J = 9 \cdot 10^{-3} \text{ kg.m}^2$	Inertie du rotor.
$f = 2 \cdot 10^{-3} \text{ N.s/rad}$	Coefficient de frottement.
$p = 4 \text{ pole pairs}$	Nombre de paires de pôles.
$K_t = 1.2 \text{ N.m/A}$	Constante de couple.
Rated current = 9.7 A	Courant nominal.
Rated voltage = 380 V	Tension entre phases nominale.
Peak current = 58 A	Courant maximum.

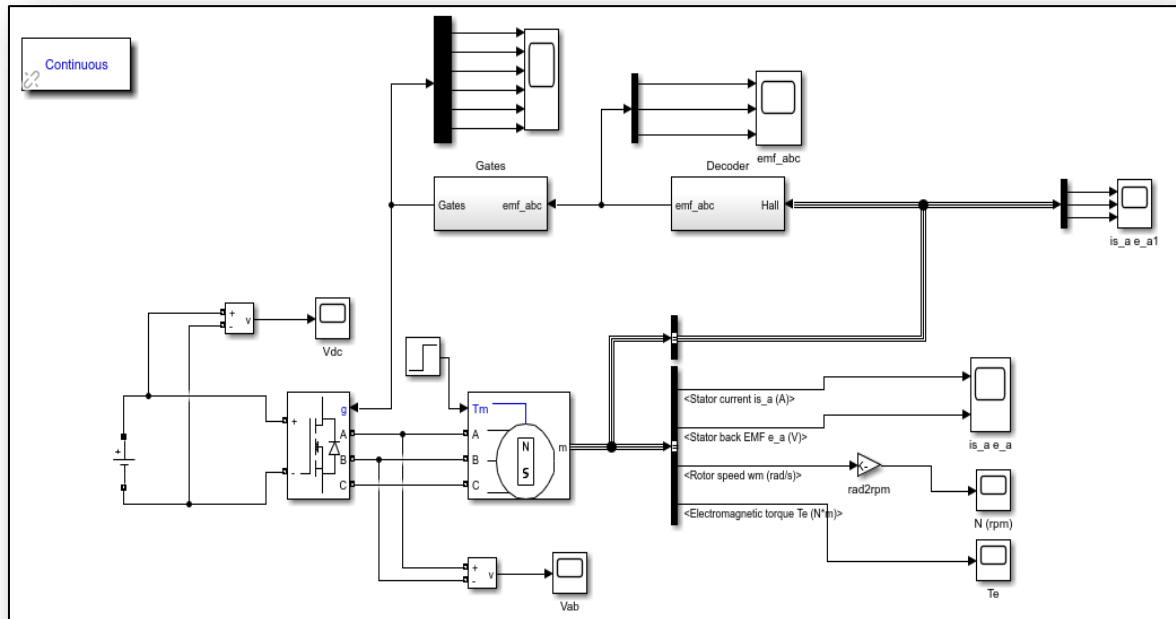


Figure II. 9: Schéma de la simulation d'un model du moteur BLDC

On a fait une simulation du l'ensemble BLDC moteur et convertisseur (onduleur), ce système est composé d'une source d'alimentation continue de $V = 300\text{v}$ et un onduleur qui converti la source continue à une source alternative qui alimente les trois phases du moteur.

Plusieurs essais de simulation, à vide et en charge, seront effectués. Les résultats seront présentés afin d'analyser l'allure des différentes grandeurs du système (vitesse et couple)

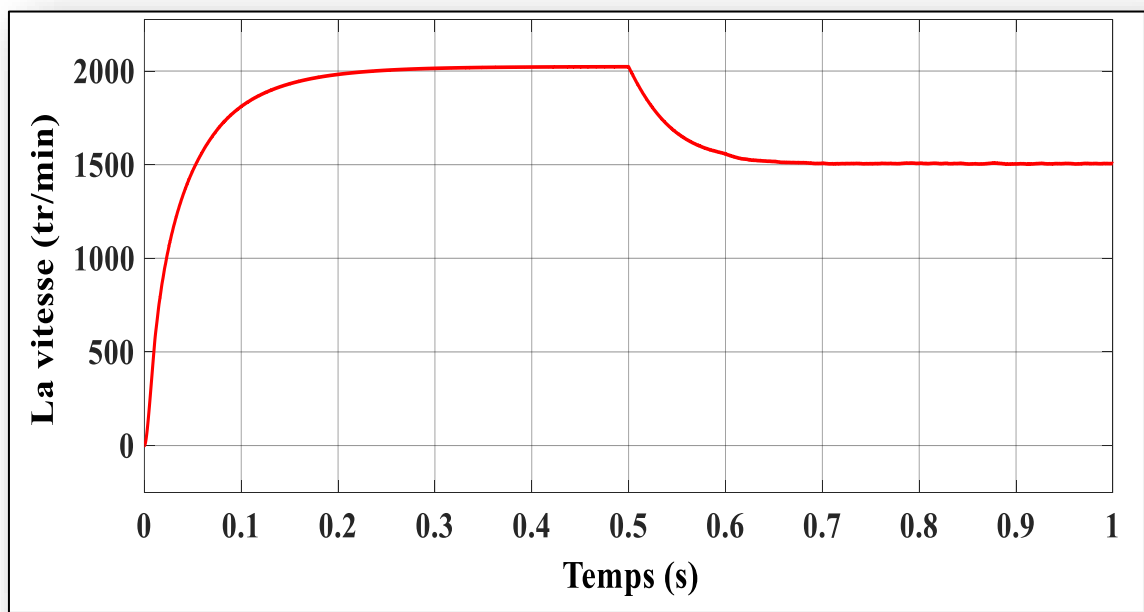


Figure II. 10: Evolution de la vitesse

La (figure II.11) montre la variation de la vitesse pendant 1s de temps de la simulation, le moteur tourne à 2000 tr/min à vide jusqu'à l'instant 0,5s, on a appliquée un couple résistant (charge) de 10 N.m on remarque que la vitesse est démunie jusqu'à 1500 tr/min car le couple résistant gêne le mouvement ou bien la rotation du moteur.

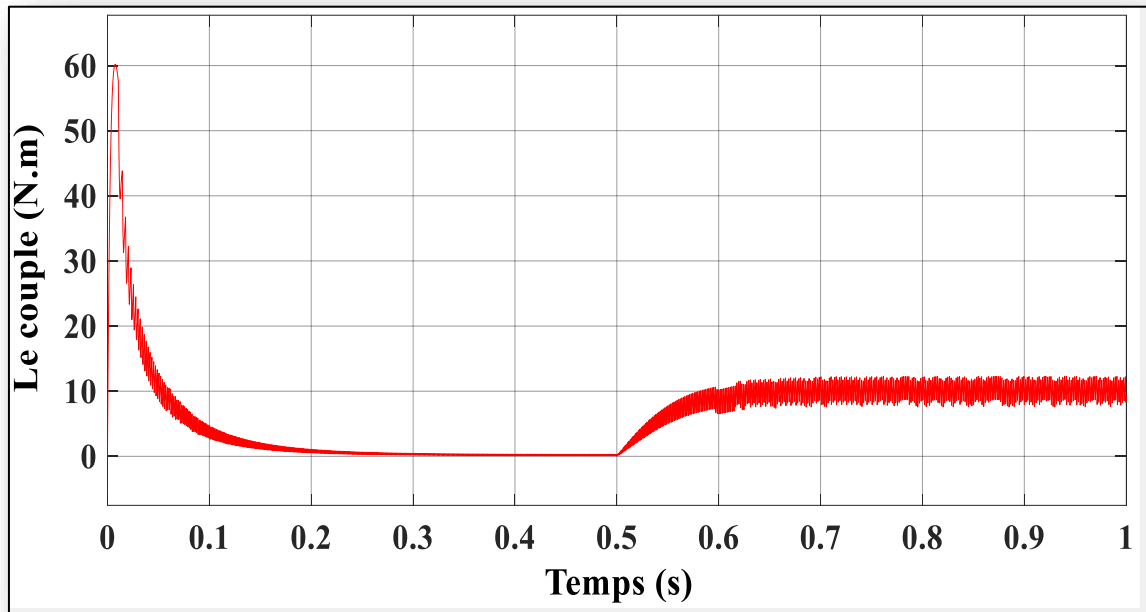


Figure II. 11: Evolution du couple.

La (figure II.12) montre la courbe du couple, tant que le moteur tourne à vide le couple est nul, après 0.5s on applique un couple résistant de 10 N.m. nous concluons que l'augmentation du couple entraîne une diminution de la vitesse de rotation.

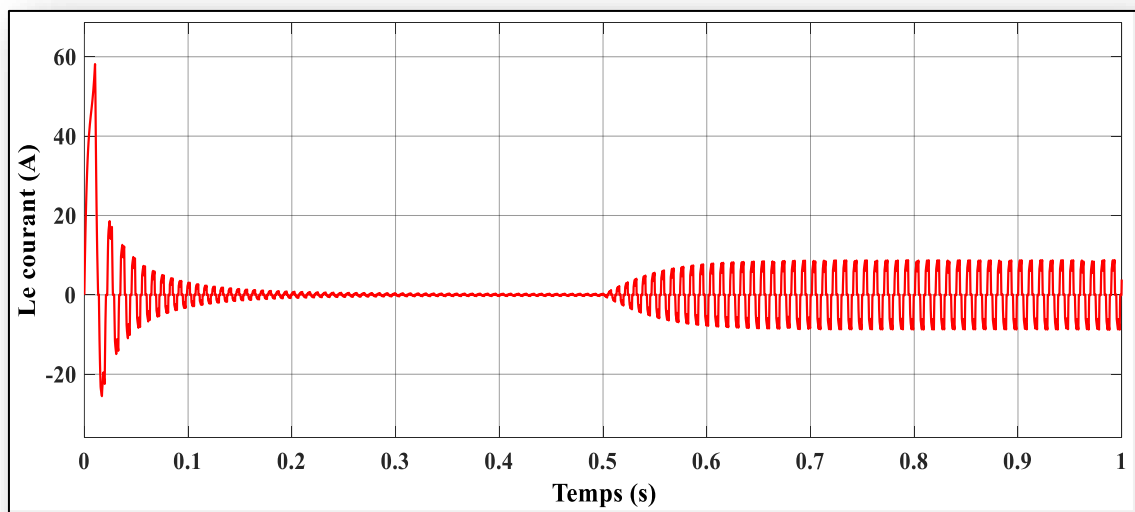


Figure II. 12: Evolution du courant.

