

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF-M'SILA

FACULTE: Technologie

DEPARTMENT: Génie Electrique

N°:.....



DOMAINE: Sciences et Technologies

FILIERE: Electrotechnique

OPTION: Commande Electrique

**Mémoire présenté pour
l'obtention Du Diplôme de
Master Académique**

Par:

- *BELHADJ Abdelkader*
- *LADGHEM-CHIKOUCHE Aymen*

Intitulé

*Implémentation d'une commande numérique d'un
moteur BLDC sur la carte STM32F407*

Membres du jury:

Dr. BEDBOUDI Mohamed	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
Dr. BOUZIDI Riad	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Encadreur
Dr. BOUGUERRA Abderrahmen	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur

Année universitaire 2023/2024

Dédicace

Nous dédions ce mémoire à nos parents, nos frères et sœurs

Nous dédions ce travail à tous nos amis

Aymen, Abdelskader

Remerciements

Tout d'abord, merci **ALLAH**, qui nous a guidés sur le bon chemin et en nous donnant le courage de faire ce projet de fin d'études, cela a été préparée dans le Laboratoire de génie électrique, Département de génie électrique, Université Mohamed Boudiaf de M'sila.

Nous remercions également notre encadreur **Dr. BOUZIDI Riad** et le doctorant **DEHMECHE Ibrahim** pour l'aide et les conseils qu'il nous a fournis, ainsi qu'à tous nos amis et collègues, en particulier ceux qui nous ont apporté un soutien moral et une précieuse amitié inoubliable.

Nous remercions également les membres du jury d'avoir accepté de revoir ce travail et de leurs commentaires constructifs. Enfin, nous tenons à remercier la famille pour son grand encouragement et son soutien inconditionnels et pour tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce projet.

Sommaire

<i>Introduction générale</i>	1
------------------------------------	---

Chapitre I: Généralités sur les moteur BLDC

I.1	Introduction	3
I.2	Origine du moteur sans balais	3
I.3	Structure du moteur à courant continu sans balais (BLDC)	3
I.4	Principe de fonctionnement du moteurs BLDC	6
I.5	Composants de base du moteur BLDC	7
I.5.1	Stator	8
I.5.2	Rotor	9
I.5.3	Capteurs de position	10
I.6	Différents types de moteurs brushless	10
I.6.1	Moteurs à courant continu sans balais à rotor externe (outrunners)	11
I.6.2	Moteurs à courant continu sans balais à rotor interne (Inrunners)	11
I.6.2	Moteurs sans balais à disques (axial)	12
I.7	L'utilisation du moteur brushless	12
I.8	Avantages et inconvénients du moteur BLDC.....	13
I.8.1	Avantages	13
I.8.2	Inconvénients	14
I.9	Conclusion	14

Chapitre II : Modélisation et commande du moteur BLDC

II.1	Introduction	15
II.2	Modélisation du moteur BLDC	15
II.2.1	Equations électriques	15
II.2.2	Equation mécanique du mouvement	18

Sommaire

II.2.2.1	Vitesse du moteur	18
II.2.2.2	Couple électromagnétique	18
II.3	Commande de vitesse d'un moteur BLDC	18
II.3.1	Principe et architecture de commande en boucle ouverte	18
II.3.2	Source de tension	19
II.4	Commande de vitesse d'un moteur BLDC en boucle fermé	20
II.4.1	Contrôle du courant	22
II.5	Techniques de modulation de largeur d'impulsion PWM	23
II.6	Contrôle sans capteur des moteurs à courant continu brushless	24
II.6.1	Contrôle sans capteur basé sur la force électromotrice arrière	24
II.7	Conclusion	26

Chapitre III: Implémentation d'une commande numérique d'un moteur BLDC

III.1	Introduction	27
III.2	Description du banc d'essai	27
III.2.1	Moteur BLDC triphasé et son capteur de vitesse.....	28
III.2.2	Carte de développement STM32F407-discovery	29
III.2.3	Onduleur triphasé	31
III.3	Algorithme de contrôle	32
III.3.1	Description du système d'entraînement.....	32
III.3.2	Séquence de commutation du capteur à effet Hall et du transistor	33
III.4	Résultats expérimentaux	34
III.5	Interprétation des résultats	39
III.6	Conclusion	39
	<i>Conclusion générale</i>	40

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure (I-1)	: Structure du moteur BLDC	(4)
Figure (I-2)	: Alimentation triphasée constituée de trois demi-points	(5)
Figure (I-3)	: Moteur Brushless Triphasé	(6)
Figure (I.4)	: Architecture du moteur BLDC	(7)
Figure (I-5)	: Différents types des stators	(9)
Figure (I-6)	: Les sections transversales de l'aimant du rotor	(10)
Figure (I-7)	: Disposition du capteur à effet hall	(10)
Figure (I-8)	: Moteur à rotor externe	(11)
Figure (I.9)	: Moteur à rotor interne	(12)
Figure (I.10)	: Moteur à entrefer axial	(12)

CHAPITRE II

Figure (II-1)	: Enroulements d'un moteur BLDC triphasé à deux pôles	(15)
Figure (II-2)	: Modèle linéaire mécanique	(18)
Figure (II-3)	: Schéma fonctionnel de la commande en boucle ouverte	(19)
Figure (II-4)	: Système de contrôle de vitesse d'un moteur BLDC	(20)
Figure (II-5)	: Système de contrôle de vitesse basé sur le courant du moteur	(21)
Figure (II-6)	: Système de contrôle de vitesse utilisant la régulation du courant	(22)
Figure (II-7)	: Techniques PWM : commutation bipolaire et commutation unipolaire	(24)
Figure (II-8)	: ZCP de back-FEM	(25)
Figure (II-9)	: Circuit de détection Back-FEM	(26)

CHAPITRE III

Figure (III.1)	: Le banc d'essai expérimentale	(28)
----------------	---------------------------------	------

Liste des figures

Figure (III.2) : Moteur BLDC et son capteur de vitesse	(29)
Figure (III.3) : Carte de développement STM32F407-discovery	(30)
Figure (III.4) : Onduleur triphasé : Structure compacte	(31)
Figure (III.5) : Onduleur triphasé : Structure éclatée	(31)
Figure (III.6) : Algorithme de contrôle	(32)
Figure (III.7) : Structure de système d'entraînement	(33)
Figure (III.8) : Génération d'un signale de commande	(34)
Figure (III.9) : Vitesse du moteur BLDC pour une consigne de 90 tr/m	(35)
Figure (III.10) : Signaux des capteurs à effet hall : Ha et Hb pour : $T \approx 120$ ms	(35)
Figure (III.11) : Vitesse du moteur BLDC pour une consigne de 130 tr/m	(36)
Figure (III.12) : Signaux des capteurs à effet hall : Ha et Hb pour : $T \approx 120$ ms	(36)
Figure (III.13) : Vitesse du moteur BLDC pour deux consignes : 120 tr/m et 240 tr/m	(37)
Figure (III.14) : Signaux des capteurs pour deux consignes : 120 tr/m et 240 tr/m	(37)
Figure (III.15) : Signaux des capteurs pour deux consignes : 120 tr/m et 240 tr/m	(38)
Figure (III.16) : Tension Va de la sortie de l'onduleur	(38)

Liste des tableaux

Tableau (III-1): Séquence de commutation en utilisant les signaux des capteurs à effet Hall.

Abréviations

BLDC	:	Brushless direct Current
MCE	:	Moteur à commutation électronique
DC	:	Direct current
AC	:	Alternating current
FEM	:	Force Electromotrice
SmCo	:	Samarium-Cobalt
Nd	:	Néodyme
NdFeB	:	Néodyme-Fer-Boret
PWM	:	Pulse-Width Modulation
PI	:	Proportionnel Intégral
MCU	:	Microcontroller Unit
CCS	:	Code Composer Studio
EDI	:	Environnement de Développement Intégré
CAN	:	Convertisseur Analogique Numérique
MLI	:	Modulation de largeur d'impulsion

Nomenclature

U_e	:	Tension de l'entrée
v_{abc}	:	Tensions de phase du stator
i_{abc}	:	Courants de phase du stator
λ_{abc}	:	Flux du stator
R_s	:	Résistance du stator
λ_f	:	Flux magnétique total
φ_f	:	Flux magnétique de spire
N	:	Enroulements du stator
θ_r	:	Position du rotor
$L_{\alpha\beta}$:	Inductance d'enroulement

Liste des symboles

w_r	:	Vitesse angulaire en rad/s
C_e	:	Couple électromagnétique développé en N/m
C_r	:	Couple de charge en N/m
f	:	Coefficient de frottement en $N.(m/rad).s^{-1}$
V^*	:	Tension de référence
K_p	:	Gain proportionnel
K_i	:	Gain intégral
I_{dc}^*	:	Courant de référence

Introduction générale

La qualité du produit est considérée comme un facteur important dans l'économie, c'est pourquoi nous trouvons une grande concurrence entre les représentants du secteur industriel pour l'obtenir, ce qui leur garantit une grande commercialisation de leurs produits et donne également à l'acheteur une totale confiance dans le propriétaire du produit.

Pour obtenir la qualité du produit, les industriels doivent accorder une grande attention aux machines de production en termes de maintenance, de surveillance, de renouvellement, etc. Plus de 70 % du secteur industriel est constitué de systèmes d'entraînement électriques qui s'appuient sur divers moteurs électriques à courants continus et à courant alternatifs, pour cela une grande importance doit être accordée à leurs performances, notamment en termes de dynamique, de puissance et de couple produits, et en termes d'indices de performances tels que le dépassement, le temps de réponse et l'erreur statique. [1]

L'obtention de la bonne dynamique, d'une grande robustesse et d'un couple généré élevé nécessite le choix d'un moteur approprié dans le système d'entraînement électrique, tandis que l'obtention de performances avec d'excellents indicateurs nécessite l'utilisation de lois de contrôle modernes, intelligente et adaptatives capables d'atteindre toutes les conditions des cahiers de charge.

Bien que la plus ancienne des machines électriques industrielles, la machine à courant continu reste très utilisée et particulièrement comme actionneur. Ceci est relatif, au fait, qu'elle a un fonctionnement et un mode de commande simple.

De nos jours, les MCCs sont remplacés par les moteurs à courant continu sans balais « BLDC » dans plusieurs domaines comme trouvées dans diverses lignes de produits consommateurs, médicaux et industriels. La vitesse variable de haute efficacité et la commande de moteur à couple variable ne sont possibles que sur les composants électroniques et les microcontrôleurs. Le faible coût est toujours un facteur dominant dans la conception de produits très bas de gamme utilisant un contrôle moteur. Les outils électriques et les appareils ménagers à la main ne sont que quelques-uns des exemples sur le marché. [1]

Il existe essentiellement deux types de moteurs DC sans balai (BLDC), à savoir, Moteur synchrone à aimant permanent (MSAP) et BLDC, moteur en fonction de leur distribution de flux. Le moteur qui a une forme d'onde trapézoïdale est appelé moteur BLDC, alors que le MSAP a une forme sinusoïdale. La commande du moteur BLDC peut être classée en tant que commande à base de capteur et contrôle sans capteur. Dans le contrôle basé sur les capteurs, l'enroulement du stator est excité à base de position de rotorique est mesurée à l'aide de capteurs de hall. [2]

Les moteurs BLDC sont préférés aujourd'hui en raison du coût, de l'abordabilité et la variété de la vitesse qu'ils offrent dans le choix de l'application impliquant la puissance fractionnaire qui peut être augmentée jusqu'à 3 chevaux dans la plupart des moteurs à courant continu. Pour commander cette vitesse nous utilisons une technique d'autoréglage du PI basée sur le soft computing. Les systèmes contrôlés ont généralement certaines caractéristiques, telles que la non-linéarité, la variabilité temporelle, la stabilité et la précision, ce qui rend le réglage des paramètres du contrôleur plus complexe. De plus, dans certains cas, les paramètres de système et même le système de la structure peut varier avec le temps et l'environnement. Par conséquent, les méthodes traditionnelles de réglage des paramètres PI ne conviennent pas pour ces calculs difficiles [3]

Pour cela l'objectif de ce travail est le contrôle de la vitesse d'un moteur BLDC en boucle ouverte, où la commande numérique sera implémentée sur une carte de développement STM32F407 pour un moteur de puissance de 480 W, l'onduleur triphasé sera reconstruit de manière éclatée, ce qui facilite le processus de mise en œuvre et de sa maintenance et permet une détection rapide des défauts.

Le travail sera organisé en trois parties, où la première partie présentera des généralités sur le moteur BLDC, son principe de fonctionnement, ses types et ses applications tandis que la deuxième partie sera consacrée à la présentation du modèle mathématique du moteur et à la clarification de toutes les méthodes de contrôle de sa vitesse, que ce soit en boucle ouverte ou en boucle fermée. Dans la dernière partie, nous montrerons la méthode d'implémentation pratique du contrôle de la vitesse du moteur BLDC en boucle ouverte sur la carte de développement STM32F407.

CHAPITRE I:

Généralités sur les moteur BLDC

I.1 Introduction

Le moteur « brushless », moteur sans balais, tire son nom par opposition au moteur à courant continu qui dispose de bobinages sur le rotor et nécessite un collecteur pour alimenter ces bobinages. Ce collecteur est un point faible du moteur à courant continu : pertes énergétiques (mécaniques et électriques), usure, étincelles, etc. Les moteurs BLDC ("brushless direct current") entrent dans la catégorie des moteurs synchrones, ce qui signifie que le champ magnétique créé par le stator et celui généré par le rotor tournent à la même fréquence. De nos jours, ce moteur est largement utilisés dans l'industrie.

Dans ce premier chapitre, on présente un bref rappel théoriques sur le moteur BLDC, sa structure , son principe de fonctionnement, ses composants de constiution , ses avantages et ses inconvénients.

I.2 Origine du moteur sans balais

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. De nos jours, on les retrouve dans plusieurs outils électroportatifs, c'est grâce à leurs technologies de constructions. Les outils avec moteur sans balais occupent pour le moment le trône des produits de haut de gamme chez les fabricants d'outillage. [4]

I.3 Structure du moteur à courant continu sans balais (BLDC)

Le "Brushless DC Motor" ou moteur à courant continu sans collecteur, parfois appelé MCE ("Moteur à commutation électronique"), est essentiellement similaire au moteur à courant continu avec collecteur, à la différence notable que la fonction de commutation, traditionnellement assurée mécaniquement par le collecteur dans le cas du moteur DC, est réalisée électroniquement ici, éliminant ainsi le besoin de tout contact mécanique entre le stator et le rotor. [5]

Pour surmonter les limitations de la commutation mécanique, il est nécessaire, dans la mesure du possible, d'éliminer le collecteur et de tenter de reproduire électroniquement sa

fonction. Dans cette optique, la commutation est réalisée électroniquement et les ajustements de principe suivants sont mis en œuvre.[5] figure (I-1)

- L'excitation, traditionnellement produite au niveau du stator par un aimant ou un enroulement, est désormais assurée par le rotor lui-même, la partie mobile de la machine (le plus souvent dans le contexte d'un moteur à rotor interne), équipé d'aimants permanents. Ainsi, le rotor agit en tant qu'inducteur sans nécessiter de transfert d'énergie via un mécanisme de contact.
- 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 (désignées H1, H2 et H3) sont employées pour détecter le champ d'induction généré par l'aimant et ainsi obtenir une estimation approximative de la position du rotor. Elles sont fixées au stator, soit directement à celui-ci, soit sur une pièce attachée au stator en face d'un aimant auxiliaire solidaire du rotor, présentant des caractéristiques identiques aux aimants permanents du rotor. Comme mentionné précédemment, ces sondes sont positionnées à des intervalles de 60° ou 120° . C'est en se basant sur les informations qu'elles fournissent que les phases seront commutées.

