

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF M'SILA

FACULTE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT D'ELECTRUEONIQ

N°.....



DOMAINE : Science et Technologies

FILIERE : Électronique

OPTION : Instrumentation

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique
Par : Gherzouli Lahcene et Saidi Yousra

Intitule

Commande Vectorielle Sans Capteur d'un Moteur à
Courant Continu Sans Balais (BLDC)

Soutenu devant le jury composé de

Mr. MEZAACHE Hatem Université Med Boudiaf - M'sila Président

Dr. BENAHCENE Madani Université Med Boudiaf –M'sila Rapporteur

Dr. GARAH Messaoud Université Med Boudiaf –M'sila Examineur

Année universitaire : 2021 /2022

Résumé

Le but de cette étude est de montrer que la commande vectorielle et la technique la plus adaptée à la commande des moteurs triphasés, notamment les moteurs BLDC Brushless (sans balais). En conséquence, il y a une tendance croissante à l'utilisation de moteurs à courant continu sans balai (BLDC) en raison de leur grande efficacité, fonctionnement silencieux, forme compacte, fiabilité, et peu d'entretien. Néanmoins les moteurs BLDC nécessitent des informations sur la position du rotor afin de sélectionner l'angle de commutation approprié. Pour cela il existe des techniques de commande utilisant des capteurs de position que nous avons effectuée simulé dans MATLAB/SIMULINK.

L'objectif de ce projet est d'utiliser la technique de détection de la position du rotor sans capteurs. Pour cela on détecte les points de croisement nuls de la FCEM trapézoïdal induite dans les enroulements du moteur BLDC. Des simulations sur Matlab et Proteus ont été effectuées.

Mots-clés : Moteur DC sans balais (BLDC) ; Commande Vectorielle. Sensored BLDC, Sensorless BLDC.

Summary

The purpose of this study is to show that vector control is the most suitable technique for controlling three-phase motors, in particular BLDC Brushless motors (brushless). As a result, there is a growing trend in the use of brushless direct current (BLDC) motors due to their high efficiency, quiet operation, compact form, reliability, and low maintenance. However, BLDC motors require information about the rotor position in order to select the appropriate commutation angle. For this there are control techniques using position sensors that we have simulated in MATLAB/SIMULINK.

The objective of this project is to use the technique of detection of the position of the rotor without sensors. For this, the zero crossing points of the trapezoidal back emf induced in the windings of the BLDC motor are detected. Simulations on Matlab and Proteus were carried out.

Keywords: Brushless DC Motor (BLDC); Vector Order. Sensored BLDC, Sensorless BLDC.

ملخص

الغرض من هذه الدراسة هو إظهار أن التحكم في النواقل هو الأسلوب الأنسب للتحكم في المحركات ثلاثية الطور ، ولا سيما محركات BLDC بدون فرش (بدون فرش). نتيجة لذلك ، هناك اتجاه متزايد في استخدام محركات التيار المباشر بدون فرش (BLDC) نظرًا لكفاءتها العالية وتشغيلها الهادئ وشكلها المضغوط وموثوقيتها وقلة صيانتها. ومع ذلك ، تتطلب محركات BLDC معلومات حول موضع الدوار من أجل تحديد زاوية التبديل المناسبة. لهذا ، توجد تقنيات تحكم باستخدام مستشعرات الموضع التي قمنا بمحاكاتها في MATLAB / SIMULINK. الهدف من هذا المشروع هو استخدام تقنية الكشف عن موضع الدوار بدون حساسات. لهذا ، تم الكشف عن نقاط العبور الصفرية لشبه منحرف emf الخلفي الناتج في لفات محرك BLDC. تم إجراء المحاكاة على Matlab و Proteus. الكلمات الرئيسية: محرك DC بدون فرش (BLDC) ؛ ترتيب المتجهات. BLDC مستشعر ، BLDC بدون مستشعر.

Remerciement

Avant tout, nous remercions Allah Le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience, et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Nous adressons nos vifs remerciements à notre encadreur, DR BENAHCENE Madani pour son encadrement, ses directives et sa disponibilité.

Nos remerciements vont aussi au chef département électronique DR ... qui malgré son temps difficile nous a aidé à travers ses remarques pertinentes.