La (figure II.13) montre la courbe du courant, avant le temps 0.5s le courant est nulle. Mais après 0.5s quand nous mettons une charge le courant augmente jusqu'à 8.73A.

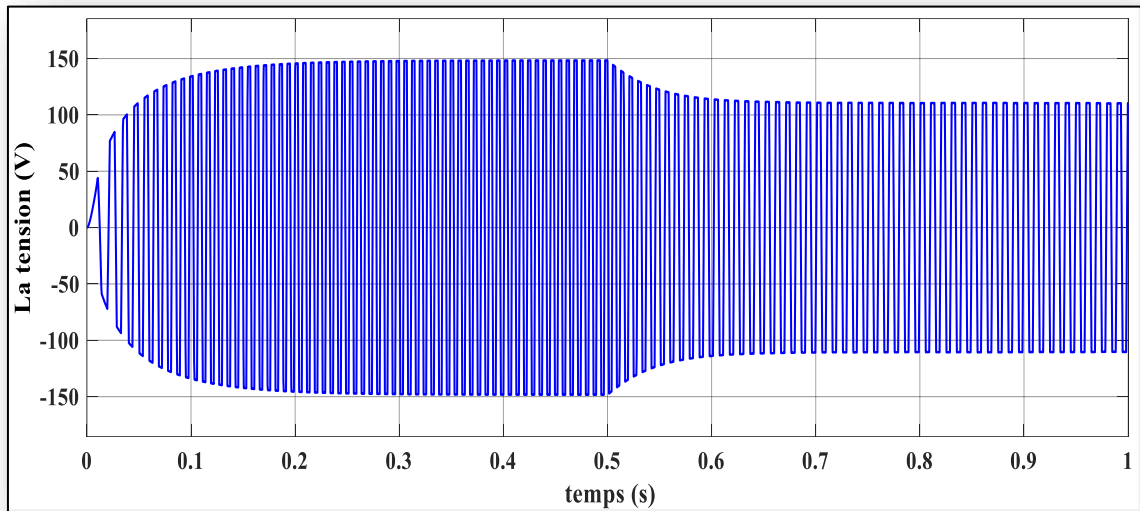


Figure II. 13: Evolution de la tension.

La (figure II.14) montre la courbe de la tension, avant le temps 0.5s la tension augmente jusqu'à 150V mais après 0.5s lorsqu'on applique un couple résistant la tension diminue jusqu'à 110V.

II.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a vu la description et le fonctionnement du moteur BLDC, nous avons abordé les modèles analytiques basés sur des équations électriques et mécaniques du moteur BLDC avec une modélisation de l'onduleur, puis on a simulé le modèle du moteur BLDC et nous présentons les résultats de la simulation.

Le chapitre suivant on va parler du régulateur pour contrôler la vitesse du moteur.

*Chapitre III : Dimensionnement des
régulateurs*

III.1 INTRODUCTION

Le moteur BLDC est largement utilisé dans des applications telles que les appareils ménagers, les automobiles, les équipements industriels automatisés, etc. En raison de ses avantages ont été discutés dans le premier chapitre. Ce type de moteur est commuté électriquement par des interrupteurs de puissance plutôt que par des balais par rapport à un moteur à courant continu à balais ou à un moteur asynchrone. Malgré l'efficacité et les avantages d'un moteur BLDC, ses applications nécessitent un contrôle précis de la vitesse, c'est pourquoi les régulateurs de vitesse PI sont utilisés. Par conséquent, ce chapitre est consacré à l'étude de la stratégie de contrôle de la vitesse du moteur BLDC et du contrôle de la vitesse par les régulateurs PI fractionnaire.

III.2 LE PRINCIPE DE CONTROLE DE VITESSE DES MOTEURS BLDC

Le principe de contrôle de vitesse des moteurs BLDC repose généralement sur l'utilisation de dispositifs électroniques de commande. Voici les principaux éléments impliqués dans ce processus :

- **Capteurs de position** : Les moteurs sans balais sont généralement équipés de capteurs de position qui fournissent des informations sur la position actuelle du rotor. Ces capteurs peuvent être des capteurs Hall ou des encodeurs optiques.
- **Contrôleur électronique** : Un contrôleur électronique, souvent appelé un "ESC" (Electronic Speed Controller), reçoit les signaux des capteurs de position et ajuste le courant envoyé aux enroulements du moteur en conséquence. Le contrôleur détermine la vitesse et la direction du moteur en contrôlant la séquence de commutation des transistors de puissance.
- **Pulse Width Modulation (PWM)** : La vitesse du moteur est généralement contrôlée en modulant la largeur des impulsions d'un signal PWM envoyé par le contrôleur électronique aux transistors de puissance. En ajustant le rapport cyclique du signal PWM (c'est-à-dire la proportion de temps pendant lequel le signal est à l'état haut par rapport à la période totale), la vitesse du moteur peut être contrôlée avec précision.
- **Feedback** : Dans certains systèmes, un retour d'information est utilisé pour ajuster la vitesse du moteur en fonction des conditions réelles. Cela peut être réalisé en mesurant la vitesse de rotation à l'aide d'un encodeur ou en surveillant d'autres paramètres tels que le courant et la tension. [16]

En combinant ces éléments, il est possible de contrôler avec précision la vitesse des moteurs sans balais dans une large gamme d'applications, allant des drones et des modèles réduits aux outils électriques et aux véhicules électriques.

III.3 LE CONTROLEUR PI

Le contrôleur PI est sans aucun doute l'algorithme de contrôle le plus populaire dans l'industrie du contrôle de processus (Yamamoto et Hashimoto, 1991). La raison principale est sa structure relativement simple, qui peut être facilement comprise et mise en œuvre dans la pratique [17].

Ce type de correcteur a une action intégrale à basse fréquence et une action proportionnelle à haute fréquence. Le comportement basse fréquence annule l'erreur statique, de sorte que le gain intégral, dans ce contexte, a tendance à être infini. La correction PI est particulièrement appréciée en pratique pour la précision et la durabilité d'un système d'asservissement.

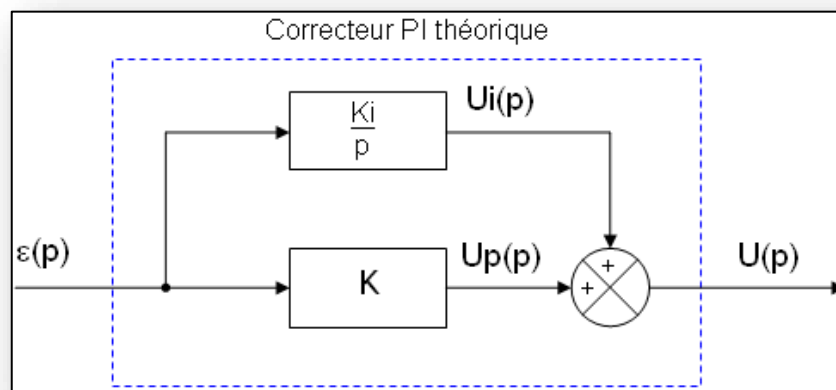


Figure III. 1 : Schéma de régulation PI

III.3.1 Régulateur à Action Proportionnelle (P)

Il permet de générer une commande $u(t)$ proportionnellement à l'écart $\varepsilon(t)$.

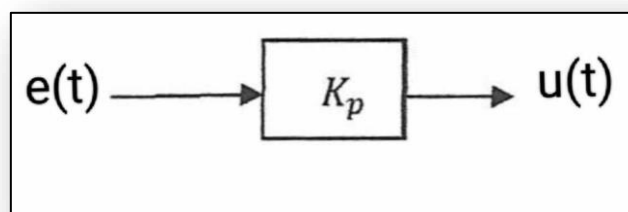


Figure III. 2 : Schéma fonctionnel d'un régulateur P

- La loi de commande : $U(t) = K_p \varepsilon(t)$ avec K_p est le gain proportionnel
- La fonction de transfert : $H(p) = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = K_p$

Le régulateur à action proportionnelle, ou régulateur P, a une action simple et naturelle, puisqu'il construit une commande $u(t)$ proportionnelle à l'erreur $\varepsilon(p)$. Sa commande ne dépend pas du passé, ni d'une tendance, mais simplement de ce qui passe à l'instant présent.

- L'action Proportionnelle corrige de manière instantanée, donc rapide, tout écart de la grandeur à régler. Il permet donc d'améliorer notablement la précision
- L'effet d'une augmentation du gain entraîne une diminution de l'erreur statique, rend le système plus rapide mais augmente l'instabilité du système
- Il permet le réglage du gain et de phase
- Augmente la bande passante du système, ce qui améliore la rapidité du système et augmente l'instabilité du système. [35]

- **Réalisation électronique du régulateur P :**

Le régulateur proportionnel peut être réalisé par des composants électroniques sous la forme suivante :

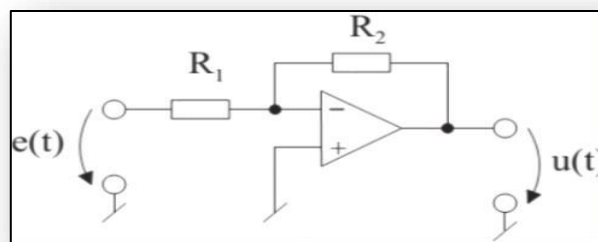


Figure III. 3: Exemple de réalisation électronique du régulateur P

La fonction de transfert est donnée par : $H(p) = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = -\frac{R_2}{R_1} = K_p$

III.3.2 Régulateur à Action Intégrale (I)

Ce type de régulateur permet de générer une commande à partir de l'intégrale de l'erreur.

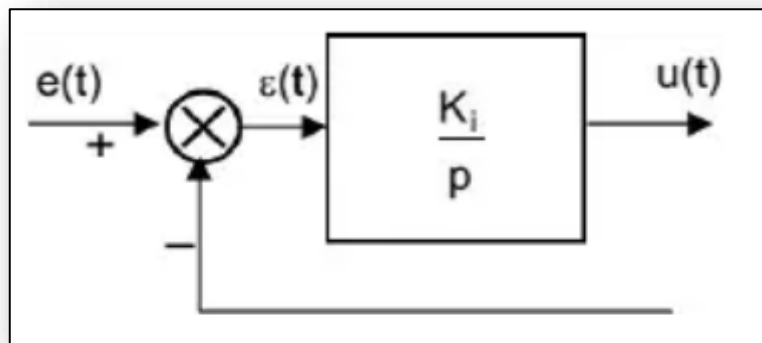


Figure III. 4: Régulateur I

- La loi de commande : $u(t) = K_i \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau = \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau$
- La fonction de transfert : $H(p) = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{1}{T_{ip}} = \frac{K_i}{p}$

T_i : Constante de temps d'intégration

K_i : Le gain intégral

Cette action calcule sa contribution à la commande en n'utilisant pas l'écart instantané mais une mémoire des écarts intervenus lors des précédents instants. Ceci permet d'éliminer à la fois les erreurs statiques trop petites pour que l'action proportionnelle les contre et les erreurs de suivi de consignes en pente. L'action intégrale agit proportionnellement à la surface de l'écart, et elle poursuit son action tant que l'écart n'est pas nul. On dit que l'action intégrale donne la précision statique. Il permet :

- D'améliorer la précision en réduisant ou annulant l'erreur statique
- D'accélère la réponse du système
- Plus l'action intégrale est élevée (T_i petit), plus la réponse s'accélère et plus la stabilité se dégrade (provoque des oscillations et du fort dépassement).