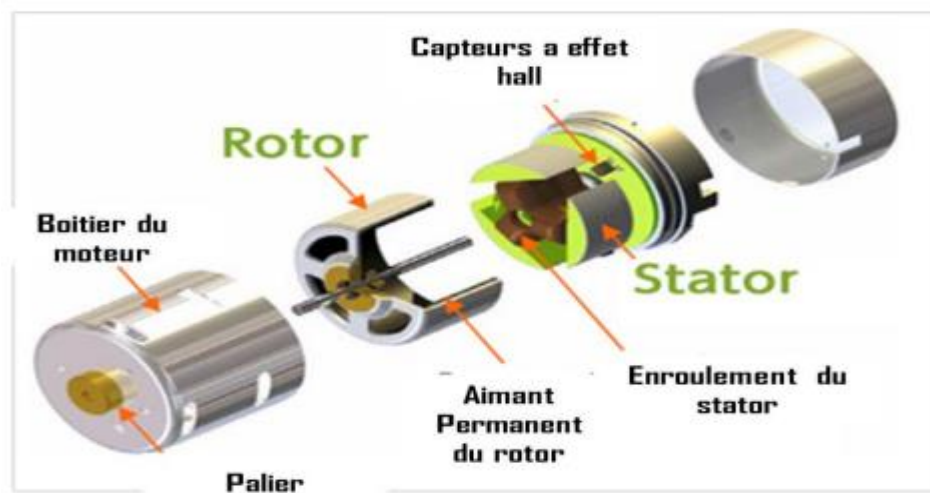


Figure (I-1): Structure du moteur BLDC : les enroulements des trois Phases sont logés dans le stator (induit), et la position de l'aimant (Inducteur) est détectée par les trois sondes de Hall H1, H2 et H3.

L'alimentation via un variateur de courant continu est remplacée par une électronique de commutation similaire, mais avec une branche supplémentaire (figures (I-2) et (I-3)). La tension U_e du circuit intermédiaire reste donc continue. Cela aboutit à un onduleur triphasé, un dispositif qui permet de générer un système de courants et de tensions triphasés de fréquence variable. Les potentiels appliqués aux bornes de chaque phase peuvent ainsi être commutés à volonté entre $+U_e$ et $-U_e$. Notons que les mêmes raisons qui ont été évoquées lors de la présentation du variateur de courant continu sont à l'origine du choix d'une alimentation fonctionnant en mode de commutation, ce mode permettant de limiter les pertes thermiques dans l'étage de puissance.

Avec six transitions par tour, les signaux H1, H2 et H3 issus des sondes de Hall fournissent l'information minimale sur la position de l'aimant, nécessaire pour la commutation appropriée des trois phases. En détectant ainsi la polarité du champ d'excitation, deux des trois phases sont activées successivement, une logique de traitement des signaux H1, H2 et H3 fournissant les commandes individuelles des trois branches de l'onduleur. Bien qu'il existe plusieurs stratégies possibles, la séquence d'activation des phases garantit que seules deux d'entre elles conduisent simultanément, connectées en série par une commande spécifique des voies de l'étage de puissance. La troisième phase est laissée inactive et le courant la traversant est ainsi nul. [5]

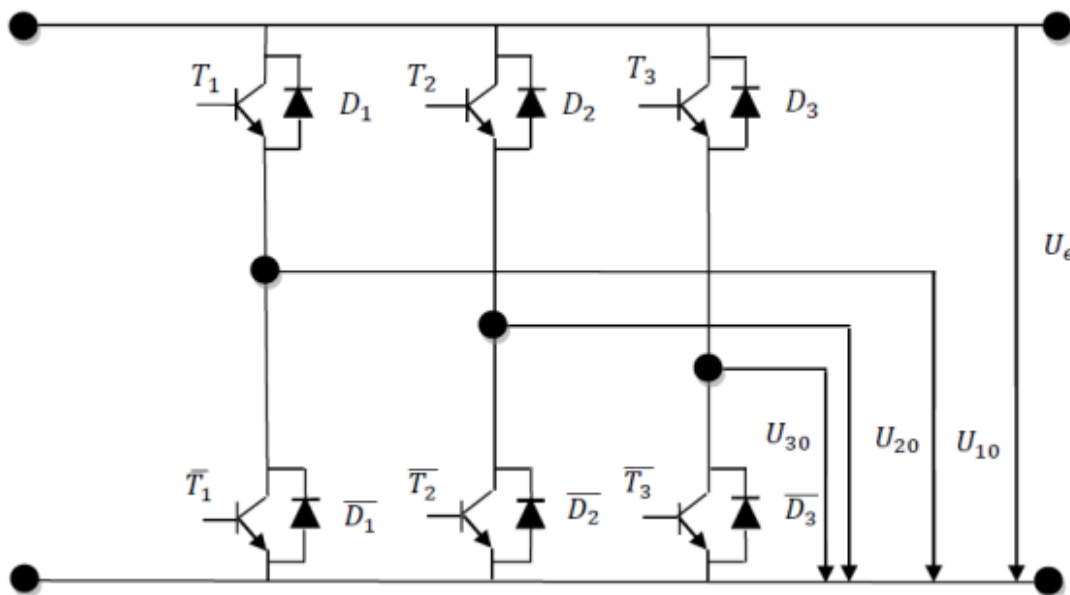


Figure (I-2): Alimentation triphasée constituée de trois Demi-points.

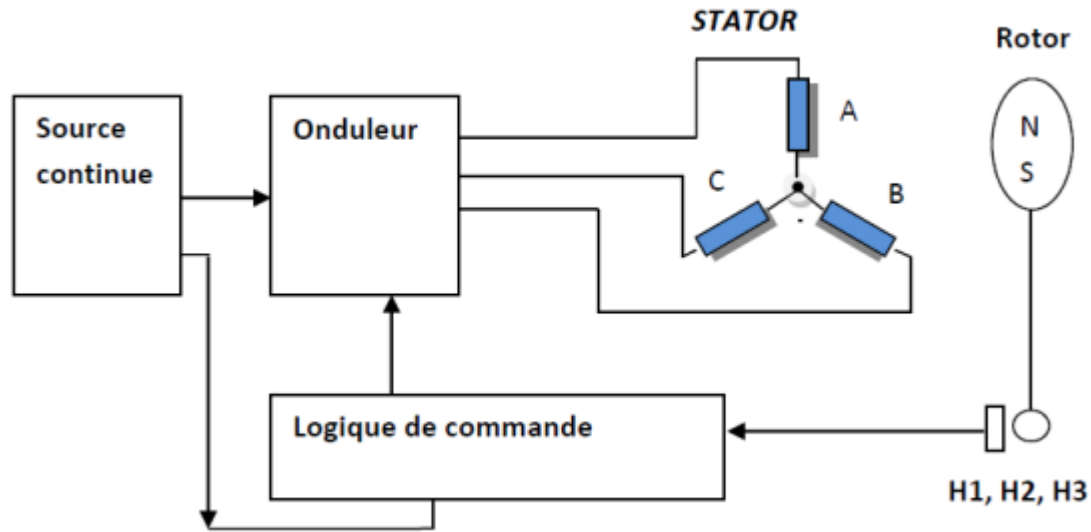


Figure (I-3): Moteur Brushless Triphasé.

I.4 Principe de fonctionnement de moteurs BLDC

Un moteur brushless est composé de magnétiques permanents sur le rotor et d'une bobine triphasée sur le stator. En appliquant du courant dans une partie de la bobine, un champ magnétique est créé, attirant ainsi les aimants et les alignant avec le champ magnétique. Typiquement, la bobine est triphasée, ce qui implique qu'elle est constituée de trois ensembles de bobines connectées entre elles. En alimentant successivement ces ensembles de bobines, le rotor s'aligne à chaque fois avec les champs magnétiques et commence à tourner. Un moteur sans balais appartient à la catégorie des machines synchrones alternatives. Dans la classification des machines électriques, le premier niveau distingue les machines à courant continu (connues des enseignants de CPGE, etc.) des machines alternatives. Le moteur universel représente un cas particulier de moteur fonctionnant efficacement en courant continu à partir de courant alternatif. [6]

Avant d'aborder le fonctionnement du moteur à courant continu sans balais, il est préférable de comprendre le rôle du moteur à balais. Dans les moteurs à balais, un aimant permanent est situé à l'extérieur, tandis qu'à l'intérieur, il y a un noyau rotatif contenant un électroaimant. Lorsque ces électroaimants sont alimentés en courant, ils génèrent un champ magnétique qui facilite la rotation du moteur, tandis que les balais inversent la polarité des pôles pour maintenir cette rotation. Le principe de fonctionnement de base du moteur à courant continu

à balais est similaire à celui du moteur à courant continu sans balais, car il repose sur la détection de la position de l'arbre interne. Le moteur à courant continu sans balais se compose essentiellement de deux parties : le rotor et le stator. Le rotor, contenant un aimant permanent en rotation, attire les électroaimants du stator. Dans un moteur sans balais, les aimants permanents sont montés sur le rotor et attirent les électroaimants du stator. Des transistors à haute puissance sont utilisés pour activer ces électroaimants. Le contrôleur distribue la puissance en utilisant un circuit solide. [7]

Malgré sa simplicité de construction, la gestion électronique (à l'aide d'un codeur ou d'un contrôleur) se révèle plus sophistiquée. En effet, il est essentiel de maintenir une connaissance en temps réel de la position du rotor afin de diriger le courant vers les groupes de bobines appropriés. Ce système électronique convertit alors le courant continu en courant triphasé à fréquence variable, alimentant séquentiellement les bobines pour créer un champ magnétique rotatif, induisant ainsi la rotation du rotor.[8]

La Figure (I-4) présente l'architecture d'un moteur BLDC où le rotor se compose uniquement d'une seule paire de pôles et le stator se compose de trois bobines décalées de 120° l'une de l'autre.

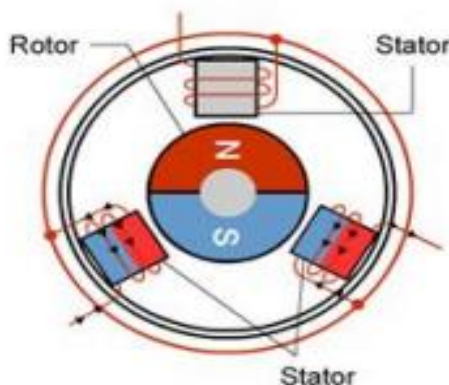


Figure (I-4): Architecture du moteur BLDC

I.5 Composants de base du moteur BLDC

Les moteurs Brushless sont constitués de 3 principaux éléments :

I.5.1 Stator

Le stator d'un moteur BLDC est constitué de tôles d'acier superposées, avec des enroulements placés dans des fentes découpées le long de la périphérie intérieure. La plupart des moteurs BLDC ont trois enroulements de stator reliés en étoile, chacun étant composé de nombreuses bobines interconnectées. Ces bobines sont logées dans les fentes et connectées entre elles pour former un seul enroulement. Ils sont disposés autour du stator pour former un nombre pair de pôles.

Le stator porte les enroulements qui peuvent prendre plusieurs formes :

- bobines concentrées autour de pôles saillants. Figure(I-5. a).
- enroulements repartis dans des encoches. Figure(I-5. b).
- enroulements repartis le long de l'entrefer sans encoches. Figure(I-5. c).

La première solution, qui correspond à celle qui en général est employée pour les rotors des moteurs à courants continu ou pour les stators de moteur pas à pas est peu utilisée pour les moteurs sans balais. Les machines obtenues ont des performances modestes et le couple présente des irrégularités dues aux variations de réluctance.

La deuxième solution est la plus classique. Par une répartition adaptée des conducteurs dans les encoches, on s'approche de la forme trapézoïdale des variations des forces électromotrices induites. Une géométrie bien choisie des dents permet de minimiser les irrégularités de couple.

Dans le troisième cas, on élimine toute variation de couple due aux modifications de réluctance. Cependant, la construction est moins solide et le comportement thermique est moins bon. Cette solution est néanmoins intéressante pour les petits moteurs. [9]

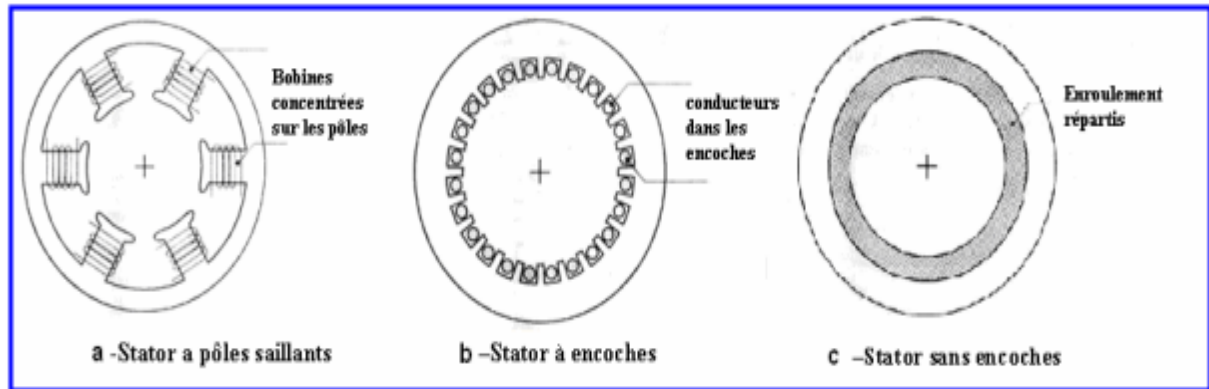


Figure (I-5): Différents types des stators.

I.5.2 Rotor

Le rotor est composé d'aimants permanents et peut comporter de deux à huit paires de pôles, avec une alternance de pôles Nord (N) et Sud (S). Le choix du matériau magnétique pour la conception du rotor dépend de la densité de champ magnétique requise. Traditionnellement, les aimants en ferrite sont utilisés pour fabriquer les aimants permanents.

Le néodyme (Nd), le samarium-cobalt (SmCo) et l'alliage de néodyme, de ferrite et de bore (NdFeB) sont quelques exemples d'aimants rares en alliage de terres rares utilisés. Des recherches continues ont permis d'améliorer la densité du flux magnétique, offrant ainsi des avantages supplémentaires au rotor. Les aimants du rotor présentent une variété de sections transversales en fonction des besoins spécifiques. [9]

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

La figure (I-6) montre des coupes transversales de différents agencements d'aimants dans un rotor.



Figure (I-6): Les sections transversales de l'aimant du rotor.