Nos respectueux remerciements, vont aux messieurs les membres du Jury, qui Nous ont fait l'honneur de bien vouloir participer à ce Jury.

Je tiens à remercier les enseignants, les responsables et tout le personnel du Département d'électronique de l'université de M'sila pour les facilités qu'ils M'ont accordés pour terminer ce travail.

Enfin, mes remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé, de près ou de Loin Durant ma formation.



Dédicace

Nous dédions ce modeste travail

*À ceux qui nous ont donné la vie, nos chers parents qui se sont
sacrifiés jour et*

Nuit pour notre bonheur et notre réussite, et ont fait de sorte que rien ne nous

Manque. Que dieu les garde et les protège.

*Nos frères et sœurs, camarades, et amis, à qui nous souhaitons plein de
bonheur*

Et de réussite dans leurs vies.

À tous ceux qui nous sont chers.

À tous le personnel de l'unité de production d'électricité de M'silla

À tous ceux que nous connaissons de près ou de loin.

À tous ceux que nous aimons.

SOMMAIRE

Résumé I

LISTE DES ACRONYMES..... VII

LISTE DES SYMBOLES IX

LISTE DES FIGURES.....X

LISTE DES TABLEAUX XII

Introduction générale2

I. Généralités Sur le MOTEUR BLDC6

 I.1. Introduction6

 I.2.Problématique7

 I.3.Description d’un brushless DC moteur7

 I.4. Structure du moteur à courant continu sans balais7

 I.4. Principe de fonctionnement des moteur moteurs brushless8

 I.5. Les constantes de vitesse et de couple dans un BLDC9

 I.6. Système de détection de la position du rotor.....10

 I.7.Détecter la position sans utiliser de capteurs.....10

 I.8. Utilisations du moteur à courant continu sans balais11

 I.8.1. Les nombreux avantages du moteur sans balai.....11

 I.8.2. Fonctionnement du moteur sans balai comparé au moteur traditionnel avec
12 balais

 I.9. Constitutions de brushless DC moteur14

 I.9.1. Le stator14

 I.9.2. Le rotor :14

 I.9.3.Paliers14

 I.9.4.Carte électronique15

 I.10. Architecture et représentation du Moteur BLDC15

 I.11. Démarrage d’un moteur BLDC15

 I.12. Conclusion.....16

II. Commande Vectorielle d'un moteur BLDC.....23

 II. 1. Introduction23

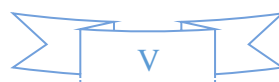
 II.2. Généralité sur la commande vectorielle.....23

 II.2.1. Origine de la commande vectoriel23

 II.2.2. Modélisation dans le repère diphasé dq24

 II.2.3. Principe de la commande vectorielle :30

 II.3.Art de la recherche sur la commande de la vitesse d'un moteur BLDC31



II.4. Commande de la vitesse par régulateur P.PI ET PID	32
II.4.1. Régulateur P (proportionnelle)	32
II.4.2. Régulateur PI (proportionnelle intégrale)	32
II.4.3. Régulateur PID (proportionnelle intégrale dérivé)	33
II.4. Structure de la commande vectorielle	34
II.5. Comprendre la commande vectorielle sans capteur pour moteurs BLDC	36
II.5.1. Moteurs BLDC et contrôle vectoriel	36
II.6. Conclusion	45
III. Simulation de la Commande du Moteur BLDC	47
III.1. Introduction	47
III.2. Objectifs et méthodologie	48
III.3. Modélisation et simulation	50
III.3. 1. Modèles Matlab / Simulink	51
III.4. Résultats de la simulation	55
III.5. Simulation sur proteus	58
III.5.1. Introduction	58
III.5.2. Commande de moteur	58
III.5.3. Résultats de la conception et de la simulation du moteur d'entraînement BLDC	59
III.5.4. Résultats expérimentaux	59
III.6. Conclusion	62
Conclusion Générale	64
Bibliographie	67

LISTE DES ACRONYMES

C.C : Courant continu

BLDC: Brushless direct current

AC : Courant alternatif (Alternatif current)

DC : Courant continu ou CC (DC pour direct current)

DC/AC : Conversion continu-alternative

TR : Transistor

P : Phase

W : Enroulement

PT : Phototransistor

B : Champ magnétique d'induction

E.H : l'effet Hall

FEMs : force contre-électromotrice (Back EMF).