Le correcteur à action Intégrale pure n'est pratiquement jamais utilisé, en raison son effet déstabilisant. Il est, en général, associé au correcteur Proportionnel. [36]

- Réalisation électronique du régulateur I :

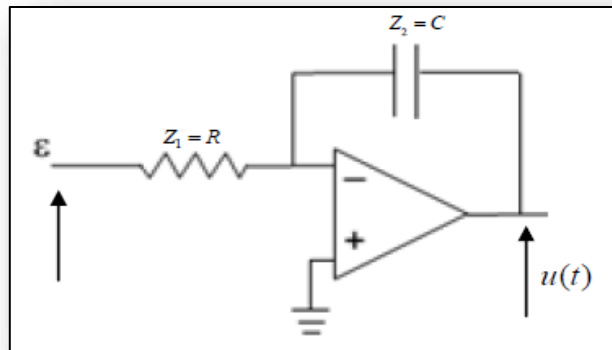


Figure III. 5: Exemple de réalisation électronique du régulateur I

La fonction de transfert est donnée par : $H(p) = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = -\frac{1}{RCp} = -\frac{K_i}{p}$

III.3.3 Régulateur à Action Proportionnelle-Intégrale (PI)

Le régulateur PI est le régulateur le plus utilisé en pratique où ses contributions à la précision mais aussi à la robustesse du système sont particulièrement appréciées.

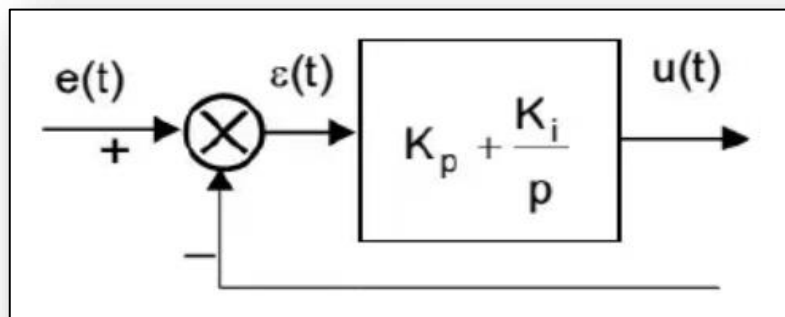


Figure III. 6 : régulateur PI

- La loi de commande : $u(t) = K_p \varepsilon(t) + K_i \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau$
- La fonction de transfert : $H(p) = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = K_p + \frac{1}{T_{ip} p} = K_p + \frac{K_i}{p}$

On distingue deux structures : série et parallèle

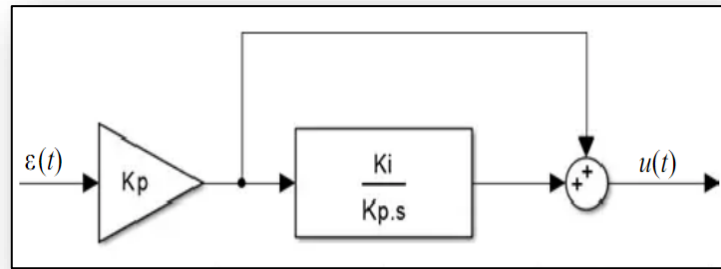


Figure III. 7: Structure en série du régulateur PI

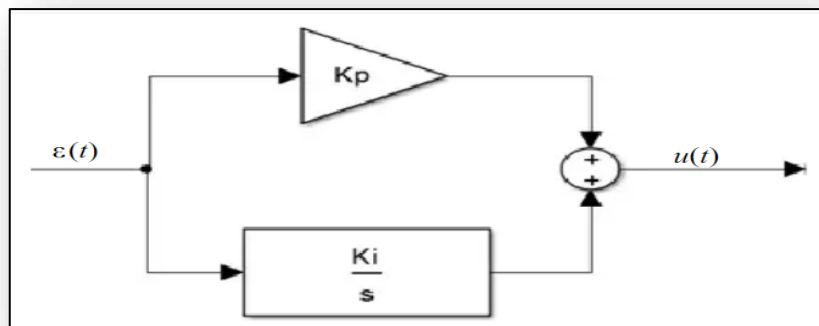


Figure III. 8: Structure en parallèle du régulateur PI

Le régulateur PI assure une transmission instantanée du signal d'erreur $\varepsilon(t)$, suivi d'une intégration de ce signal.

- Ce correcteur est utilisé chaque fois qu'une erreur permanente doit être annulée ou minimisée, c'est à dire une amélioration de la précision du système.
- Il introduit une augmentation du gain global du système aux basses fréquences.
- **Réalisation électronique du régulateur PI :**

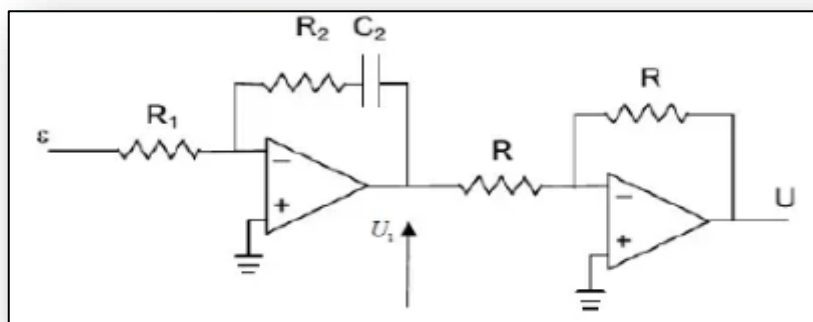


Figure III. 9: Exemple de réalisation électronique du régulateur PI

III.4 LE CALCUL D'ORDRE FRACTIONNAIRE

Le calcul d'ordre fractionnaire est le domaine des mathématiques qui traite l'étude et l'application des intégrales et dérivées d'ordre arbitraire. Pendant les deux dernières décennies le calcul d'ordre fractionnaire a été appliqué presque à chaque domaine de la science, l'ingénierie, et les mathématiques.

Le calcul d'ordre fractionnaire a fait un impact profond dans presque tous les domaines, génie électrique, électrochimie, biologie, biophysique et technologie biologique, traitement de signal et d'image, mécanique, mécatronique, physique, et surtout dans le domaine de la théorie de commande. [37]

III.4.1 Les opérateurs d'ordre fractionnaires

Le calcul fractionnaire est une généralisation de l'intégration et de la différentiation à l'opérateur fondamental d'ordre non entier $t_0 D_t^\alpha$. Où t_0 et t sont des limites de l'opération. L'opérateur différentiel et intégral continu est défini comme [18] :

$$t_0 D_t^\alpha = \begin{cases} \frac{d^\alpha}{dt^\alpha} & \alpha > 0 \\ 1 & \alpha = 0 \\ \int_{t_0}^t (dt)^{-\alpha} & \alpha < 0 \end{cases} \quad (23)$$

Où $\alpha \in R$ est l'ordre de l'opération. On rencontre plusieurs définitions mathématiques pour l'intégration et la dérivation d'ordre fractionnaire.

III.4.1.1 Définition de Riemann-Liouville (R-L)

Soient $\alpha \in R^+$ et $t_0 \in Ret$ f est une fonction localement intégrable définie sur $[t_0 + \infty)$ L'intégrale d'ordre α de f de borne inférieure t est définie par : [18]

$${}^{RL}I_{t_0}^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_{t_0}^t (t - \tau)^{\alpha-1} f(\tau) d\tau \quad (24)$$

Avec $t \geq t_0$ et Γ est la fonction gamma d'Euler défini par :

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty e^{-y} y^{\alpha-1} dy \quad (25)$$

III.4.1.2 Définition de Caputo

A la fin des années 60, dans le cadre de ses travaux sur la dissipation dans un matériau viscoélastique linéaire, Caputo a introduit une autre définition de la dérivation d'ordre fractionnaire comme suit : [18]

$${}_{t_0}^C D_t^\alpha f(t) = I^{n-\alpha} D^n f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \int_{t_0}^t \frac{f^{(n)}(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-n+1}} d\tau \quad (26)$$

Cette définition peut être formulée également en fonction de la définition de Riemann-Liouville comme suit :

$${}_{t_0}^{RL} D_t^\alpha f(t) + \sum_{k=0}^{n-1} \frac{t^{k-\alpha}}{\Gamma(k-\alpha+1)} f^{(k)}(0^+) \quad (27)$$

III.4.1.3 Définition de Grunwald-Leitnikov (G-L)

La dérivée d'ordre fractionnaire pour $\alpha > 0$ de G-L est donnée par [18] :

$${}_{t_0}^{GL} D_t^\alpha f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^\alpha} \sum_{k=0}^{\lfloor \frac{t-t_0}{h} \rfloor} (-1)^k \binom{\alpha}{k} f(t - k \cdot h) \quad (28)$$

Où $\lfloor \cdot \rfloor$ dénote la partie entière d'un nombre réel, h est la période d'échantillonnage et les coefficients $\binom{\alpha}{k}$ sont donnés par :

$$\binom{\alpha}{k} = \frac{\Gamma(\alpha+1)}{\Gamma(k+1) \cdot \Gamma(\alpha-k+1)} \quad (29)$$

III.5 LES CORRECTEURS FRACTIONNAIRES

Les correcteurs d'ordre fractionnaire sont des correcteurs basés sur trois actions proportionnelles, intégrales et dérivées dont l'ordre d'intégration et de dérivation est réel et pas forcément un entier.