I.5.3 Capteurs de position

Comme les moteurs BLDC ne sont pas équipés de balais, leur commutation est gérée électroniquement. Pour mettre le moteur en mouvement, les enroulements du stator doivent être alimentés de manière séquentielle, ce qui nécessite une connaissance précise de la position du rotor, c'est-à-dire des pôles Nord et Sud du rotor. Cette position est généralement détectée à l'aide d'un capteur central, souvent un capteur à effet de Hall, qui convertit cette information en un signal électrique. La plupart des moteurs BLDC intègrent trois capteurs à effet de Hall dans le stator pour détecter avec précision la position du rotor. [10]

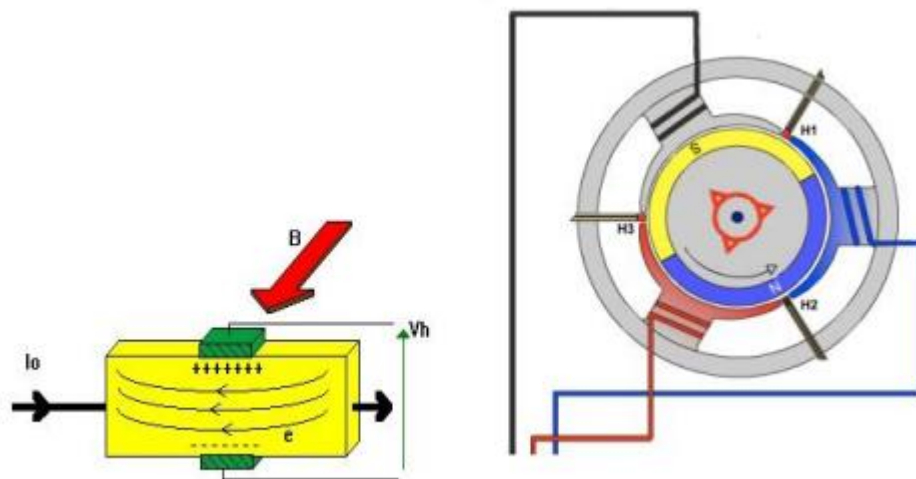


Figure (I-7): Disposition du capteur à effet hall

I.6 Différents types de moteurs brushless

Selon les applications, il existe une grande variété de moteur à courant continu sans balais avec des caractéristiques de couples, de vitesses, d'inerties différentes en fonction de leurs constitutions. Pour une classification qui se base sur le fait que le rotor soit à l'intérieure ou à

l'extérieure de du moteur, ainsi que sur la forme extérieure. Les moteurs BLDC peuvent être divisés en trois familles : à rotor externe, à rotor interne et à disques.

I.6.1 Moteurs à courant continu sans balais à rotor externe (outrunners)

Les tôles utilisées au stator ressemblent à celles de l'induit de la machine à courant continu à balais. Ce type de stator est simple à bobiner, car le fil se bobine directement sur le stator section par section. Le rotor est constitué d'aimants montés dans une cloche magnétique permettant la continuité du champ. Dans cette configuration, il n'y a plus de problème pour maintenir les aimants, car ils sont plaqués sur la cloche par l'action de la force centrifuge. Cette structure est celle utilisée pour l'entraînement des lecteurs CD-ROM et elle est aussi fréquemment utilisée dans les applications de ventilation pour son faible coût et sa facilité de fabrication. Cependant, les machines à rotor extérieur ne sont utilisées que pour des applications à vitesse constante car le rotor a une inertie importante de par sa position externe. [11]

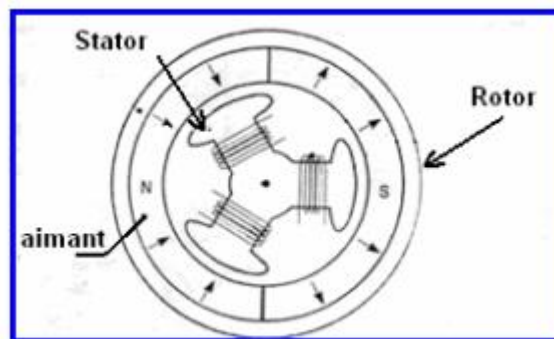


Figure (I-8): Moteur à rotor externe

I.6.2 Moteurs à courant continu sans balais à rotor interne (Inrunners)

Le moteur à rotor intérieur a une configuration classique. Le rotor est constitué d'aimants assemblés sur une douille magnétique. Le stator est similaire à celui des machines triphasées à induction. D'ailleurs, les stators des machines à induction sont parfois directement utilisés dans la fabrication des machines Brushless, pour des raisons d'économie. La figure (1-9) montre un exemple de moteur à rotor intérieur. [11]

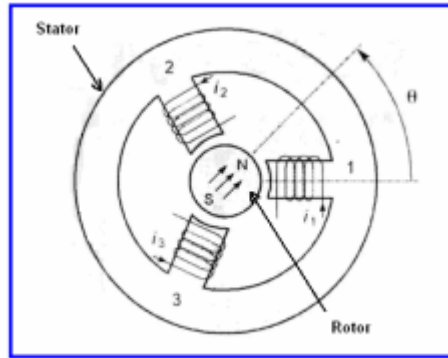


Figure (I-9): Moteur à rotor interne

I.6.3 Moteurs sans balais à disques (axial)

Dans certaines applications à encombrement réduit, des machines à entrefer axial ont fait leur apparition (moteur de disque dur d'ordinateur, tables tournantes, ventilateur). Les aimants sont montés sur un disque magnétique mobile. Les bobines sont fixées en général sur le circuit imprimé avec les composants électroniques. Sous le circuit une plaque métallique permet au champ de se refermer. La figure (1-10) c représente le schéma d'un moteur à entrefer axial.

Ces machines ont en général un grand nombre de pôles et fonctionnent à basse vitesse (inférieure à 1000tr/min) afin d'éviter un échauffement excessif dû au courant de Foucault. Les avantages du moteur à entrefer axial sont : un faible coût, sa forme plate et l'absence de couple réactant à faible vitesse. [11]

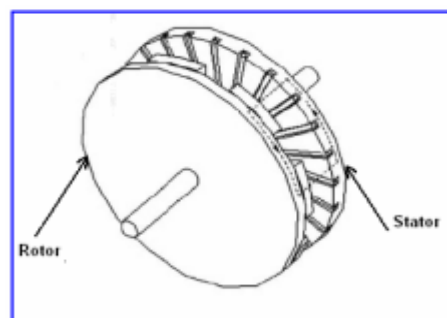


Figure (I-10): Moteur à entrefer axial

I.7 L'utilisation du moteur brushless

Les moteurs sans balais sont largement utilisés dans l'industrie. C'est notamment le cas des servomécanismes des machines-outils et de la robotique, où ils ont disparu des machines à courant continu. Ils équipent notamment les disques durs et les graveurs de DVD. Comme dans le domaine des transports, les moteurs électriques qui équipent les voitures hybrides comme la Toyota Prius et la Honda pour assurer un fonctionnement à basse vitesse, entre autres, sont des moteurs brushless. Ces moteurs alimentent également les voitures électriques modernes. Ils sont aussi très utilisés en modélisme pour faire se mouvoir des modèles réduits d'avion, d'hélicoptères (aéromodélisme). Ils sont moins bruyants que les moteurs avec balais. Le rapport poids/puissance de ces moteurs est très favorable à leur utilisation dans ce domaine. On les retrouve également dans les motorisations d'antennes paraboliques. [12]

I.8 Avantages et Inconvénients du moteur BLDC

I.8.1 Avantage

- **Durée de vie et fiabilité**

La longévité (env. 20 000 h) est équivalente aux moteurs AC et jusqu'à quatre fois supérieure à un moteur DC avec balais. Les soucis liés au frottement des charbons sur le collecteur disparaissent : plus de parasites (dus aux étincelles), plus d'échauffement du collecteur et de pertes dues à l'étincelage, plus d'usure mécanique (hormis les roulements).

- **Encombrement et poids**

Plus compact que les moteurs AC et DC, un moteur sans balais est également deux à trois fois plus léger qu'un moteur DC traditionnel. Pour un poids et un encombrement identique, le moteur à courant continu sans balais sera donc bien plus efficace en termes de puissance.

- **Consommation électrique**

Le rendement est bien supérieur à celui d'un moteur à courant continu traditionnel à balais (pas de chute de tension au niveau du collecteur et pas de friction). Gestion électronique pour un rendement maximum.

- **Niveau sonore**

Le bruit et les vibrations générés par un moteur sans balais sont inférieurs aux autres types de moteurs. La variation de vitesse aisée permet également de rechercher facilement le point de fonctionnement (intersection des deux caractéristiques couple moteur/vitesse et couple résistant/vitesse) le plus silencieux.

- **Variation de débit et asservissement**

La technologie du moteur sans balais avec son module électronique offre de nouvelles possibilités de variation de la vitesse. Plus de souplesse en effet, avec une plage de variation plus étendue et surtout le maintien du couple (couple constant car on ne modifie pas la tension d'alimentation). [13]

- **Environnement à gaz inflammable**

Le moteur BLDC se distingue par la non existence des étincelles causées par les balais. Ce qui le rend, le moteur le plus favorisé dans les environnements à gaz inflammable.

I.8.2 Inconvénients

Il y a cependant quelques inconvénients. Particulièrement, en cite :

- La nécessité de piloter le moteur avec un dispositif électronique de commutation sur les bobines du stator puisqu'il n'y a plus de balais pour assurer cette fonction.
- Les bruits mécaniques et sifflements générés par certains moteurs lorsqu'ils sont amenés à des vitesses spécifiques de rotation. [14]

I.9 Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre qu'un moteur BLDC est un moteur défini comme un accouplement à un interrupteur électronique et des capteurs de position du rotor, et nous avons également vu que 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. Ces caractéristiques rendent ce type de moteur très répandus au secteur industriel et dans plusieurs outils électroportatifs.

CHAPITRE II:

Modélisation et commande du moteur BLDC

II.1 Introduction

Le secteur industriel a connu un grand développement dans l'utilisation de systèmes d'entraînement électriques qui s'appuient sur différents moteurs électriques, comme le moteur asynchrone, le moteur synchrone, le moteur synchrone à aimant permanent, le moteur à courant continu... etc. Cependant, les caractéristiques importantes et du moteur à courant continu sans balais ont accru le nombre de systèmes d'entraînement électriques qui en dépendent. Pour que le système d'entraînement avec un moteur BLDC soit robuste, dynamique et doté d'excellents indices de performance, des lois de contrôle approprié doivent être convenables pour ses grandeurs électriques, telles que le courant ou la tension, et ses grandeurs mécaniques, telles que la vitesse et le couple électromagnétique.

Ceci bien sûr après avoir trouvé un modèle mathématique qui représente le moteur BLDC avec une grande précision. Pour cela, nous consacrerons d'abord ce chapitre à trouver un modèle mathématique pour le moteur à courant continu sans balais, puis nous lui appliquerons les lois de contrôle de sa vitesse mécanique. Nous commencerons par le plus simple. Le contrôle de la vitesse en boucle ouverte puis en boucle fermée, que ce soit en utilisant un seul régulateur de vitesse ou deux régulateurs, l'un pour le courant et l'autre pour la vitesse.

II.2 Modélisation du Moteur BLDC

II.2.1 Les Équations Électrique

La particularité du moteur BLDC provient de la forme trapézoïdale de la force électromotrice, ce qui signifie que l'inductance mutuelle entre le stator et le rotor est non sinusoïdale.

La Figure (II-1) représente les enroulements d'un moteur BLDC triphasé à deux pôles.

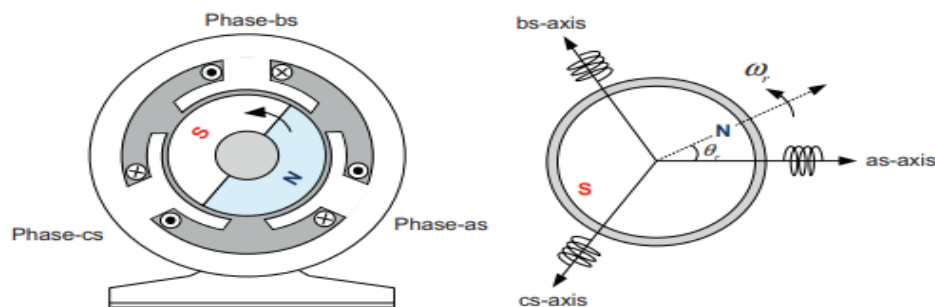


Figure (II-1) : Enroulements d'un moteur BLDC triphasé à deux pôles

$$v_{abcs} = R_s i_{abcs} + \frac{d\lambda_{abcs}}{dt} \quad (\text{II-1})$$

Où : $v_{abcs} = [v_{as} v_{bs} v_{cs}]^T$: les tensions du stator, $i_{abcs} = [i_{as} i_{bs} i_{cs}]^T$: les courants du stator, $\lambda_{abcs} = [\lambda_{as} \lambda_{bs} \lambda_{cs}]^T$: Flux magnétique total du stator.

$$R_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} : \text{est la résistance du stator.}$$

Le flux magnétique total λ_{abcs} des enroulements du stator se compose de $\lambda_{abcs(s)}$ dû aux courants du stator i_{abcs} et $\lambda_{abcs(f)}$ dû à l'aimant permanent comme :

$$\lambda_{abcs} = \lambda_{abcs(s)} + \lambda_{abcs(f)} \quad (\text{II-2})$$

La substitution d'Eq. (II-2) en Eq. (II-1) donne l'équation de tension du stator suivante :

$$v_{abcs} = R_s i_{abcs} + \frac{d\lambda_{abcs}}{dt} = R_s i_{abcs} + \frac{d\lambda_{abcs(s)}}{dt} + e_{abcs} \quad (\text{II-3})$$

Où e_{abcs} : est la force contre électromotrice dû au flux d'aimant est exprimé en $e_{abcs} = \frac{d\lambda_{abcs(f)}}{dt}$ et est également donné comme :

$$e_{abcs} = \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{bmatrix} = w_m \begin{bmatrix} \lambda_{asf} \\ \lambda_{bsf} \\ \lambda_{csf} \end{bmatrix} = w_m \lambda_f \begin{bmatrix} f(\theta_r) \\ f(\theta_r - 120^\circ) \\ f(\theta_r - 240^\circ) \end{bmatrix} \quad (\text{II-4})$$

Où $\lambda_f (= N\varphi_f)$ est la quantité de flux magnétique φ_f reliant N tours des enroulements du stator, $f(\theta_r)$ est une fonction unitaire représentant la forme d'onde du force CEM et θ_r est la position du rotor.

La fonction d'unité pour la forme d'onde trapézoïdale force CEM d'un moteur de BLDC peut être exprimée comme :

$$f(\theta_r) = \begin{cases} 6\theta_r/\pi & (0 \leq \theta_r < \pi/6) \\ 1 & (0 \leq \theta_r < \pi/6) \\ -6\theta_r/\pi & (0 \leq \theta_r < \pi/6) \\ -1 & (0 \leq \theta_r < \pi/6) \\ -\frac{6\theta_r}{\pi} - 12 & (0 \leq \theta_r < \pi/6) \end{cases} \quad (\text{II-5})$$

Le flux des enroulements du stator $\lambda_{abcs(s)}$ dû aux courants du stator est donnée par :

$$\lambda_{abc(s)} = L_S i_{abc(s)} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II-6})$$

A cause de la symétrie des enroulements triphasés du stator, les auto-inductances sont toutes les mêmes et les inductances mutuelles sont toutes les mêmes que dans ce qui suit :

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L_S = L_{ls} + L_m \quad (\text{II-7})$$

$$L_{ab} = L_{ac} = L_{ba} = L_{bc} = L_{ca} = L_{cb} = -\frac{1}{2}L_m = M \quad (\text{II-8})$$

Où $L_{\alpha\beta}(= \frac{\lambda}{i_\beta})$ exprime l'inductance d'enroulement, qui est le rapport de flux total λ de l'enroulement α au courant i_β actuel qui produit le flux.