- **Principe :**

Par comparaison aux correcteurs classiques, les correcteurs d'ordre fractionnaires possèdent en plus deux autres paramètres notés μ et λ qui présentent l'ordre d'intégration et de dérivation respectivement. Suivant la variation de ces deux paramètres, on peut distinguer différentes possibilités des correcteurs d'ordre fractionnaire [19]

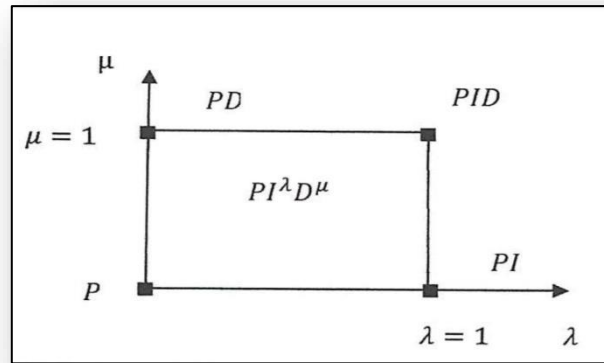


Figure III. 10: Possibilités des correcteurs à trois actions

D'après cette figure, on peut donner les cas suivants :

- Lorsque $\lambda = 0$ et $\mu = 0$ on a un correcteur P classique.
- Lorsque $\lambda = 1$ et $\mu = 0$ on a un correcteur PI classique.
- Lorsque $\lambda = 0$ et $\mu = 1$ on a un correcteur PD classique.
- Lorsque $\lambda = 1$ et $\mu = 1$ on a un correcteur PID classique.
- Lorsque $0 < \lambda < 1$ et $\mu = 0$ on a un correcteur **PI fractionnaire**.
- Lorsque $\lambda = 0$ et $0 < \mu < 1$ on a un correcteur PD fractionnaire.
- Lorsque $0 < \lambda < 1$ et $0 < \mu < 1$ on a un correcteur PID fractionnaire.

D'après ces résultats, on constate que les correcteurs classiques sont des cas particuliers des correcteurs d'ordre fractionnaires.

III.5.1 Correcteur PI fractionnaire (PI^λ)

Un régulateur PI fractionnaire est une extension du régulateur proportionnel-intégral (PI) classique, où le terme intégral est remplacé par une intégrale de type fractal ou fractionnaire. Contrairement à un régulateur PI standard, qui utilise une intégrale ordinaire, un régulateur PI fractionnaire utilise une intégrale de type fractal pour prendre en compte les caractéristiques non linéaires et les comportements complexes des systèmes dynamiques.

Les régulateurs PI fractionnaires sont utilisés dans divers domaines de l'ingénierie et du contrôle des systèmes où les systèmes présentent des comportements non linéaires ou des retards importants. Ils peuvent offrir une meilleure précision de contrôle et une plus grande robustesse par rapport aux régulateurs PI traditionnels. [38]

La loi de commande d'un correcteur PI fractionnaire est donné par :

$$u(t) = k_p + k_p \frac{D_t^{-\lambda}}{T_i} \quad (30)$$

Par transformé de Laplace, on obtient la fonction de transfert suivante :

$$C(p) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i p^\lambda} \right) \quad (31)$$

Avec :

k le gain proportionnel

T_i Constant de temps de l'action intégral

λ Ordre d'intégration

La réponse fréquentielle est caractérisée par l'amplitude et la phase suivant :

- L'amplitude :

$$|C(j\omega)| = \frac{k_p \left[\left(1 + T_i \omega^\lambda \cos\left(\lambda \frac{\pi}{2}\right) \right)^2 + \left(T_i \omega^\lambda \sin\left(\lambda \frac{\pi}{2}\right) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{T_i \omega^\lambda} \quad (32)$$

- La phase :

$$\arg(C(\omega)) = \arctan\left(\frac{\omega^\lambda \sin\left(\lambda \frac{\pi}{2}\right)}{1 + \omega^\lambda \cos\left(\lambda \frac{\pi}{2}\right)}\right) - T_i \lambda \frac{\pi}{2} \quad (33)$$

Schéma d'un correcteur PI fractionnaire :

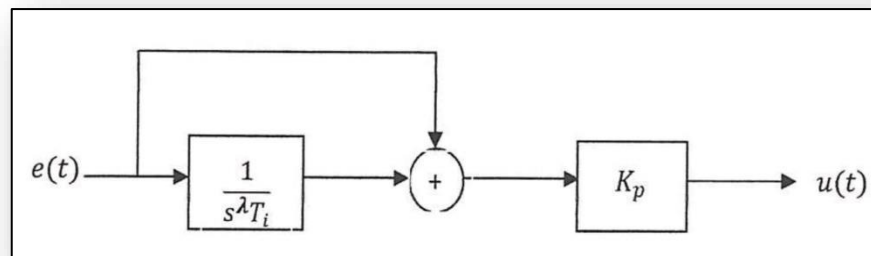


Figure III. 11: Schéma fonctionnel d'un régulateur PI^λ

L'avantage principal d'un correcteur PI fractionnaire est de permettre d'avoir un système plus robuste aux variations du gain (avoir même dépassement).

III.6 LA DIFFERENCE ENTRE LE PI STANDARD ET LE PI FRACTIONNAIRE

- Cinq spécifications différentes peuvent être atteintes, ce qui n'est pas possible dans le cas du contrôleur PID classique ce qui donne une grande flexibilité.
- Le contrôleur PID fractionnaire peut facilement atteindre la propriété d'iso amortissement, par rapport au contrôleur PID classique.
- Pour les systèmes d'ordre supérieur, les performances du contrôleur PID classique se détériorent, tandis que le contrôleur PID fractionnaire fournit de meilleurs résultats.
- Pour un système à long retard, un contrôleur PID fractionnaire fournit de meilleurs résultats que le contrôleur PID.
- Un contrôleur PID classique offre une stabilité moins robuste, alors que le contrôleur PID fractionnel est plus robuste et stable.
- Généralement, un système non linéaire est linéaire à différents points de fonctionnement, et les contrôleurs sont conçus pour différents points de fonctionnement, alors qu'un seul contrôleur PID fractionnaire est suffisant pour un système non linéaire. [39]

III.7 OPTIMISATION PAR ESSAIM PARTICULAIRE (PSO) :

L'optimisation par essaim particulaire (PSO), est un algorithme évolutionnaire qui utilise une population de solutions candidates pour développer une solution optimale au problème. Cet algorithme a été proposé par Russel Eberhart (ingénieur en électricité) et James Kennedy (socio-psychologue) en 1995. Il s'inspire à l'origine du monde du vivant, plus précisément du comportement social des animaux évoluant en essaim, tels que les bancs de poissons et les vols groupés d'oiseaux. [20]

Dans l'algorithme PSO de base, chaque particule i a deux équations de base qui sont la mise à jour de la vitesse et la mise à jour de la position comme présenté ci-dessous [21] :

- **La vitesse :**

$$V_{ij}(t) = w \cdot V_{ij}(t-1) + c_1 r_1 (P_{ijbest}(t-1) - X_{ij}(t-1)) + c_2 r_2 (G_{ijbest}(t-1) - X_{ij}(t-1)) \quad (34)$$

$$\text{Avec : } j \in \{1 \dots D\}, i \in \{1 \dots P\}$$

- **La position :**

$$X_{ij}(t) = X_{ij}(t_1 - 1) + V_{ij}(t) \quad (35)$$

$$j \in \{1 \dots D\}$$

Où:

$V_{ij}(t_1 - 1)$: est la vitesse actuelle de la particule.

$V_{ij}(t)$: est la vitesse mise à jour de la particule.

$X_{ij}(t_1 - 1)$: est la position actuelle de la particule.

$X_{ij}(t)$: est la position mise à jour de la particule.

r_1 et r_2 : sont des nombres aléatoires compris entre $\{0,1\}$.

c_1 : est le coefficient cognitif (généralement 2,0) et c_2 : est le coefficient social (typiquement 1,8).

w : est le coefficient de masse d'inertie (généralement 0,7).

Le coefficient d'inertie peut être variable selon [22] [23] :

$$w = w_{max} - \left(\frac{w_{max} - w_{min}}{k_{max}} \right) \times k \quad (36)$$

Où : k_{max} , k sont respectivement le nombre maximum des itérations et le nombre d'itération courante.

w_{max} , w_{min} sont respectivement les coefficients minimum et maximum d'inertie.

III.7.1 Principe de fonctionnement de PSO

La position de la particule est mise à jour en utilisant sa position et sa vitesse actuelles. La mise à jour de la vitesse est basée sur la meilleure position de particule mémorisée (meilleure position locale) et la meilleure position de ses voisins (meilleure position globale), de sorte que les ajustements de position de chaque particule seront basés sur l'apprentissage historique de sa trajectoire et des meilleures positions voisines.

Soit $f(x)$ la fonction objective à optimiser (fitness) et n le nombre de particules. Les étapes essentielles de l'optimisation par PSO sont présentées par l'algorithme suivant :

Etape 1 : initialiser une population de particules et de vitesses d'une façon aléatoire, uniformément réparties à l'intérieur de l'espace de recherche D prédéterminé, et fixer le critère d'arrêt.

Etape 2 : évaluer la fonction objective, pour chaque particule.

Etape 3 : mise à jour de la vitesse : à chaque itération, les vitesses de toutes les particules sont mises à jour selon l'équation (34). Si la nouvelle valeur de vitesse de particule excède les limites prédéterminées, appliquer la stratégie de confinement de la vitesse.

Etape 4 : mise à jour de la position : à chaque itération, les positions de toutes les particules sont mises à jour selon l'équation (35).

Etape 5 : mise à jour du coefficient d'inertie : à chaque itération, le coefficient d'inertie est mis à jour selon une loi décroissant de l'équation (36).

Etape 6 : mise à jour des meilleures particules : à chaque itération, mettre à jour la meilleure position atteinte personnellement (P_{best}) et la meilleure position atteinte par l'essaim (G_{best}) lorsque la condition est remplie.

Etape 7 : vérifier le critère d'arrêt : répéter les étapes 3 à 6 jusqu'à ce que le critère d'arrêt (nombre maximum d'itérations atteint) soit satisfait.

L'organigramme de la norme PSO est présenté par la Figure III.12.