À partir d'Eqs. (II-6) et (II-8), l'équation de tension du stator est réécrite comme suit :

$$v_{abc(s)} = R_S i_{abc(s)} + L_{abc(s)} \frac{d\lambda_{abc(s)}}{dt} + e_{abc(s)} \quad (\text{II-9})$$

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_S & M & M \\ M & L_S & M \\ M & M & L_S \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II-10})$$

10), Puisque : $i_{as} + i_{bs} + i_{cs} = 0$ et le terme moyen de l'Eq. (II-10) est réduit comme suit :

$$\frac{d}{dt} [L_S i_{as} + M i_{bs} + M i_{cs}] = \frac{d}{dt} [L_S i_{as} + M i_{as}] \quad (\text{II-11})$$

Ainsi Eq. (II-10) devient les équations de tension suivantes :

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_S - M & 0 & 0 \\ 0 & L_S - M & 0 \\ 0 & 0 & L_S - M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II-12})$$

Les équations de tension d'un moteur à courant continu sans balais sont :

$$v_{as} = R_S i_{as} + (L_S - M) \frac{di_{as}}{dt} + e_{as} \quad (\text{II-13})$$

$$v_{bs} = R_S i_{bs} + (L_S - M) \frac{di_{bs}}{dt} + e_{bs} \quad (\text{II-14})$$

$$v_{cs} = R_S i_{cs} + (L_S - M) \frac{di_{cs}}{dt} + e_{cs} \quad (\text{II-15})$$

I.2.2 Equation mécanique du mouvement

II.2.2.1 Vitesse du moteur

Le modèle mécanique du moteur BLDC (Figure (II-2)) est donné par l'Eq (II-16) :

$$J \frac{d\omega_r}{dt} + C_e - f\omega_r - C_r = 0 \quad (\text{II-16})$$

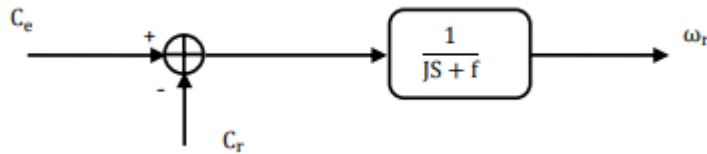


Figure (II-2) : Modèle linéaire mécanique.

Où :

ω_r : est la vitesse angulaire en rad/s.

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

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

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

II.2.2.2 Couple Électromagnétique

Le couple produit dans le moteur BLDC est dû à l'alignement des aimants. L'alignement des aimants se fait à la position où la force électromotrice est nulle. Pour obtenir un couple dans le moteur BLDC il est nécessaire de fournir un courant dans les phases au moment où la force électromotrice est présente sa partie plate. Le couple électromagnétique développé par le moteur BLDC est donné par :

$$C_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_r} \quad (\text{II-17})$$

II.3 Commande de vitesse d'un moteur BLDC

II.3.1 Principe et architecture de commande en boucle ouverte

Nous pouvons facilement faire fonctionner un moteur BLDC grâce à une commutation appropriée des courants de phase basée sur les informations de la position du rotor. Similaire à un moteur à courant continu, la vitesse de fonctionnement d'un moteur BLDC est proportionnelle à la tension appliquée au moteur, et sa vitesse peut donc être contrôlée en ajustant la tension appliquée.

La commande en boucle ouverte est simple et facile à construire et moins cher par rapport au système de contrôle en boucle fermée. Cependant, la sortie ne peut pas être surveillée car il n'y a pas de retour.

La vitesse peut être augmentée ou diminuée en augmentant ou en diminuant la tension d'alimentation car la vitesse est la fonction de la tension d'alimentation. Et le couple est directement proportionnel au courant. Le courant dépend de la charge. Par conséquent, en cas de contrôle en boucle ouverte, la sortie dépend principalement de la tension d'alimentation et de l'état de la charge.

Le schéma fonctionnel de la commande en boucle ouverte est illustré à la figure (II-3) Elle comporte trois blocs principaux tels que la source de tension, l'onduleur et le moteur BLDC. [12]

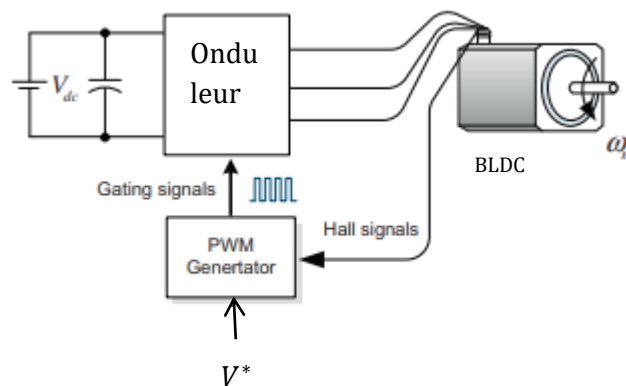


Figure (II-3) : Schéma fonctionnel de la commande en boucle ouverte

II.3.2 Source de tension

La source de tension est utilisée pour alimenter la tension continue du moteur BLDC. La vitesse du moteur BLDC est proportionnelle avec la tension d'alimentation. La source de tension est le contrôleur principal, aucun autre contrôleur n'est utilisé dans ce contrôle. La tension appliquée ne doit pas être supérieure à la puissance nominale du moteur ; par conséquent, la forme d'onde carrée ou sinusoïdale peut être appliquée comme tension d'entrée. [13]

II.4 Commande de vitesse d'un moteur BLDC en boucle fermé

La figure (II-4) montre le système le plus simple pour contrôler la vitesse d'un moteur BLDC. Un régulateur proportionnel intégral (PI) est couramment utilisé pour le contrôle de

vitesse. Ce régulateur de vitesse produit la tension de référence V^* du moteur (ou la fonction PWM) comme :

$$V^* = \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \cdot (\omega_m^* - \omega_m) \quad (\text{II-18})$$

Où K_p et K_i sont les gains proportionnel et intégral du contrôleur de vitesse PI, respectivement.

Cette tension de référence est générée par la technique PWM puis appliquée au moteur BLDC. Ce système de contrôle de vitesse est simple mais a un inconvénient important où dans cette méthode, le courant du moteur est difficile à contrôler dans une plage appropriée. En effet, lorsqu'une commande de vitesse est modifiée, la tension de référence peut être largement modifiée. On ne peut donc pas s'attendre à obtenir une bonne réponse dynamique pour le contrôle de vitesse. De plus, cela peut entraîner un courant transitoire important supérieur au courant nominal, ce qui peut entraîner l'arrêt total du système d'entraînement. [14]

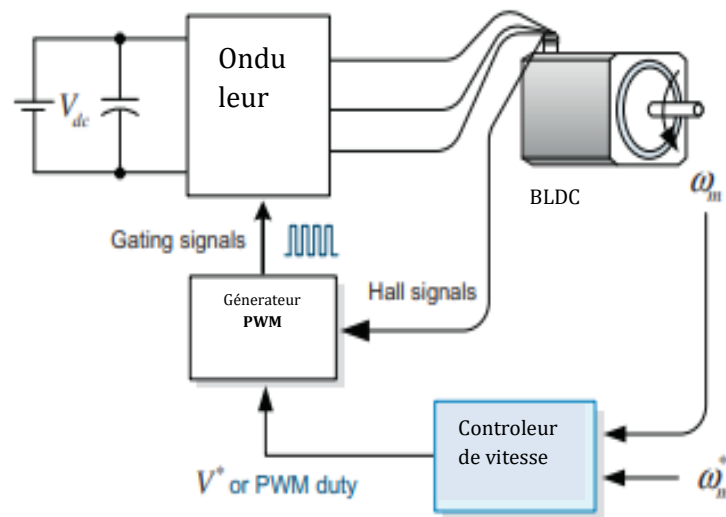


Figure (II-4) : Système de contrôle de vitesse d'un moteur BLDC

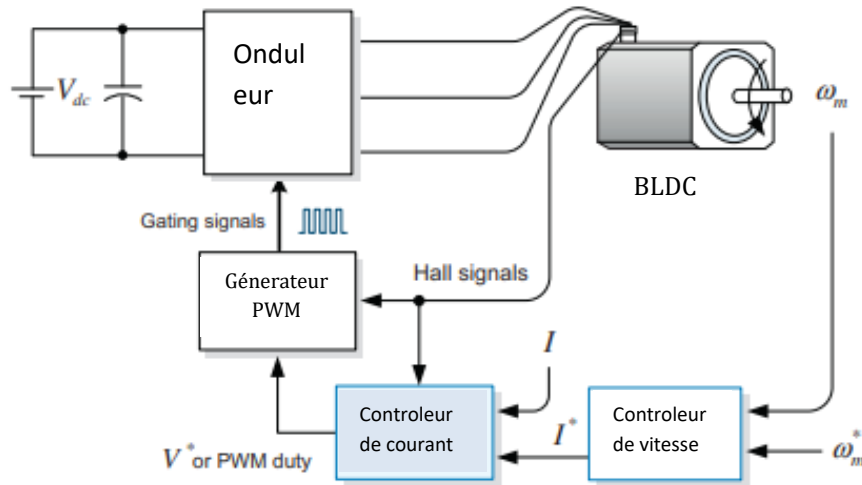


Figure (II-5): Système de contrôle de vitesse basé sur le courant du moteur

Pour obtenir une meilleure réponse dynamique du contrôle de vitesse, il est nécessaire de contrôler le couple ou le courant du moteur BLDC. Un système amélioré de commande de vitesse basé sur le contrôle du courant est montré dans Figure (II-5). Si l'on compare avec le système précédent de la Figure (II-4), ce système comprend un régulateur pour contrôler le courant (donc, le couple) afin de contrôler la vitesse du moteur BLDC. Dans ce cas, la sortie du régulateur de vitesse PI devient le courant de référence du moteur et un capteur de courant est nécessaire pour mesurer le courant réel du moteur afin de générer la tension de référence.

Pour le contrôle du couple des moteurs à courant alternatif, l'amplitude et la phase des courants triphasés sont régulées instantanément. Cependant, pour l'entraînement du moteur BLDC, seule l'amplitude des courants d'alimentation doit être régulée. Le couple développé est proportionnel à l'amplitude du courant de phase. En outre, lors du contrôle d'amplitude du courant, nous pouvons les régler individuellement comme dans le contrôle de courant des moteurs à courant alternatif. Cependant, étant donné que l'amplitude du courant de phase d'un moteur BLDC est proportionnelle au courant DC-link côté I_{dc} , l'amplitude du courant de phase est généralement contrôlée en régulant I_{dc} . Dans ce cas, le système d'entraînement n'a besoin que d'un seul capteur de courant côté DC-link, et est donc plus rentable. La Figure (II-6) montre le système de contrôle de vitesse en utilisant la régulation du courant I_{dc} . Dans ce système, le contrôleur de vitesse produit le courant de référence I_{dc}^* continue comme :

$$I_{dc}^* = (K_{ps} + \frac{K_{is}}{s}).(w_m^* - w_m) \tag{II-19}$$

Où, K_{ps} et K_{is} sont les gains proportionnel et intégral du régulateur de vitesse PI, respectivement. Ces valeurs peuvent être déterminées à partir de la procédure de sélection des gains d'un régulateur de vitesse PI. [14]

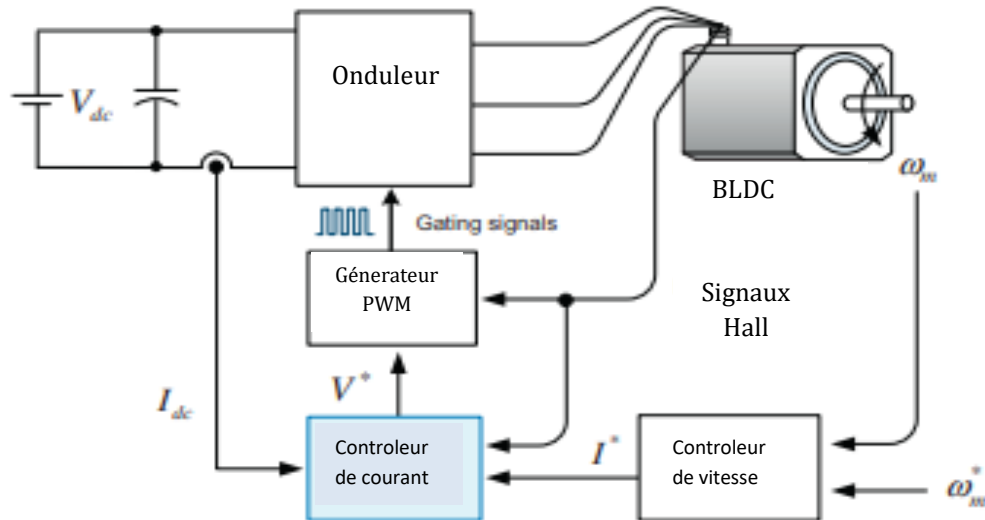


Figure (II-6) : Système de contrôle de vitesse utilisant la régulation du courant de liaison CC

Pour obtenir le courant de référence de DC-link I_{dc}^* produite par le contrôleur de vitesse, les signaux de commutation pour un onduleur sont généralement générés par une technique de régulation de l'hystérésis ou une technique PWM.

II.4.1 Contrôle du courant

La technique de l'hystérésis est simple à mettre en œuvre et donne une excellente réponse au régime transitoire car elle détermine directement les états de commutation à partir de l'erreur du courant. Cependant, la technique d'hystérésis présente l'inconvénient majeur de faire varier la fréquence de commutation en fonction des conditions de fonctionnement telles que la force contre-électromotrice, les conditions de charge, etc. Ainsi, pour avoir une fréquence de commutation constante, une technique PWM est couramment utilisée, mais elle est moins performante que la technique d'hystérésis.[14]

Dans le cas de l'utilisation d'une technique PWM, une tension de référence du moteur (ou rapport cyclique PWM) est générée par le contrôleur de courant PI à partir d'une erreur entre le courant de commande I_{dc}^* et le courant actuel comme :

$$V^* = \left(K_{pc} + \frac{K_{ic}}{s} \right) (I_{dc}^* - I_{dc}) \quad (\text{II-20})$$

Tel que, K_{pc} et K_{ic} sont respectivement les gains proportionnels et intégral du contrôleur de courant. Ces valeurs peuvent également être déterminées à partir de la procédure de sélection des gains d'un contrôleur de courant PI.

Enfin, les commutateurs actifs réels sont déterminés en combinant les signaux de commutation PWM avec le signal de mode de fonctionnement décodé à l'aide des signaux de capteurs à effet Hall. [14]

II.5 Techniques de modulation de largeur d'impulsion PWM

La technique PWM est l'une des techniques de contrôle de vitesse les plus populaires pour le moteur BLDC. Dans cette technique, un signal haché à haute fréquence avec un rapport cyclique spécifique est multiplié par des signaux de commutation de VSI. Par conséquent, il est possible d'ajuster la tension de sortie de l'onduleur en contrôlant le rapport cyclique des impulsions de commutation de l'onduleur. Les inconvénients des méthodes analogiques sont qu'elles sont sujettes au bruit et qu'elles changent avec le changement de tension et de température. Ils subissent également des changements en raison de la variation des composants. Ils sont moins flexibles que les méthodes numériques.

La tension d'alimentation est coupée à une fréquence fixe avec un rapport cyclique en fonction de l'erreur de courant. Par conséquent, le courant et le taux de changement de courant peuvent être contrôlés. La durée d'alimentation en deux phases est limitée par les angles de commutation en deux phases. Le principal avantage de la stratégie PWM est que la fréquence de hachage est un paramètre fixe; par conséquent, les bruits acoustiques et électromagnétiques sont relativement faciles à filtrer. Il existe également deux façons de gérer la commutation du courant d'entraînement : le hachage dur et le hachage doux. Dans la technique de coupe dure, les deux transistors de phase sont entraînés par le même signal pulsé : les deux transistors sont allumés et éteints en même temps. L'approche soft permet non seulement un contrôle du courant et du taux de changement du courant, mais aussi une minimisation de l'ondulation du courant. [15]

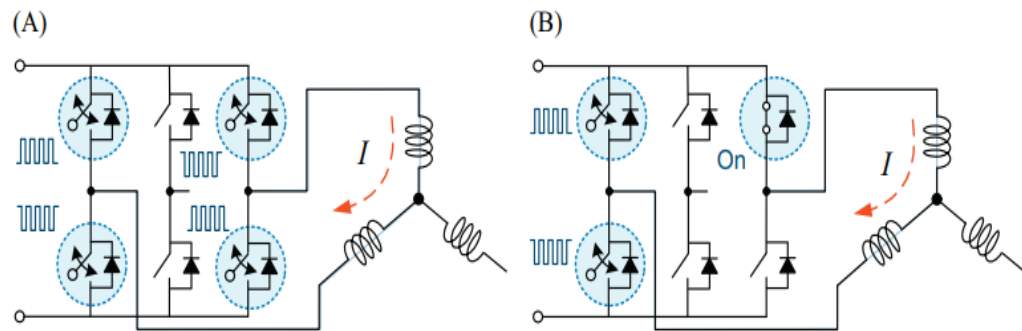


Figure (II-7) : Techniques PWM : (A) commutation bipolaire et (B) commutation unipolaire.

II.6 Contrôle sans capteur des moteurs à courant continu brushless

Les capteurs à effet Hall pour obtenir la position du rotor sont indispensables pour les entraînements de moteurs BLDC. Cependant, comme les capteurs de position augmentent le coût et la taille du moteur et réduisent la fiabilité d'un système d'entraînement, un entraînement de moteur BLDC sans capteurs de position ou de vitesse devient de plus en plus populaire.

Diverses méthodes sans capteur pour les moteurs BLDC ont été développées dernièrement, une méthode bien connue est la méthode basée sur le back-EMF [11]. Il existe également une méthode basée sur le courant des diodes de roue libre de la phase de non-commutation [13] et une méthode basée sur un observateur de flux. Parmi celles-ci, nous explorerons la méthode basée sur la force contre électromotrice, qui est la plus largement utilisée pour les applications à faible coût telles que les entraînements de ventilateurs, de pompes et de compresseurs en raison de son principe et de sa mise en œuvre simples. [16]

II.6.1 Contrôle sans capteur basé sur la force contre électromotrice

La force contre électromotrice FCEM d'un moteur comprend des informations sur le flux magnétique. Ainsi, la position du rotor peut être obtenue en détectant la FCEM. Il est difficile de mesurer le FCEM des moteurs à courant alternatif parce que les trois enroulements sont excités en tout le temps. D'autre part, dans les entraînements de moteur BLDC triphasés, puisque seulement deux des enroulements triphasés conduisent à la fois, la FCEM apparaît dans l'enroulement ouvert de la phase non conductrice. Ainsi, elle peut être détectée en détectant la tension de la phase non conductrice. Dans les moteurs BLDC, on peut considérer que l'enroulement de phase non conducteur joue le rôle d'un capteur pour détecter la position.

Dans ce cas, il n'est pas nécessaire de détecter toute la forme d'onde du FCEM. Au lieu de cela, les instants de commutation peuvent être identifiés en détectant uniquement le point de passage par zéro (ZCP) du FCEM. De la figure (II-8), nous pouvons facilement voir que les forces CEM d'une phase non conductrice passent toujours par zéro (voir les flèches des parties). Par exemple, dans la section 2 où les phases AS et CS sont conduites et les phases BS sont non conductrices, nous pouvons identifier que le Back-FEM des phases BS passe par zéro. En outre, on peut voir que les commutations se produisent 30 degrés électriques après les ZCP des FCEM.

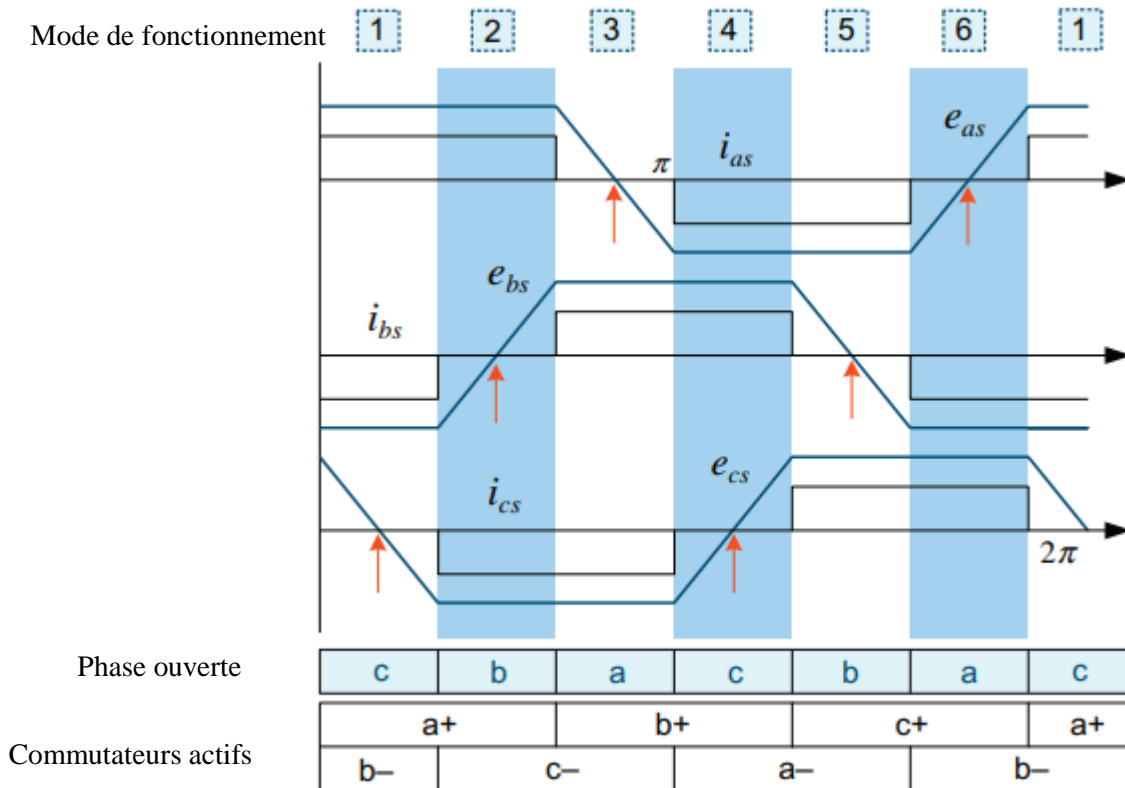


Figure (II-8) : ZCP de back-FEM.

Par conséquent, sans capteur de position, la commutation de phase est rendue possible en détectant les ZCP du force CEM.

Pour les enroulements triphasés connectés en Y, le Back-FEM à travers une phase peut être obtenu directement à partir de la mesure de la tension de référence de phase au point neutre des enroulements comme indiqué sur la figure (II-9). Cependant, dans la plupart des cas, le point neutre des enroulements n'est pas accessible. Ainsi, la méthode la plus couramment utilisée est de créer un point neutre virtuel en utilisant les tensions terminales triphasées. Les méthodes

basées sur le FCEM ont les problèmes suivants. Lors de la mesure de la tension de la borne, une grande quantité de bruit électrique est induite sur la tension de la borne détectée en raison des signaux de commutation PWM conduisant le moteur. Les filtres passe-bas sont généralement utilisés pour supprimer le bruit de commutation indésirable, mais le retard du filtre passe-bas de phase provoque un retard de commutation à des vitesses élevées. En outre, une atténuation par un diviseur de tension sera nécessaire pour abaisser le niveau du signal détecté à une plage acceptable du circuit de commande. Cela réduit le rapport signal-bruit à basse vitesse, entraînant une dégradation des performances de fonctionnement à basse vitesse. De plus, la commutation se produit 30 degrés électriques après les ZCP des FCEM. Il est difficile d'obtenir des instants de commutation précisément lorsque la vitesse de fonctionnement change.

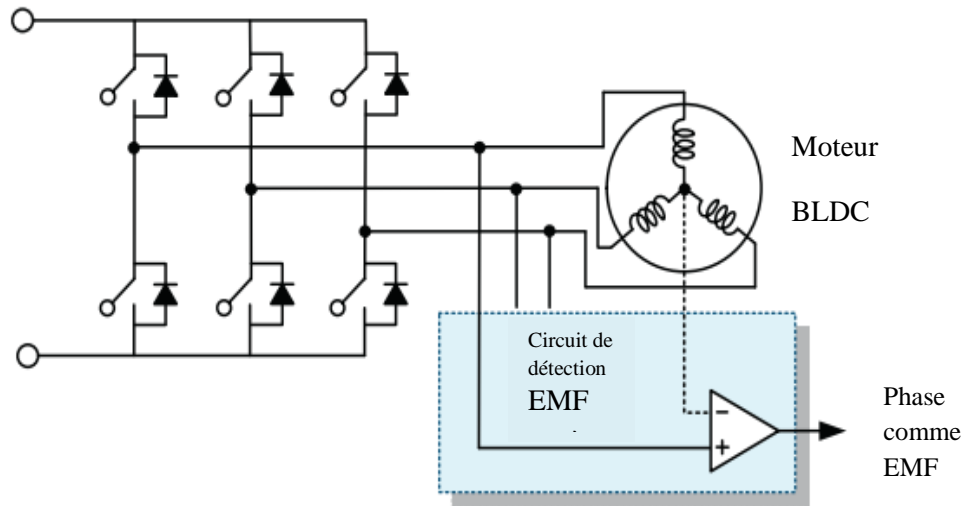


Figure (II-9) : Circuit de détection de FCEM

II.7 Conclusion

Ce chapitre est consacré à la modélisation du moteur BLDC et à l'introduction des différentes méthodes de contrôle de sa vitesse. Après avoir écrit les équations différentielles électriques pour les tensions, magnétiques pour le flux et mécaniques pour la vitesse et le couple, nous avons donné le modèle mathématique correspondant dans l'espace d'état, puis nous avons montré que la vitesse de ce moteur est contrôlée de deux manières différentes, en boucle ouverte et en boucle fermée, et nous savons que ce dernier est robuste et a de bonnes performances s'il utilise deux régulateurs, dont l'un est pour le courant, et l'autre pour la vitesse.

CHAPITRE III :

Implémentation d'un commande numérique d'un moteur BLDC

III.1 Introduction

L'implémentation des lois de contrôle des systèmes d'entraînement électrique sur des processeurs numériques est très importante, car elle nous permet d'identifier des problèmes réels dans le monde pratique, dont nous mentionnons :

Côté matériel :

- Limitation des composants électroniques et électriques à hautes fréquences.
- Limitation du moteur électrique en courant, en tension et en fréquence.
- Limitation du processeur des cartes de développement ou limitation de sa mémoire interne...etc.

Côté logiciel :

- La taille du programme de loi de contrôle et la difficulté de mise en œuvre.
- La présence des fonctions mathématiques difficiles à programmer.

C'est exactement le contraire de ce que nous trouvons dans le monde idéal (la simulation).

Dans ce sens, nous avons consacré ce chapitre à l'implémentation du contrôle de vitesse des moteurs à courant continu sans balais BLDC en boucle ouverte sur le microcontrôleur STM32F407. Nous mettons d'abord en évidence l'ensemble du banc d'essai expérimental et montrons les caractéristiques de tous les éléments importants qui le composent, tels que le moteur, l'onduleur réalisé et la carte de développement. La deuxième partie que nous consacrerons au programme de loi de contrôle de vitesse. Enfin, nous expliquerons les résultats expérimentaux obtenus, des tensions, des signaux à effet d'Hall et de la vitesse de rotation.

III.2 Description du banc d'essai

La figure (II-1) représente le banc d'essai expérimental d'implémentation du contrôle numérique de vitesse d'un moteur à courant continu sans balais, où il contient les éléments suivants :

1. Alimentation en courant continu
2. Onduleur triphasé
3. Carte de développement STM
4. Moteur BLDC avec capteur de vitesse.

Immédiatement après que la carte de développement a reçu les premiers signaux des capteurs à effet Hall placés à l'intérieur du moteur, l'algorithme représenté sur la figure (III-6) envoie des signaux de commande aux gâchettes des IGBT de l'onduleur triphasé, selon le tableau (III-1) ci-joint, pour donner une tension trapézoïdale à sa sortie, et ceci pour alimenter le moteur. Pour varier la vitesse du moteur, nous devons modifier la valeur de la tension continue à l'entrée de l'onduleur.

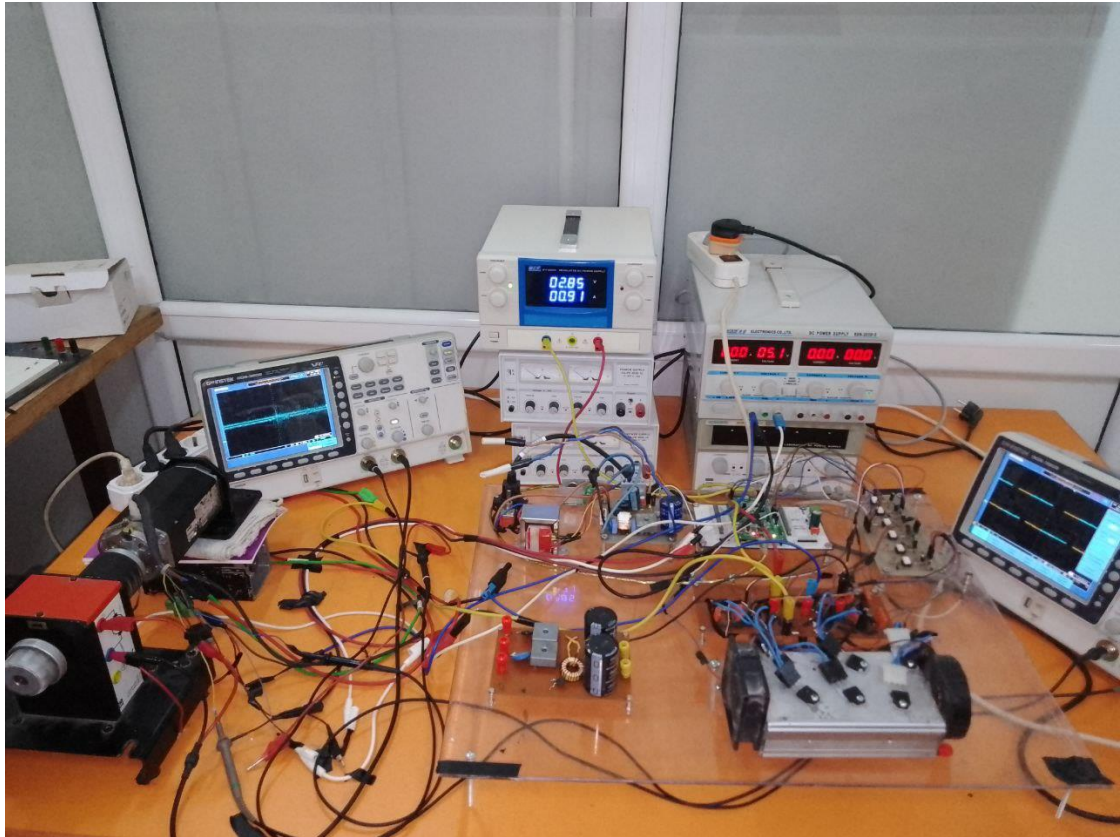


Figure (III-1) : Le banc d'essai expérimentale.