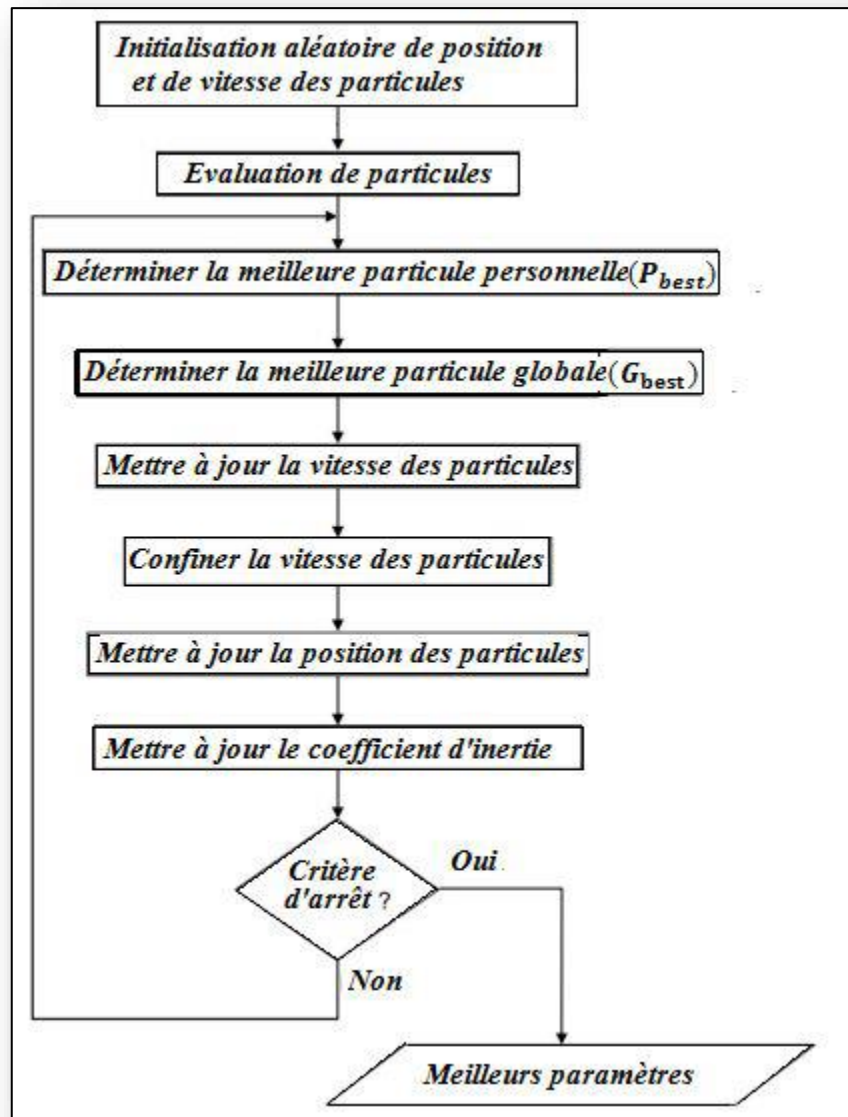


Figure III. 12: Organigramme de l'algorithme de PSO utilisé.

III.8 CONCLUSION

Les régulateurs sont des dispositifs utilisés pour contrôler ou stabiliser une grandeur électrique telle que la tension, le courant, la vitesse, etc. Dans ce chapitre, nous avons discuté de régulateur PI standard et de régulateur PI fractionnaire et on a vu aussi l'algorithme PSO et son fonctionnement pour optimiser les paramètres du régulateur PI fractionnaire qui sera utilisé dans le dernier chapitre.

*Chapitre IV : Contrôle de la vitesse du
moteur BLDC à l'aide de régulateur PI
fractionnel*

IV.1 INTRODUCTION

Un moteur BLDC (Brushless DC) est un type de moteur électrique qui est alimenté par un courant continu (DC) mais qui fonctionne sans balais. Ces moteurs sont largement utilisés dans des nombreuses applications, telles que les véhicules électriques.

Les véhicules électriques (VEs) ont commencé à être largement utilisés dans de nombreux pays du monde. Les performances des VEs dépendent de différents paramètres tels que le design extérieur, les technologies du moteur et celles de la batterie. L'amélioration des performances des VEs est devenue un défi de plus en plus important pour la communauté des chercheurs.

Pour alimenter un moteur BLDC dans un VE, nous avons besoin d'un convertisseur DC-DC (hacheur) pour réguler la tension fournie au moteur qui permet un contrôle précis de la vitesse de ce véhicule.

IV.2 HISTORIQUE DU VEHICULE ELECTRIQUE

L'évolution de l'industrie automobile électrique remonte à l'époque entre 1830 et 1900. En 1899 et 1901, la voiture entièrement électrique, nommée la « Jamais contente », a atteint une vitesse de 105 km/h et une autonomie de 307 km. Malgré cela, les véhicules électriques ont été mis de côté en raison de certaines limitations, telles que :

- le coût élevé de la construction.
- leur faible autonomie par rapport aux véhicules fonctionnant au carburant.
- le temps de charge de la batterie par rapport à celui de ravitaillement aux stations d'essence [24].

C'est jusqu'à la dernière décennie que les véhicules électriques ont suscité un intérêt croissant dans les domaines de l'industrie et de la recherche en raison de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre et du manque de ressources naturelles. Parallèlement, l'évolution technologique dans différents domaines, notamment en ce qui concerne les algorithmes de charge rapide, ainsi que les batteries adaptées à cet usage [25].

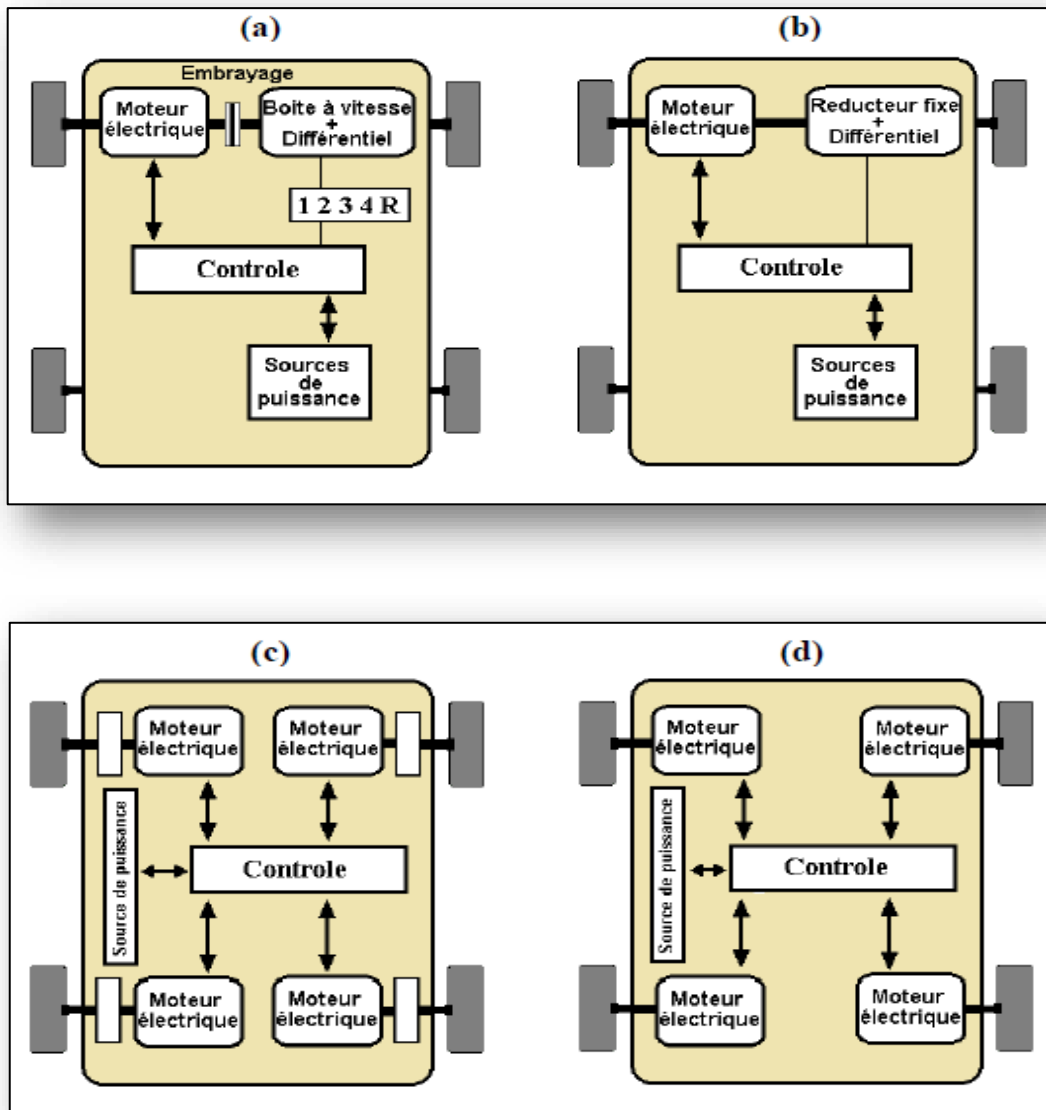


Figure IV. 1 : Transmission mécanique dans les véhicules électriques : (a) Un seul moteur avec boîte de vitesses ; (b) Un seul moteur avec réducteur de vitesse ; (c) Entraînement multimoteur avec réducteur ; (d) Entraînement multimoteur direct.

IV.2.1 Caractéristiques Des Véhicules Electriques

- **Source d'énergie** : Les VE utilisent l'électricité stockée dans des batteries rechargeables pour alimenter un ou plusieurs moteurs électriques.
- **Moteur électrique** : Ils sont équipés de moteurs électriques (souvent des moteurs BLDC) qui convertissent l'énergie électrique en énergie mécanique pour propulser le véhicule.

- **Absence de combustion interne** : Contrairement aux véhicules à moteur à combustion interne (ICE), les VE n'ont pas de moteur à essence ou diesel, ce qui réduit les émissions de gaz à effet de serre et les polluants locaux.
- **Recharge** : Les batteries des VE se rechargent via des prises électriques domestiques, des bornes de recharge publiques, ou des infrastructures de recharge rapide.

Les véhicules électriques ont une source d'énergie constante (batterie), pour augmenter ou diminuer la vitesse de VE on va changer la tension de la source par un hacheur.

IV.3 LES CONVERTISSEURS DC-DC (HACHEURS)

Les hacheurs, ou convertisseurs à découpage, sont en effet des convertisseurs statiques DC-DC utilisés pour obtenir une tension continue régulée à partir d'une source de tension continue ils sont largement utilisés dans les applications où une conversion de tension efficace est nécessaire, comme dans les systèmes d'alimentation des appareils électroniques, les véhicules électriques, les énergies renouvelables, etc.