III.2.1 Moteur BLDC triphasé et son capteur de vitesse

Le moteur utilisé dans cette expérience possède les caractéristiques suivantes :

$U_N = 40 V$; $I_N = 12 A$; $n_N = 3500 rpm$; $I_{fm} = 56 A$. Ce moteur est accouplé avec une génératrice tachymétrie fig. (III- 2) pour la mesure de la vitesse dont le gain est : $1v \rightarrow 1000 tr/m$

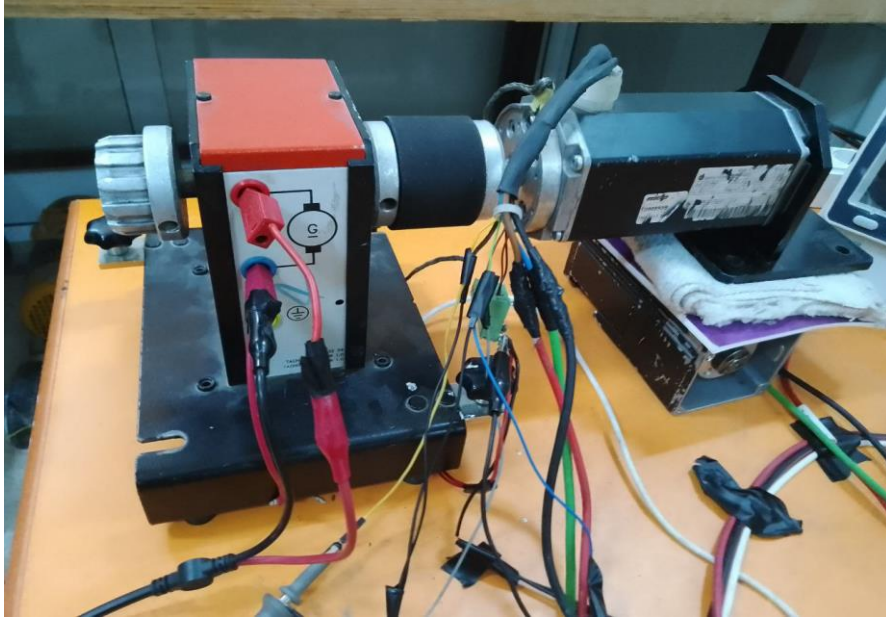


Figure (III-2) : Moteur BLDC et son capteur de vitesse.

III.2.2 Carte de développement STM32F407-discovery

Elle permet aux utilisateurs de développer facilement des applications avec un microcontrôleur haute performance STM32F4 muni d'un processeur ARM Cortex-M4 32bits. Elle inclut tout ce qui est nécessaire pour les débutants ou pour les utilisateurs expérimentés pour commencer rapidement à effectuer des développements. Peu coûteuse et facile à utiliser, la carte STM32F4 Discovery (figure (III-3)) aide à découvrir les fonctionnalités haute performance du microcontrôleur STM32F4 et à développer facilement des applications. [20]

La carte STM32F4Discovery offre les caractéristiques suivantes :

- Un microcontrôleur STM32F407VGT6 avec processeur ARM Cortex-M4 32 bits doté de :
- Une mémoire Flash de 1 Mo.
- Une mémoire vive de 192 Ko.
- Une FPU.
- Un ST-LINK/V2 intégré.
- Alimentation de la carte Par bus USB, par alimentation externe : 3 V ou 5 V.
- Un accéléromètre à 3 axes ST MEMS LIS3DSH.
- Un capteur audio (microphone) digital omnidirectionnel ST MEMS MP45DT02.
- Un DAC audio avec haut-parleur de classe D intégré.

- Huit LEDS :
 - LD1 (rouge/vert) pour la communication USB,
 - LD2 (rouge) pour la mise sous tension 3.3 V,
 - Quatre LEDS Utilisateur : LD3 (orange), LD4 (vert), LD5 (rouge) et LD6 (bleu),
 - 2 LEDS USB OTG (USB On-The-Go),
 - LD7 (vert) VBUS,
 - LD8 (rouge) surintensité.
- Deux boutons poussoirs (utilisateur et réinitialisation).
- Interface USB OTG avec connecteur micro-AB.
- En-têtes d'extension pour les E/S pour une connexion rapide à la carte.

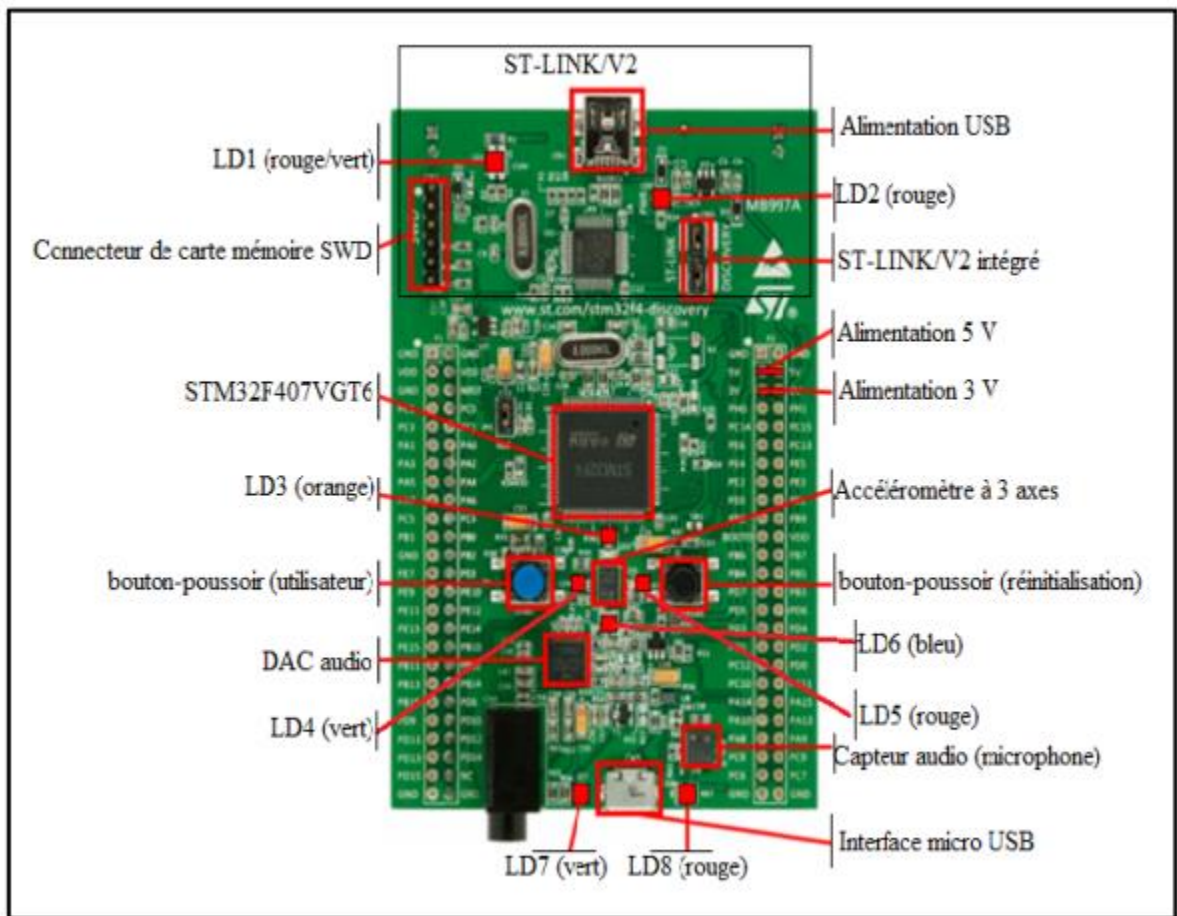


Figure (III-3) : Carte de développement STM32F407-discovery.

II.2.3 L'onduleur triphasé

Nous avons recréé l'onduleur triphasé en changeant son modèle intégré (compact), figure (III-4) en modèle ouvert (éclaté), comme dans la figure (III-5).

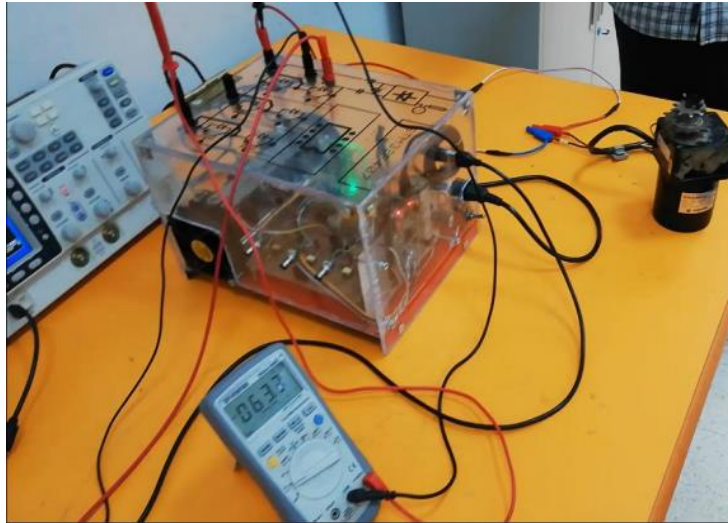


Figure (III-4) : Onduleur triphasé : structure compacte.

Ce modèle permet une maintenance facile et un diagnostic rapide des défauts. La figure (III-5) montre les éléments de base de l'onduleur tels que : 1-- Circuit d'alimentation, 2--Circuit de commande, 3--Circuit d'adaptation et d'isolation ;4--Circuit de puissance.

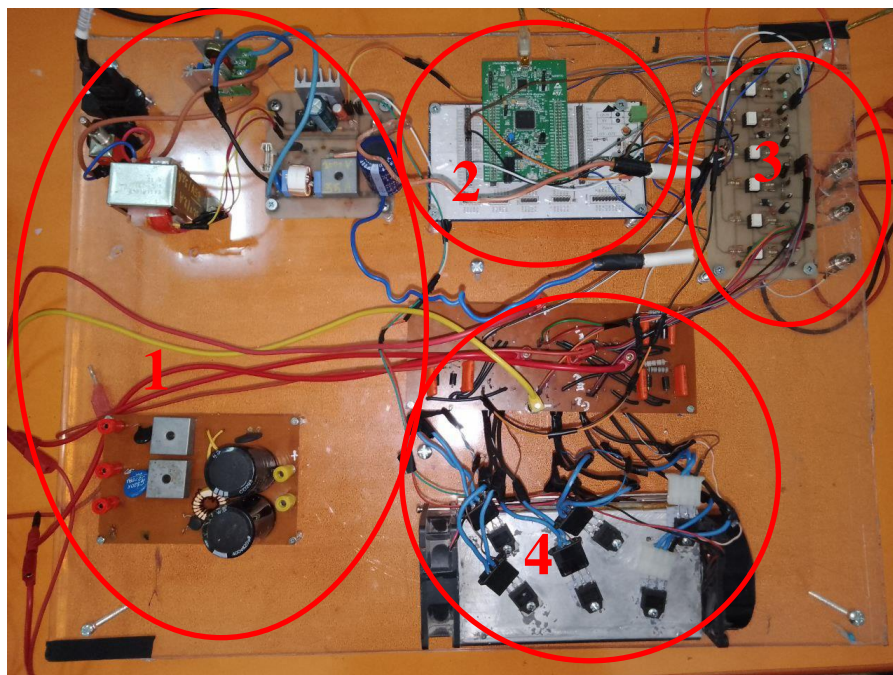


Figure (III-5) : Onduleur triphasé : structure éclatée.

III.3 Algorithme de contrôle

Les signaux des impulsions des capteur à effet d'Hall sont accusés dans des entrées numérique 'Digital Input'. Pour générer les signaux de commandes des interpréteurs de puissances : $H_1, L_1, H_2, L_2, H_3, L_3$ il faut réaliser la table de commutation par des circuits logiques. Ses signaux de commande permettent de piloter l'onduleur triphasé comme un commutateur au moteur BLDC triphasé.

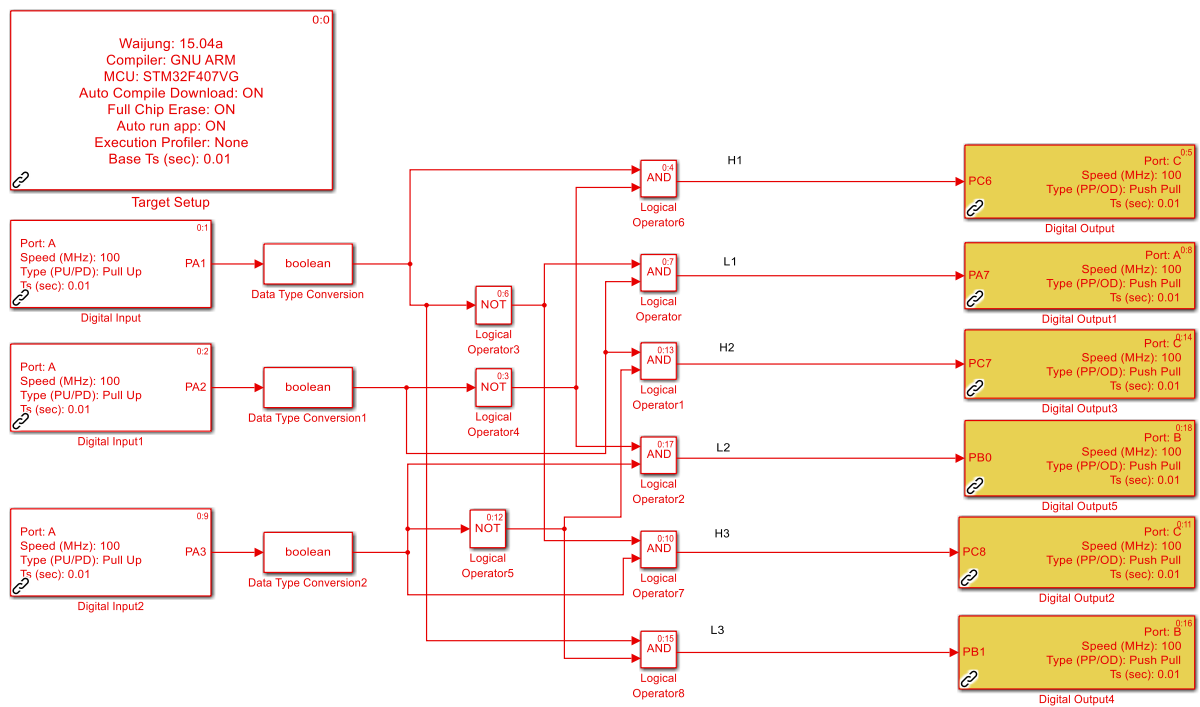


Figure (III-6) : Algorithme de contrôle.

III.3.1 Description du système d'entraînement

Le schéma fonctionnel de base du système d'entraînement du moteur à courant continu sans balais BLDC, comme illustré sur la figure (III-7). Le système d'entraînement se compose de quatre parties principales, un convertisseur de puissance, des capteurs à effet d'Hall, un moteur BLDC et un algorithme de contrôle. Le convertisseur de puissance transforme la puissance de la source vers le BLDC qui à son rôle de convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. L'une des principales caractéristiques du moteur à courant continu sans balais réside dans les capteurs

de position du rotor et les signaux de commande qui peuvent être une commande de couple, une commande de tension, une commande de vitesse, etc. Les algorithmes de contrôle déterminent le signal de la gâchette de chaque semi-conducteur dans le convertisseur d'électronique de puissance.

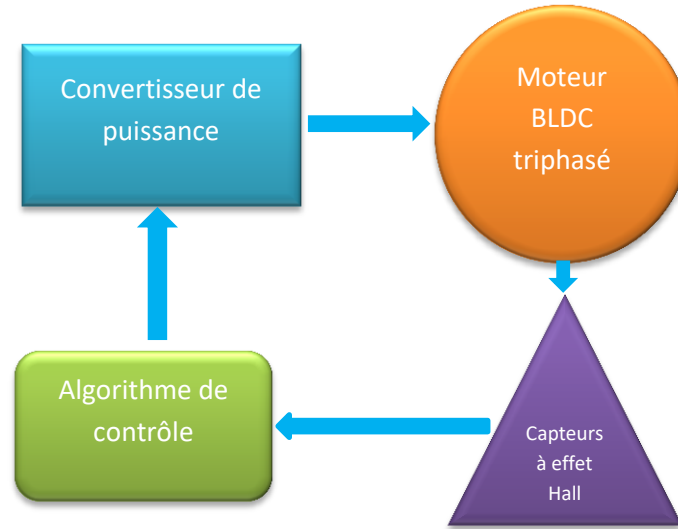


Figure (III-7) : Structure de système d'entraînement.

Le moteur BLDC est alimenté par un onduleur à six commutateurs où, pour chaque étape de commande, deux phases fonctionnent simultanément tandis que la troisième est éliminée. A noter que, les signaux, du capteur de position à effet Hall (H_a , H_b , H_c) sont décalés de 120° électrique, régissent ces interrupteurs par génération des impulsions ($H1$, $L1$, $H2$, $L2$, $H3$, $L3$).

III.3.2 Séquence de commutation du capteur à 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 (III-1) 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 (III-

1), où la séquence de commutation pour la rotation de l'arbre est dans le sens des aiguilles d'une montre.

La figure (III-8) montre la méthode de génération du signal de commande de premier interrupteur de puissance H_1 à partir du tableau (III-1) tel que :

$$H_1 = H_a \overline{H_b} \overline{H_c} + H_a \overline{H_b} H_c = H_a \overline{H_b} (H_c + \overline{H_c}) = H_a \overline{H_b}$$

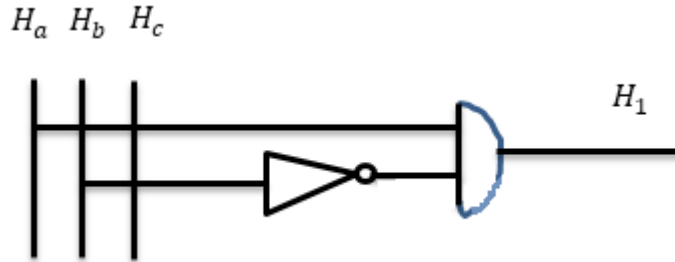


Figure (III-8) : Génération d'un signale de commande.

Tableau (III-1) : Séquence de commutation en utilisant les signaux des capteurs à effet Hall.

Ha	Hb	Hc	H1	L1	H2	L2	H3	L3
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	0	0	0	1
0	1	0	0	1	1	0	0	0
1	1	0	0	0	1	0	0	1
0	0	1	0	0	0	1	1	0
1	0	1	1	0	0	1	0	0
0	1	1	0	1	0	0	1	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0

III.4 Résultats expérimentaux

Pour faire contrôler la vitesse du moteur BLDC triphasé en boucle ouverte, nous avons effectué deux tests différents. Application d'une seule consigne de vitesse et application des deux consignes successives. Ses tests ont été effectués pour le moteur BLDC lors d'un fonctionnement à vide.

1) Application d'une consigne de vitesse de **90 tr/m** pour : $V_{dc}=3.03V$ figure (III-9) :

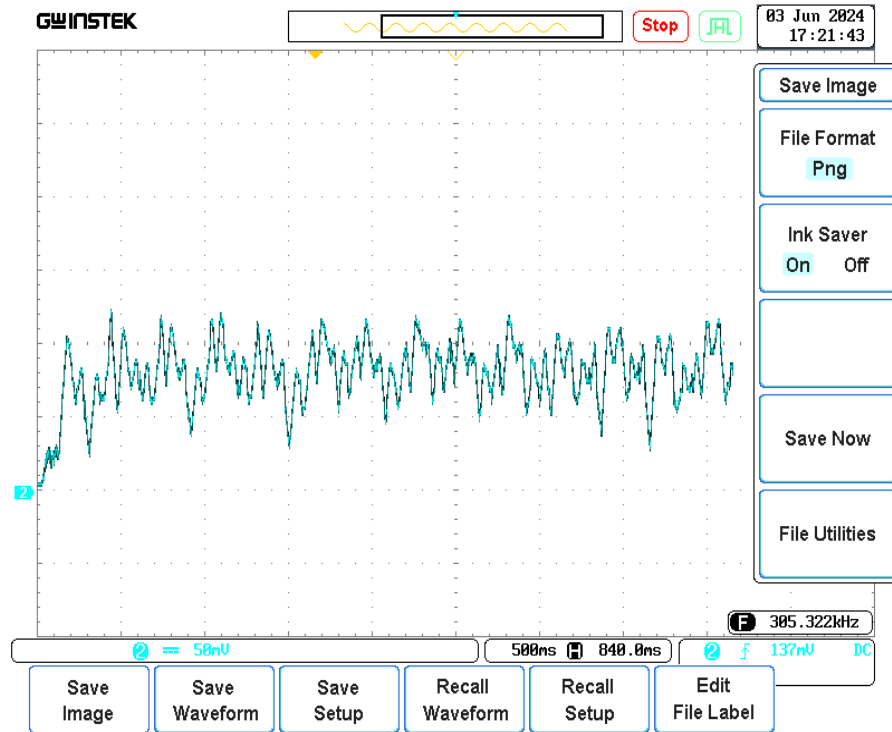


Figure (III-9) : Vitesse du moteur BLDC pour une consigne de 90 tr/m.

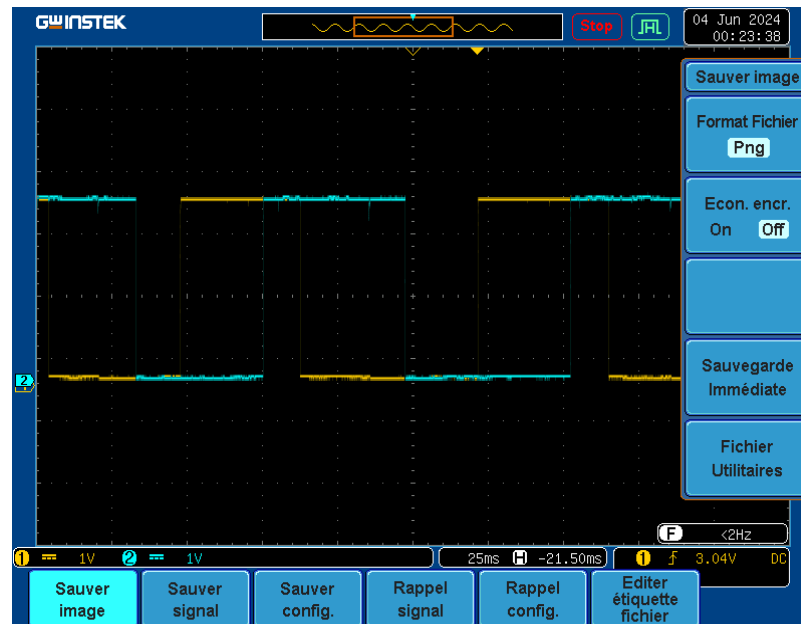


Figure (III-10) : Signaux des capteurs à effet hall : H_a et H_b pour : $T \approx 90ms$.

2) Application d'une consigne de vitesse de **130 tr/m** pour : $V_{dc}=5.20V$ figure III-11:

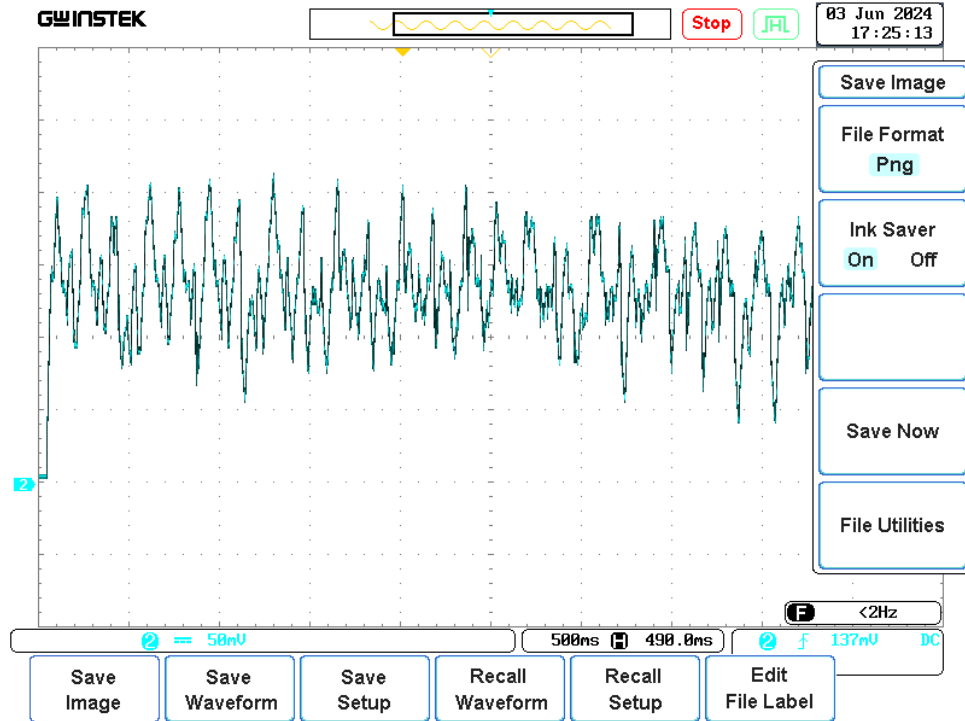


Figure (III-11): Vitesse du moteur BLDC pour une consigne de 130 tr/m.

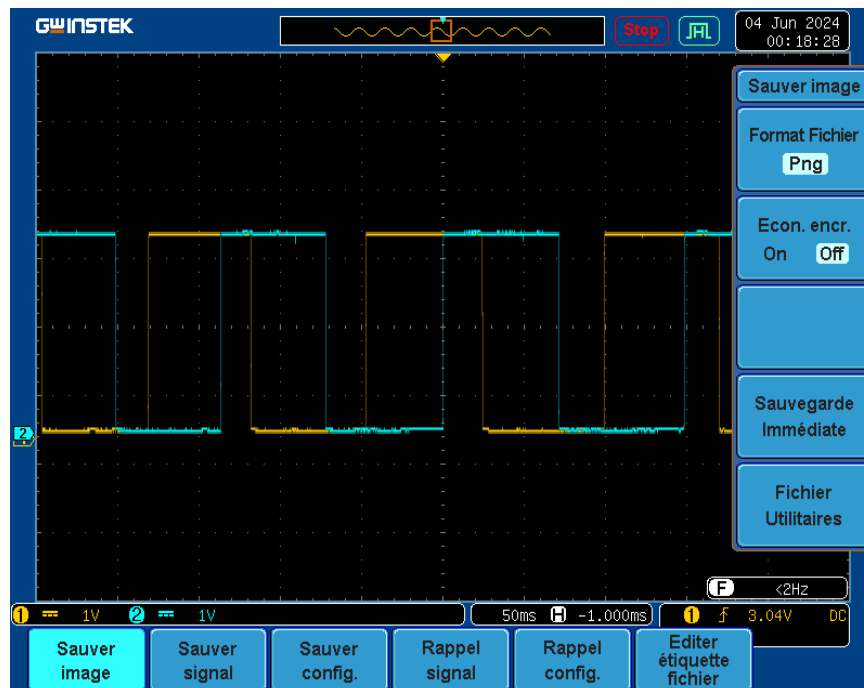


Figure (III-12) : Signaux des capteurs à effet hall Ha et Hb pour : $T \approx 130ms$.

3) Application des deux consignes successives : 120 tr/m et 240 tr/m :

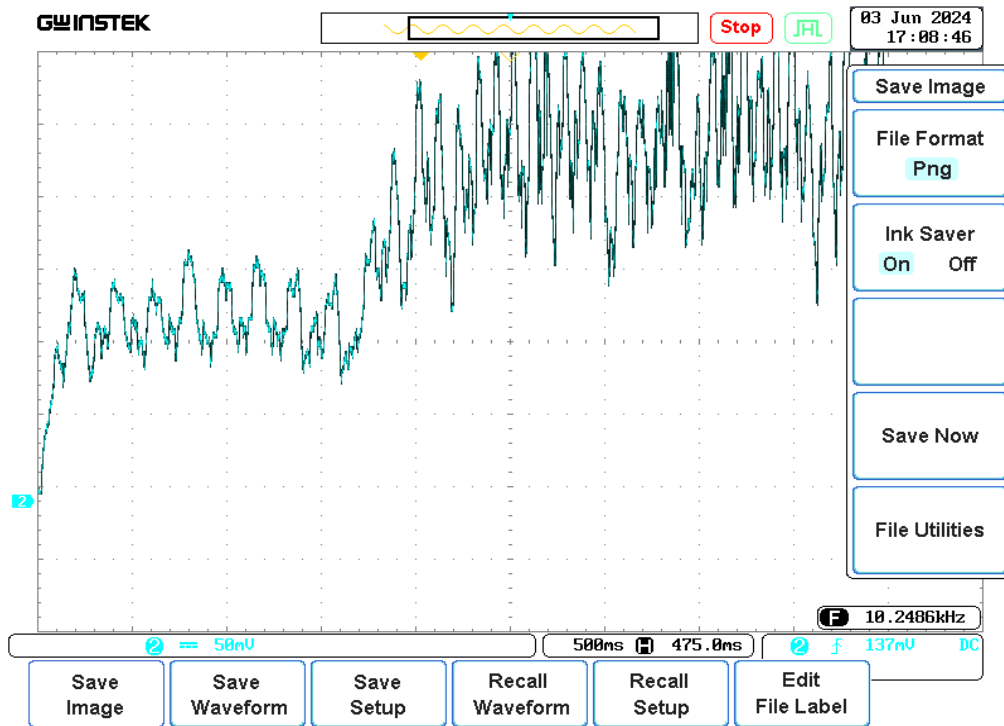


Figure (III-13): Vitesse du moteur BLDC pour deux consignes : 120 tr/m et 240 tr/m.