Il existe trois types d'hacheur :

- Convertisseur Buck (abaisseur ou dévolteur ou série)
- Convertisseur Boost (élevateur ou survolteur ou parallèle)
- Convertisseur Buck-Boost (élevateur-abaisseur ou Hacheur à accumulation inductive)

IV.3.1 Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost)

Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse. Le fonctionnement d'un convertisseur Buck-Boost peut être divisé en deux configurations suivant l'état de l'interrupteur S :

- Dans l'état passant, l'interrupteur S est fermé, conduisant ainsi à une augmentation de l'énergie stockée dans l'inductance.
- Dans l'état bloqué, l'interrupteur S est ouvert. L'inductance est reliée à la charge et à la capacité. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité et la charge.

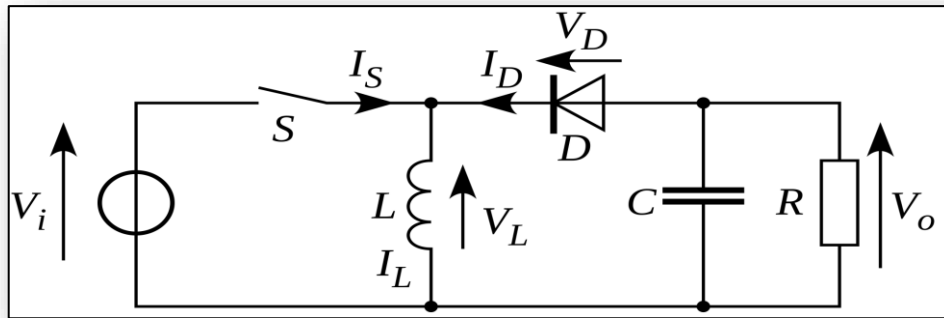


Figure IV. 2: Circuit équivalent d'un hacheur BUCK-BOOST

Le circuit est alimenté par une source de tension V_i , la sortie étant une charge résistive R et débite un courant I_s .

L'interrupteur S , symbolisé ici comme un IGBT ou MOSFET de puissance, est rendu périodiquement conducteur avec un rapport cyclique (α) à la fréquence ($F=1/T$).

Par un tel convertisseur, on cherche à fixer une tension moyenne V_s de sortie qui réponde aux critères suivants :

Durant l'état « S on », l'énergie apportée par la source (V_i) est stockée dans l'inductance L . Cette énergie est livrée ensuite à la charge pendant l'état « S off ». En raison de la présence de la diode D , le courant circule à travers l'inductance L seulement dans une direction durant les deux états. Par conséquent, V_o a une polarité opposée à V_i . Pour cette raison, ce circuit est aussi appelé convertisseur inverseur. L'amplitude de V_o peut être inférieure ou supérieure à celle de V_i suivant la valeur de S on et de S off.

On obtient les équations suivantes :

$$V_o = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \times V_i$$

$$I_s = (1 - \alpha) \times I_L$$

La tension de sortie est inférieure à celle de l'entrée lorsque le rapport cyclique est inférieur à un demi ($\alpha < 1/2$) et elle est supérieure à celle-ci dans le cas contraire. [26]

IV.4 SIMULATION

Paramètres du moteur BLDC (Bosch SE-B2.040.060)

Tableau IV.1 : Paramètre du moteur BLDC.

$R = 2.875 \Omega$	Résistance des enroulements statorique.
$L_w = 8.5 \cdot 10^{-3} \text{ H}$	Inductance cyclique des enroulements statorique.
$\phi_f = 0.2158 \text{ Wb}$	Flux des aimants.
$J = 9 \cdot 10^{-3} \text{ kg.m}^2$	Inertie du rotor.
$f = 2 \cdot 10^{-3} \text{ N.s/rad}$	Coefficient de frottement.
$p = 4$ pole pairs	Nombre de paires de pôles.
$K_t = 1.2 \text{ N.m/A}$	Constante de couple.
Rated current = 9.7 A	Courant nominal.
Rated voltage = 380 V	Tension entre phases nominale.
Peak current = 58 A	Courant maximum.

Pour l'optimisation des valeurs de régulateur PI fractionnaire avec l'algorithme PSO on a exécuté le programme de PSO et le critère ITAE (Integral of Time multiplied Absolute Error)

Le critère ITAE évalue l'intégrale du produit de l'erreur absolue par le temps, donnant plus de poids aux erreurs survenues tôt dans la simulation. Cela peut aider à accélérer la réponse du système et à réduire le temps de régulation. L'ITAE est défini par :

$$ITAE = \int_0^{t_f} t \cdot |e(t)| dt$$

Paramètre de PSO :

Tableau IV.2 : Paramètre de PSO

NVAR = 3	nombre de variable.
NoP = 10	nombre de particule.
MaxIter = 40	nombre d'itération.

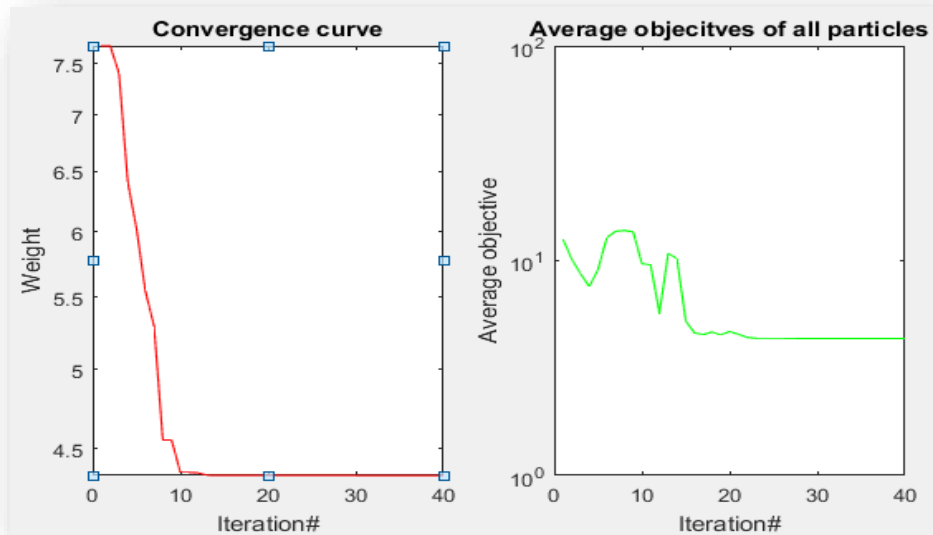


Figure IV. 3: Opération de calcul l'erreur pour chaque itération

Après l'exécution de programme on trouve que les paramètres de régulateur PI fractionnels K_p , K_i , λ comme suit :