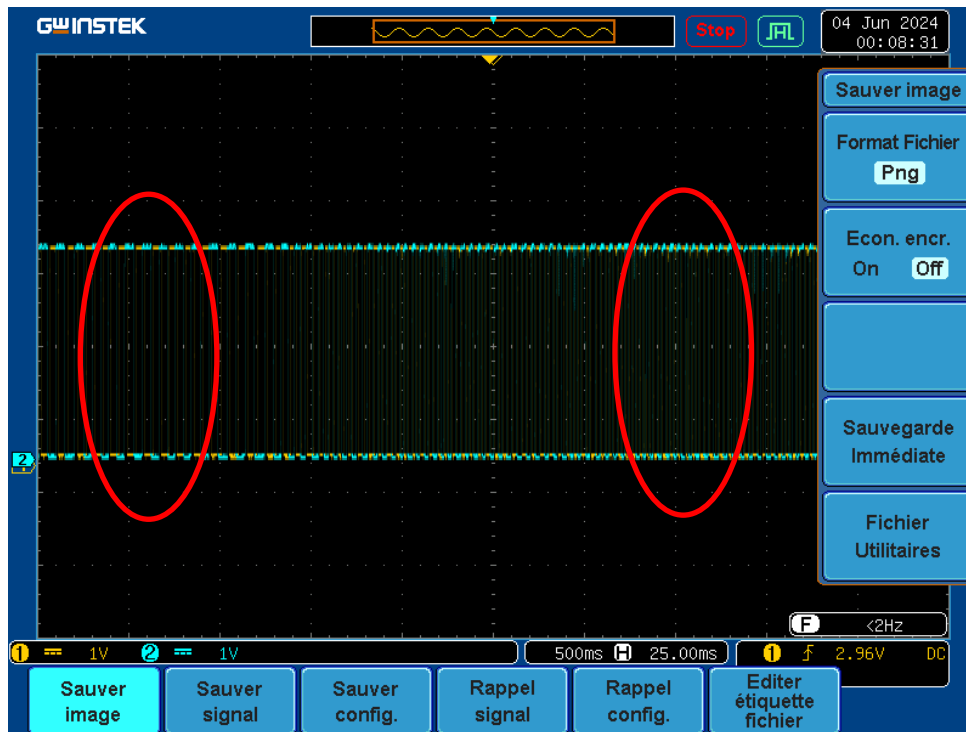


Figure (III-14) : Signaux des capteurs à effet hall pour deux consignes : 120 tr/m et 240 tr/m.

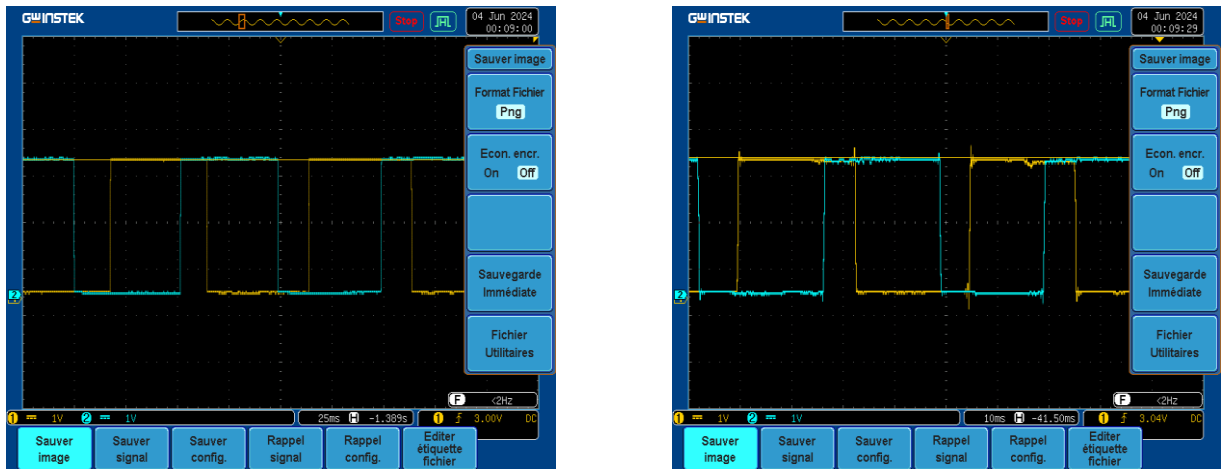


Figure (III-15) : Signaux des capteurs à effet hall pour deux consignes : 120 tr/m et 240 tr/m.



Figure (III-16) : Tension V_a de la sortie de l'onduleur.

III-5 Interprétation des résultats

On remarque sur la figure (III-9) que la courbe de vitesse se stabilise exactement à la vitesse de 90 tr/m, correspondant à la tension de 3 volts, avec un temps de réponse court d'une 0.2 seconde, sans dépassement ni erreur statique. Il en résulte cependant de petites ondulations dans le signal due à l'utilisation du tachymètre comme capteur de vitesse, en plus de la petite valeur de vitesse.

La deuxième figure (III-10) représente également deux signaux issus du capteur effet Hall, ce qui montre bien que la fréquence des deux signaux correspond aux vitesses du moteur.

Concernant à la figure (III-11), la courbe de vitesse se stabilise également à la valeur de vitesse requise, correspondant à la tension constante de 5 volts, sans erreur statique ni dépassement, avec quelques ondulations. En observant les signaux des deux capteurs, on constate que leur fréquence est très proportionnelle à la vitesse de rotation du moteur, avec un décalage entre H_a et H_b figure (III-12).

En appliquant deux valeurs de vitesse successives 120 tr/m et 240 tr/m figure (III-13), nous constatons que la courbe de vitesse suit avec précision ces deux valeurs dans un court temps de réponse d'une 0.1 seconde, avec certaines des ondulations susmentionnées présentes.

La première figure (III-14) représente deux signaux du capteur HALL, où l'on remarque le changement de fréquence du signal au moment exact du changement de vitesse, comme le montre l'image agrandie de la figure (III-15).

La dernière figure (III-16) représente la courbe de la tension V_a en sortie de l'onduleur, qui prend la forme d'un trapèze, comme connu dans la partie théorique.

III.6 Conclusion

Le contrôle de la vitesse de rotation du moteur BLDC en boucle ouverte est simple et facile à mettre en œuvre, car il est possible d'imposer certaines vitesses au moteur proportionnelles avec son alimentation DC. Ses consignes de vitesse peuvent être augmentées ou diminuées en fonction de la variation de la charge.

Pour cela, dans ce chapitre, nous avons implémenté le contrôle de la vitesse en boucle ouverte sur la carte de développement STM32F407 du moteur BLDC. Nous avons remarqué que la vitesse peut être variée en modifiant seulement la tension continue. Les résultats expérimentaux étaient bons et encourageaient à continuer à mettre en œuvre d'autres contrôles de vitesse de rotation en boucle fermée.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail est l'implémentation du contrôle numérique de vitesse du moteur BLDC en boucle ouverte sur la carte de développement STM32F407. Pour atteindre cet objectif, nous avons consacré trois chapitres au lecteur. Dans le premier chapitre, nous avons mentionné des généralités sur le moteur, sa structure, son principe de fonctionnement, ses types et ses applications, en plus de ses avantages et inconvénients. Ceci afin de remettre le lecteur au cœur du sujet en se faisant une idée globale de ce moteur.

Quant au deuxième chapitre, nous y avons mis le modèle mathématique du moteur (équations électriques de tension, équations magnétiques et équations mécaniques) d'une part, et d'autre part, nous avons expliqué la plupart des méthodes et lois de contrôle de la vitesse du moteur, que ce soit en boucle ouverte ou en boucle fermée.

L'étude a prouvé que le contrôle de vitesse en boucle fermée utilisant deux régulateurs un pour la vitesse et l'autre pour le courant, est le meilleur et le plus approprié pour ce moteur.

Dans le dernier chapitre, nous avons implémenté pratiquement le contrôle numérique de vitesse du moteur BLDC sur la carte de développement STM32F407. Dans un premier temps, nous avons réalisé un onduleur triphasé de manière éclatée pour l'utiliser comme un commutateur du moteur. Ensuite, l'onduleur est associé avec le moteur pour tester sa qualité de contrôle de vitesse.

Nous avons effectué deux tests sur la vitesse du moteur. Dans le premier, nous lui avons imposé une seule vitesse. Dans le deuxième test, deux et trois vitesses successives ont été imposées. Les résultats ont été bons, malgré quelques bruits dans la courbe de vitesse, grâce à notre mesure par un tachymètre, elle suit également avec précision sa consigne dans chaque cas. Les tests ont porté sur le moteur sans charge, mais lors de l'utilisation de charge, il est mieux d'utiliser un contrôle de vitesse en boucle fermée, qui possède deux régulateurs un pour la vitesse et l'autre pour le courant, pour assurer un bon fonctionnement du contrôle en surveillant ses indices de performance.

Références bibliographiques

- [1]: **K. Rajashekara**, « Present status and future trends in electric vehicle propulsion technologies ». IEEE J Emerg Select Topics Power Electron 2013;1(1):3–10.
- [2]: **B. Singh, S. Singh**, « State of the art on permanent magnet brushless DC motor drives », Journal of Power Electron 2009; 9:1–17.
- [3]: **S. Dinesh Kumar**, « modeling of brushless dc drive using genetic algorithm-based tuning of pid controller », International Journal of Electrical and Electronics Engineering Research (IJEEER) ISSN (P), Avadi, Chennai, Tamil Nadu, India, Aug 2014,pp .113-126
- [4] : **B. Bissonnette**, « Le moteur sans balais », Article, janvier 2014.
- [5] : **M. Etique** « Entraînements Régles MET2 », Cours, Département D'Electricité et D'Informatique, Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIGVd), 2005.
- [6]: <https://e3arabi.com/?p=674848>
- [7]: <https://www.electrical4u.com/brushless-dc-motors>
- [8]: <http://fr.rmbttmotor.com/news/what-re-the-advantages-and-disadvantages-ofbr-8515392>.
HTML
- [9] : **P. Mayé**, « Moteurs électriques pour la robotique ». Editions Dunod, Paris, 2000.
- [10] : **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 Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2013.
- [11]:**F. Gillon**, « Modélisation et optimisation par plans d'expériences d'un moteur à commutation électronique ». Thèse doctoral université de Lille.
- [12]: <http://fr.rmbttmotor.com/news/what-re-the-advantages-and-disadvantages-ofbr-8515392>.
HTML
- [13] : <http://www.lmlindustrie.com>
- [14] : **D. Bidart**, « Commande coopérative des systèmes mono convertisseurs multi machine synchrones », thèse de doctorat, univ ersité de Toulouse, Juin 2011.
- [15]: **U. Das and P. Kumar Biswas and S. Parek**, « Performance Analysis for Open Loop Brushless DC Motor Drive », International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), pp 1220-1228, Volume-8, Issue-6, August 2019.
- [16]: **H. Hameed**, « Brushless DC motor controller design using MATLAB applications », IEEE, 1st International Scientific Conference of Engineering Sciences, pp 44-49, 2018.

Références bibliographiques

- [17]: **M. Usagi** « Chapter-10-Brushless-direct-current-motors Electric-Motor-Control », King Mongkut's University of Technology North Bangkok North Bangkok.
- [18]: **V. Kumar, R. Agarwal and S. Kumar**, « Closed Loop Speed Control of BLDC Motor using Microcontroller and LABVIEW Interface Monitoring », International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, June 2018.
- [19]: **T. Kim, H.-W. Lee, M. Ehsani**, « Position sensorless brushless DC motor/generator drives: review and future trends », IET Electr. Power, Appl. 1 (4) (2007) 557-564.
- [20] : Fiche technique de Carte de développement STM32F407-discovery, Cet article est téléchargé au format PDF sur le site web : <https://www.electronique-mixte.fr/wpcontent/uploads/2018/08/Cours-Microcontr%C3%B4leur-microprocesseur-48.pdf>

ملخص

يستخدم محرك التيار المستمر بدون فرش على نطاق واسع في عدة تطبيقات مثل الأجهزة المنزلية والسيارات والفضاء والمعدات والأدوات الصناعية الطبية والآلية. مزاياه مقارنة بمحرك التيار المستمر بفرش أو المحرك الحثي هي: كفاءة وموثوقية أعلى، ضوضاء صوتية أقل، استجابة ديناميكية أصغر وأخف وزناً، نطاق سرعة أعلى، سرعة أفضل مقابل خصائص عزم الدوران وعمر أطول.

ولهذا السبب فإن الهدف من هذا العمل هو التحكم في سرعة محرك التيار المستمر بدون فرش بحلقة مفتوحة، حيث يتم تنفيذ التحكم الرقمي على متحكم STM32F407 عالي الأداء لمحرك بقدرة 480 واط. تم تنظيم العمل في ثلاثة أجزاء، يعرض الأول عموميات عن هذه المحركات ومبدأ تشغيلها وأنواعها وتطبيقاتها بينما خصص الجزء الثاني لعرض النموذج الرياضي للمحرك وتوضيح جميع طرق التحكم في سرعته سواء في الحلقة المفتوحة أو المغلقة. في الجزء الأخير، سنعرض طريقة التنفيذ العملي للتحكم في سرعة المحرك بحلقة مفتوحة على STM32F407.

النتائج التجريبية كانت جيدة، على الرغم من بعض الضوضاء في منحنى السرعة، وذلك راجع لمقياس سرعة الدوران، كما أنه يتبع سرعته المفروضة بدقة في كل حالة. تم إجراء الاختبارات على المحرك بدون حمولة، ولكن عند التشغيل تحت الحمولة فمن الأفضل استخدام التحكم في سرعة بحلقة مغلقة.

الكلمات المفتاحية : محرك التيار المستمر بدون فرش، متحكم STM32F407، النتائج التجريبية.

Résumé

Le moteur à courant continu sans ballais BLDC est largement utilisé dans des applications telles que les appareils électroménagers, l'automobile, l'aérospatiale, le médical, les équipements et instruments industriels automatisés. Ses avantages par rapport à un moteur à courant continu à balais ou à un moteur à induction sont : Efficacité et fiabilité supérieures, réduction du bruit acoustique, plus petit et plus léger, une plus grande réponse dynamique, une plage de vitesse plus élevée, Meilleures caractéristiques de vitesse par rapport au couple et une durée de vie plus longue.

Pour cela l'objectif de ce travail est de contrôler la vitesse d'un moteur BLDC en boucle ouverte, où la commande numérique est implémentée sur un microcontrôleur à haute performances STM32F407 pour un moteur BLDC de puissance de 480W. Le travail est organisé en trois parties la première présente des généralités sur les moteurs BLDC, son principe de fonctionnement, ses types et ses applications tandis que la deuxième partie est consacrée à la présentation du modèle mathématique du moteur et à la clarification de toutes les méthodes de contrôle de sa vitesse, que ce soit en boucle ouverte ou en boucle fermée. Dans la dernière partie, nous montrerons la méthode d'implémentation pratique du contrôle de la vitesse du moteur BLDC en boucle ouverte sur le STM32F407.

Les résultats expérimentaux ont été bons, malgré quelques bruits dans la courbe de vitesse, grâce à notre mesure par un tachymètre, elle suit également avec précision sa consigne dans chaque

cas. Les tests ont été faits sur le moteur à vide, mais lors de l'utilisation de charge, il est mieux d'utiliser un contrôle de vitesse en boucle fermée.

Mots clés : Le moteur à courant continu sans ballais BLDC, STM32F407, Résultats expérimentaux.

Abstract

BLDC brushless DC motor is widely used in applications such as household appliances, automotive, aerospace, medical, automated industrial equipment and instruments. Its advantages over a brushed DC motor or an induction motor are: Higher efficiency and reliability, reduced acoustic noise, smaller and lighter, greater dynamic response, higher speed range, better speed versus torque characteristics and longer life.

For that reason, the objective of this work is to control the speed of a BLDC motor in open loop, where digital control is implemented on a high-performance STM32F407 microcontroller for a BLDC motor with a power of 480W. The work is organized in three parts, the first present's generalities on BLDC motors, its operating principle, its types and its applications while the second part is devoted to the presentation of the mathematical model of the motor and the clarification of all the methods. Controlling its speed, whether in open loop or closed loop. In the last part, we will show the practical implementation method of open-loop BLDC motor speed control on STM32F407.

The experimental results were good, despite some noise in the speed curve, thanks to our measurement by a tachometer, it also follows its setpoint precisely in each case. Tests were done on the motor at no load, but when operating under load it is best to use closed loop speed control.

Keywords: BLDC brushless DC motor, STM32F407 microcontroller, the experimental results.