$$K_p = 1.4005$$

$$K_i = 30$$

$$\lambda = 0.97$$

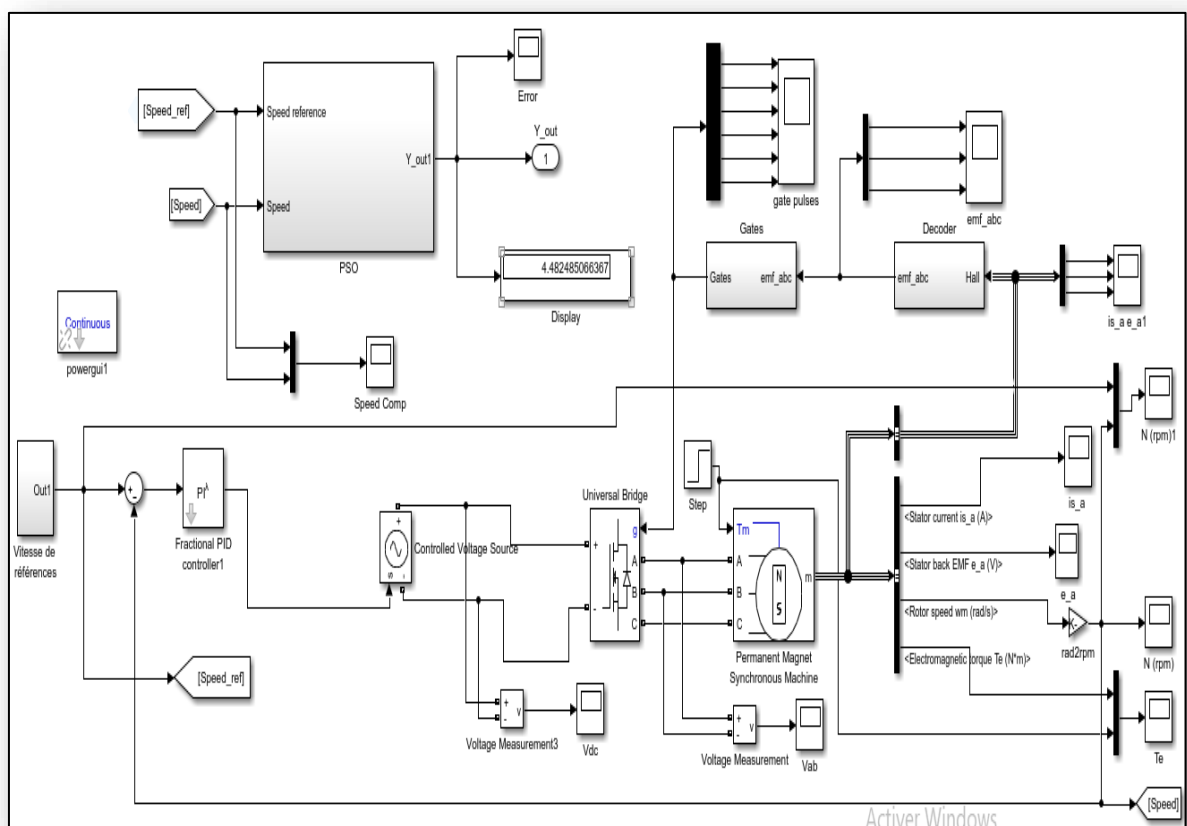


Figure IV. 4: Schéma de la simulation d'un modèle du moteur BLDC avec PSO

IV.4.1 Résultat de la simulation

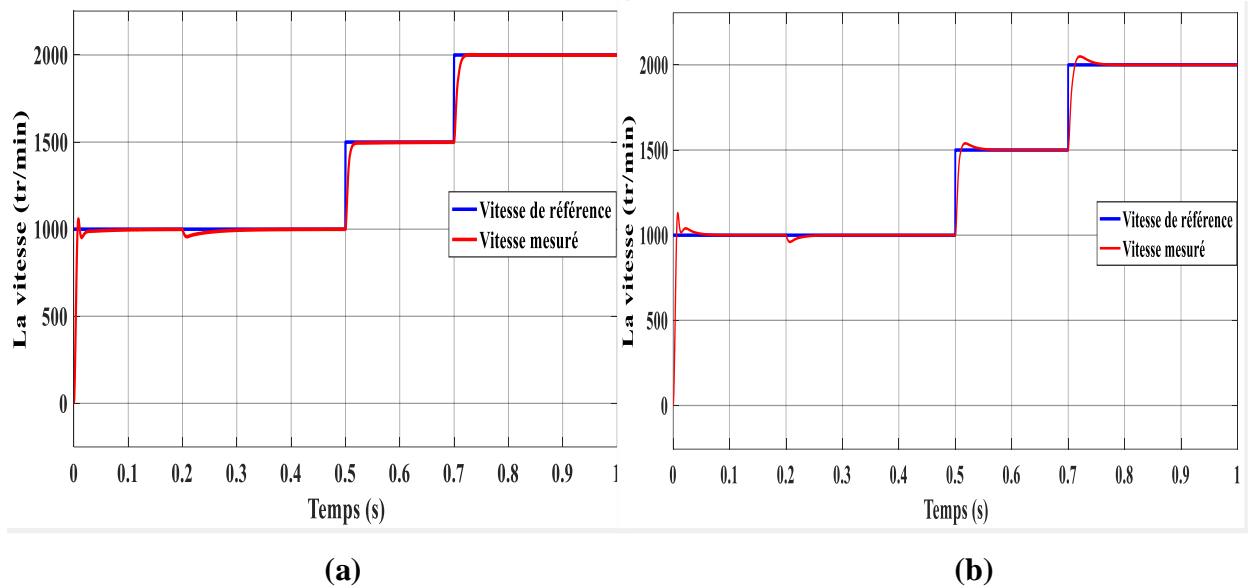


Figure IV. 5: Comparaison de la vitesse du moteur. (a) Vitesse mesuré avec régulateur FOPI ;
(b) Vitesse mesuré avec régulateur PI

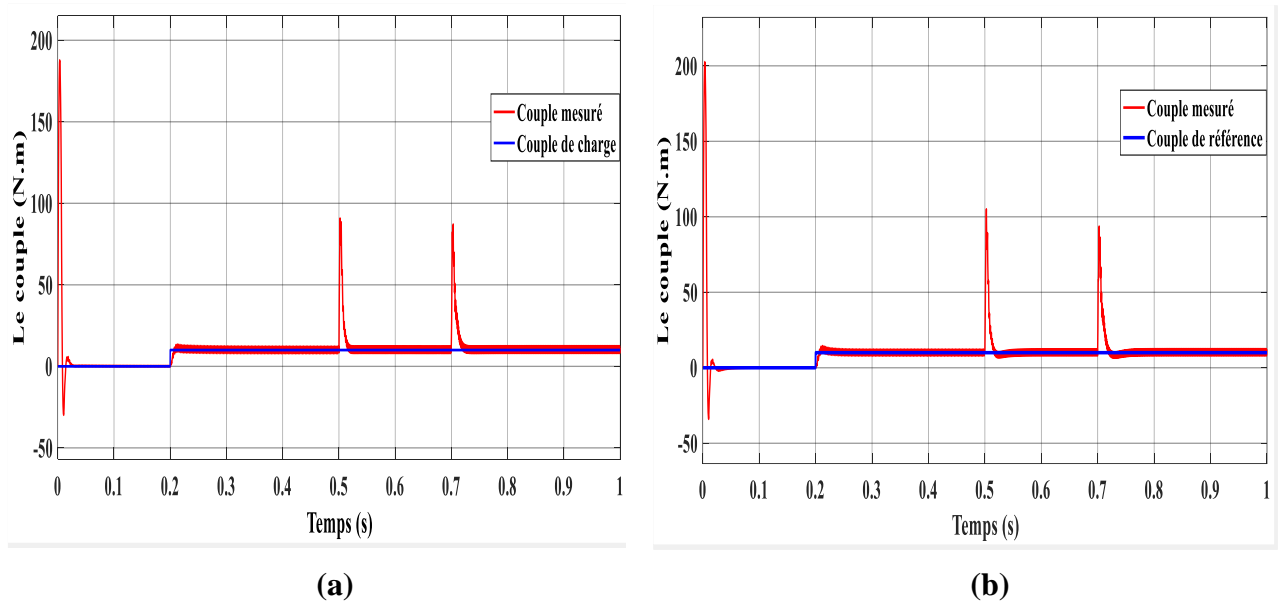
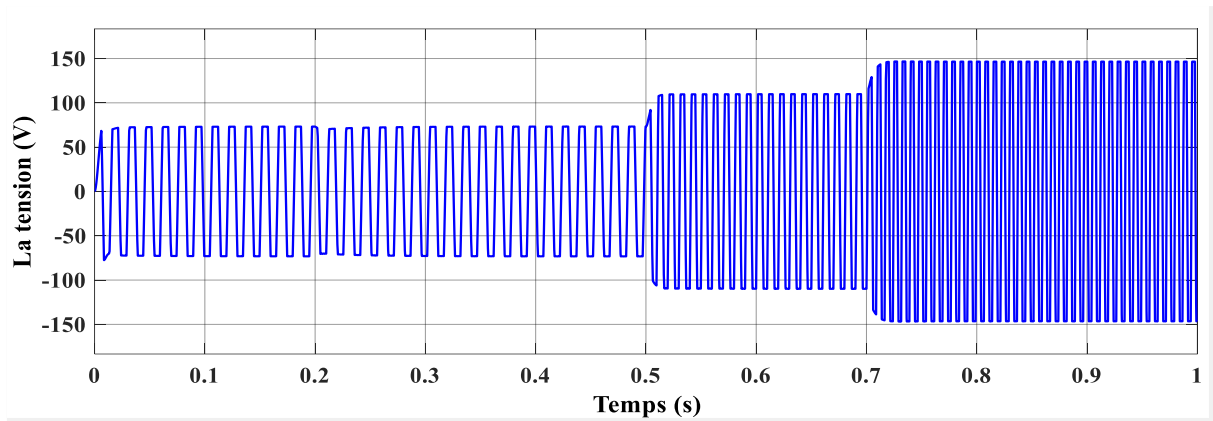
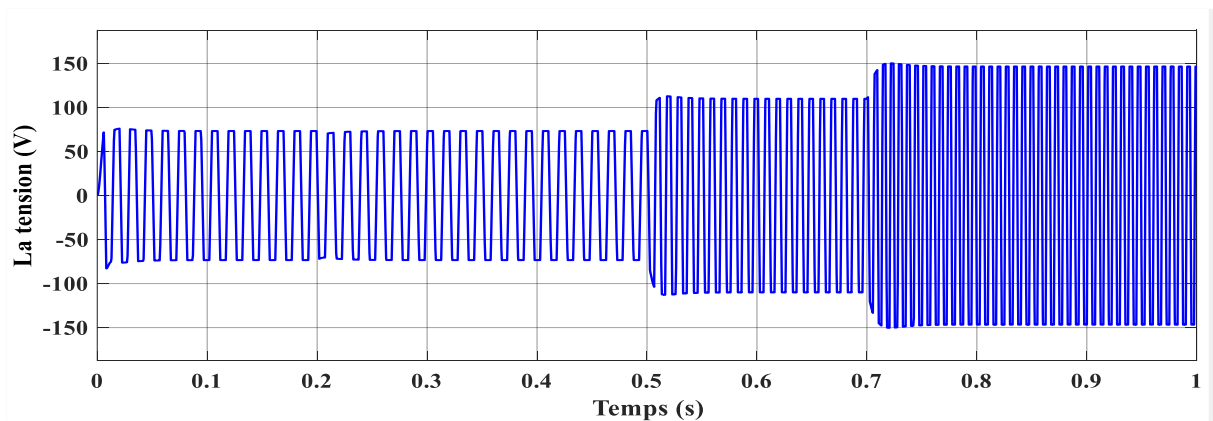


Figure IV. 6: Comparaison de couple du moteur. (a) Couple mesuré avec régulateur FOPI ;(b)
Couple mesuré avec régulateur PI

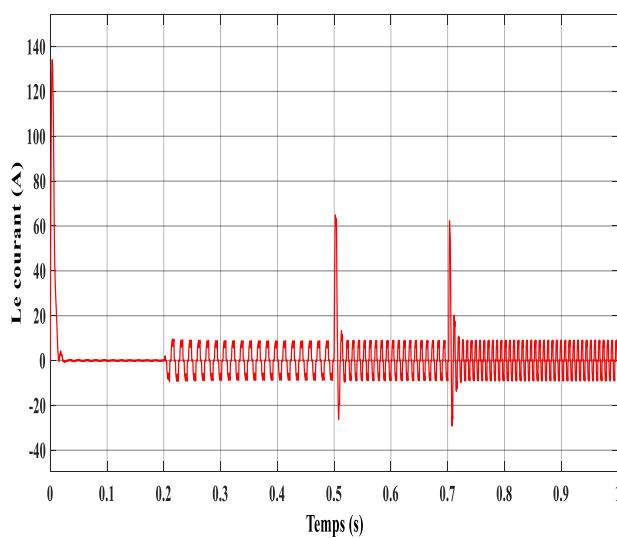


(a)

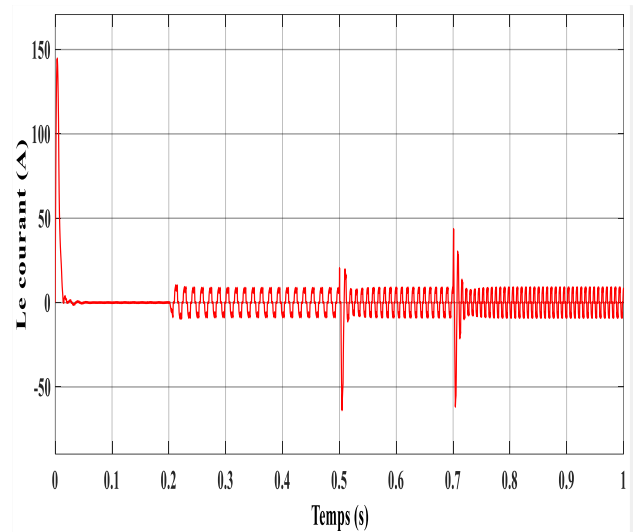


(b)

Figure IV. 7: Comparaison de la tension du moteur. (a) Couple mesuré avec régulateur FOPI ;(b) Couple mesuré avec régulateur PI



(a)



(b)

Figure IV. 8 : Comparaison de courant du moteur. (a) Courant mesuré avec régulateur FOPI ;(b) Courant mesuré avec régulateur PI

IV.4.2 Interprétation des résultats

Les résultats de simulation présentés ci-dessus montre un bon suivi du consigne (Vitesse de rotation) par le moteur BLDC ce qui confirme l'efficacité de la commande utilisée. En effet sur la Figure IV.5 on peut constater que la courbe de la vitesse de rotation est confondue avec sa référence que ce soit à vide (pour $t \in [0, 0.2 \text{ s}]$) ou en charge (pour $t \in [0.2 \text{ s}, 1\text{s}]$) ou encore lors des échelons sur la référence de vitesse où en remarque un bon suivi pour les deux types de régulateurs. Cependant, on constate que pour le régulateur de type fractionnel la réponse aux échelons de vitesse est plus douce, plus rapide et sans dépassement contrairement au régulateur de type entier ou la réponse aux échelons présente certain dépassement de la référence.

La Figure IV.7 présente l'évolution de la tension d'alimentation du moteur BLDC pour les deux types de régulateur sur la quelle on vois la réponse sur la tension d'alimentation lors des échelons sur la vitesse de rotation la variation de la tension est nécessaire pour l'obtention de la vitesse voulue car, pour ce type de moteur, la vitesse de rotation est proportionnelle à la tension d'alimentation. Cependant, la Figure IV.8 montres l'évolution du courant d'alimentation de moteur BLDC sur la quelle on remarque que la valeur du courant varie avec le couple de charge et reste constante lors de la variation de la vitesse de rotation. Effectivement, dans les machines à courant continu, le courant est proportionnel au couple de charge.

IV.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons appliqué la commande en vitesse du moteur BLDC, utilisé dans les véhicules électriques en utilisant deux types de régulateurs. Les résultats de simulations ont montré l'efficacité des deux régulateurs utilisés avec un peut de supériorité de régulateur de type fractionnel par rapport au régulateur proportionnel intégral entier.

La supériorité de régulateur fractionnel vient de sont degré de liberté supplémentaire par rapport au régulateur entier. En effet, le régulateur fractionnel possède trois paramètres de réglage contrairement au régulateur entier qui en possède deux seulement.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Le travail mené dans ce mémoire a porté sur le moteur BLDC. Ce moteur est défini comme un couplage avec un interrupteur électronique et des capteurs de position du rotor. Ce type de moteur présente de bonnes caractéristiques de fonctionnement de haut rendement, de vitesse élevée, de durabilité et de fiabilité électromécanique. Nous avons vu l'origine du moteur sans balais et la description, des applications, avantages et inconvénients du moteur à courant continu sans balais.

Ensuite, on a vu le fonctionnement du moteur BLDC, nous avons abordé les modèles analytiques basés sur des équations électriques et mécaniques du moteur BLDC avec une modélisation du l'onduleur, puis on a simulé le model du moteur BLDC et nous présentons les résultats de la simulation

Et puis, nous avons également vu les régulateurs et comment ils sont utilisés pour contrôler ou stabiliser une grandeur électrique telle que la tension, le courant, la vitesse, etc. Nous avons discuté du régulateur PI standard et du régulateur PI fractionnel et avons également vu l'algorithme PSO et son fonctionnement pour optimiser les paramètres du régulateur PI fractionnel.

Enfin, nous avons vu à quel point les moteurs BLDC constituent un choix idéal pour les véhicules électriques grâce à leur efficacité, leur durabilité et leurs performances. Ils jouent un rôle crucial dans la propulsion et dans divers sous-systèmes des véhicules électriques, contribuant ainsi à une conduite plus efficace et plus fiable. Les voitures électriques ont une source d'alimentation fixe (batterie), et pour augmenter ou diminuer la vitesse de la voiture électrique, nous modifierons la tension de la source à l'aide d'un hacheur comme hacheur Buck-Boost. Puis la simulation avec Matlab/Simulink avec le modèle du convertisseur (Buck-Boost) nous évaluons et comparons également ces performances au régulateur PI et au régulateur PI fractionnel.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] Merzoug Mohammed Salah « Etude comparative des performances d'un DT Cet d'un FOC d'une Machine synchrone a aimants permanents » Thèse Magister, université de Batna 2006.
- [2] <https://robu.in/brushless-dc-motor-working-principle-construction-applications/>
- [3] BROWN W, "Brushless DC Motor Control Made Easy", 2002.
- [4] R. ERROUISSI Contribution à la commande prédictive non linéaire d'une machine synchrone à aimants permanents. Juin 2010, Thèse de L'université du Québec.
- [5] M. Etique « Entraînements Régclés MET2 », Cours, Département D'Electricité et d'Informatique, Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIGVd), 2005.
- [6] H. Aid, W. Aina. Synthèse De Lois de Commande Non-Linéaires Pour Un Entraînement Electrique A Vitesse Variable Basée Sur Un Moteur Synchrone A Aimants Permanents, Mémoire de Master, Université aboubekr belkaid, Tlemcen, 2013.
- [7] [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 (BLDC) pdf
- [8] Chang-liang Xia, « Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls », First Edition, Science Press, John Wiley and Sons, Singapore 2012.
- [9] Modélisation des moteurs Brushless PDF
<https://www.electromecanique.net/2015/01/principe-de-fonctionnement-dun-moteur.html>
- [10] M. Labraga, 'Contribution à la conception d'actionneurs à aimants permanents et commutation électronique fonctionnant à basse vitesse', Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 1992.
- [11] Xiaotian Li, «Model-Based Design of Brushless Dc Motor Control and Motion Control Modeling for Robocop SSL Robots », 2015 Technology and Communication.
- [12] Olivier Tremblay, « Modélisation, Simulation Et Commande De La Machine Synchrone À Aimants À Force Contre-électromotrice Trapézoïdale », Maîtrise En Génie Électrique, Montréal, 8 MAI 2006.

- [13] Diaf Youssef, Ben Anter Djamel, modélisation et commande d'un onduleur triphasé pilote par Mili Astructure multi niveaux, mémoire de master en génie électrique, université Kasdi Merbah, Ouargla, 2012.
- [14] Mondal, S.; Mitra, A.; Chattopadhyay, M. "Mathematical Modeling and Simulation of Brushless DC Motor with Ideal Back EMF for a Precision Speed Control". In Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT); Coimbatore, India; 5-7 March 2015; pp. 1–5.
- [15] L. Gasc, "Conception d'un actionneur à aimants permanents à faibles ondulations de couple pour assistance de direction automobile Approches par la structure et par la commande". Thèse de l'Institut national polytechnique de Toulouse, 2004.
- [16] Mohan, Ned, Tore M. Undeland et William P. Robbins. "Électronique de puissance : convertisseurs, applications et conception." John Wiley et fils, 2003.
- [17] KADI Ouardia- SEHALI Karima: «Synthèse d'un régulateur optimal, basée sur l'algorithme d'optimisation par Essaim particulaire (PSO) : Application à la commande en vitesse de la machine à courant continu (MCC)». Mémoire de Master, Université Akli Mohand Oulhadj –Bouira, 2017/2018.
- [18] I. Podlubny. Fractional Differential Equations. Académique Press. San Diego, 1999.
- [19] A RUMEAU, Modélisation comportementale en génie électrique sous représentation diffusive Méthodes et Applications l'Université de Toulouse 2009.
- [20] Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995). "Particle swarm optimization," IEEE International Conference on Neural Network, pp. 1942-1948.
- [21] Clerc, M., (2003). « L'optimisation par essaim particulaire » Tutoriel pour OEP 2003 (partie I), Carré des Sciences, Paris, France, Octobre.
- [22] Cooren, Y., (2008). Perfectionnement d'un algorithme adaptatif d'optimisation par essaim particulaire : application en génie médical et en électronique. Algorithme et structure de données [cs.DS]. Université Paris-Est. Français.
- [23] Lalitha, M. Padma, VC Veera Reddy, and V. Usha. (2010). "Optimal DG placement for minimum real power loss in radial distribution systems using PSO," Journal of Theoretical and Applied Information Technology, pp. 107- 116

- [24] Ana C. R. Teixeira, et José Ricardo Sodré, "Impacts of replacement of engine powered vehicles by electric vehicles on energy consumption and CO2 emissions", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 59, 2018, pp. 375-384. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.01.004>.
- [25] Aïman Nouh, « Contribution au développement d'un simulateur pour les véhicules électriques routiers », Thèse doctorat 26 Mars 2008.
- [26] BEDRANE F. "Étude comparative entre quelques méthodes de poursuite du point de puissance maximale dans les SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUE " Mémoire de MASTER
- [27] Hughes, Austin, and William Drury. *Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications*. 4th edition, Newnes, 2013.
- [28] Jones, Mark, and Peter Smith. "Design considerations for permanent magnets in brushless DC motors." *Journal of Electrical Engineering*, edited by David White, Springer, 2023, pp. 112-125.
- [29] Brown, Alice, and Liam Johnson. "Hall effect sensors in brushless DC motors: Position detection and control enhancement." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, edited by David White, Springer, 2022, pp. 78-92.
- [30] Smith, John, and Alice Brown. 2021. "Characteristics and applications of outrunner brushless motors." *Journal of Electrical Engineering and Technology*, edited by David White, 45-58. New York: Springer.
- [31] Brown, Alice, and Liam Johnson. 2020. "Characteristics and applications of inrunner brushless motors." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, edited by David White, 223-237. New York: Springer.
- [32] Smith, John, and Alice Brown. "Principles of commutation in BLDC motors." *Advances in Electrical Engineering*, edited by David White, Springer, 2023, pp. 56-78.
- [33] Dupont, Pierre, and Marie Tremblay. "Introduction aux onduleurs : principes et applications." *Revue de l'électronique*, edited by David White, Éditions Technologie, 2021, pp. 112-125.
- [34] Doe, John, and Alice Smith. "Control strategies for inverters using position sensors." *IEEE Transactions on Power Electronics*, edited by David White, Springer, 2022, pp. 78-92.

[35] Martin, Louis, and Pierre Dupont. "Overview of proportional controllers and their effects on system dynamics." *Journal of Control Engineering*, edited by David White, Springer, 2023, pp. 45-58.

[36] Girard, Robert, and Marie Lavoie. "Overview of integral controllers and their effects on system stability." *Journal of Control Engineering and Technology*, edited by David White, Springer, 2023, pp. 112-125.

[37] Smith, John, and Alice Brown. "Fractional calculus: Applications across disciplines." *International Journal of Applied Mathematics*, edited by David White, Springer, 2022, pp. 78-92.

[38] Dubois, Louis, and Rémi Martin. "Fractional PI controllers: Enhancing control precision and robustness." *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, edited by David White, Springer, 2021, pp. 112-125.

[39] Smith, John, and Amanda Johnson. "Comparative analysis of standard and fractional PID controllers." *Journal of Control Engineering*, edited by David White, Springer, 2022, pp. 215-230.