ATEX: Atmosphère explosive

MOSFET: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (transistor à effet de champ à semi-conducteur à oxyde métallique)

IGBT : *Insulated Gate Bipolar Transistor* (Transistor bipolaire à grille isolée)

CAN : bus de données

PWM : Pulse Width Modulation (Modulation de largeur d'impulsion)

FOC : Commande par orientation de flux (Field Oriented Control)

PID : Proportionnel, Intégrale, Dérivé

PI : Proportionnel, Intégrale

DTC : Contrôle direct du couple (Direct Torque Control)

PMSM : Machine synchrone à aimant permanent (Permanant Magnet Synchronous Machine)

Timer : est un compteur qui calcule le nombre de cycles d'échantillonnage passés dans la tour précédente du rotor.

LSS : Laboratoire Signaux et Systèmes

PLL: Phase Locked Loop

DSP : Digital Signal Processor

LISTE DES ACRONYMES

MCC : Machine à Courant Continu.

IRFOC: Indirect Rotor Field Oriented Control.

DRFOC: Direct Rotor Field Oriented Control.

ISFOC: Indirect Stator Field Oriented Control

ADC : Un convertisseur analogique-numérique

Moteurs IPM : Les moteurs électriques à aimant permanent utilisent généralement Des terres rares telles que le samarium et le néodyme.

ACIM : Analyse en Composantes Indépendantes modifiée

FAST: Flux, Angle, Speed, Torque

LISTE DES SYMBOLES

V_h : une force électromotrice

I_c : un courant électrique

R_h : coefficient de Hall.

P_a : puissance absorbée.

P_u : puissance utile.

P_{em} : puissance électromagnétique.

P_{JS} : pertes par effet joule dans l'inducteur.

P_{JR} : pertes par effet joule dans l'induit.

P_C : pertes collectives (pertes fer + pertes mécaniques : dites pertes constantes).

e_a, e_b, e_c : Forces électromotrices de la phase a, b et c respectivement.

Θ : L'angle électrique.

ω_m : est la vitesse mécanique du rotor en [*rad/s*].

K_e : le coefficient de la force électromotrice,

T_e : est le couple électromagnétique développé en [*N·m*].

T_L : est le couple de charge en [*N·m*].

F : est le coefficient de frottement de viscosité en [*N·m·S*].

J : est le moment d'inertie en [*kg·m²*].

Ω : vitesse électrique angulaire du rotor.

P : est le nombre de paires de pôles.

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : Généralités Sur le Moteur BLDC

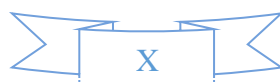
Figure I.1	Le moteur brushless.	07
Figure I.2	Schéma simplifié d'un moteur BLDC.	08
Figure I.3	Classification des moteurs électriques.	08
Figure I.4	La convention de signe le moteur BLDC.	09
Figure I.5	Architecture d'un moteur BLDC.	09
Figure I.6	Détection de la position par la mesure des FEMs.	11
Figure I.7	Les Composant d'un moteur BLDC.	13
Figure I.8	Différents types des stators	13
Figure I.9	Bobinages de différents moteurs.	15

CHAPITRE II : Commande Vectorielle d'un moteur BLDC

Figure II.1	Diagramme schématique du MSAP	25
Figure II.2	Interprétation physique de la transformation de Park	26
Figure II.3	Circuit de commande électrique d'un moteur BLDC	31
Figure II.4	Schéma block de régulateur P	32
Figure II.5	Schéma block de régulateur PI	33
Figure II.6	Schéma block de régulateur PID	34
Figure II.7	Boucles de commande	34
Figure II.8	Structure de la commande vectorielle sensorless	35
Figure II.9	moteur BLDC triphasé typique a six bobines de stator et un rotor	37
Figure II.10	Transformations de Clark et Park	40
Figure II.11a	Mesurer l'angle du rotor avec le compte de l'encodeur	43
Figure II.11b	Mesures de vitesse à l'aide des impulsions du codeur A et B	43

CHAPITRE III : Simulation de la Commande du Moteur BLDC

Figure III.1	Enroulement triphasé du moteur BLDC	48
Figure III.2	BEMF trapézoïdal du moteur BLDC	49



LISTE DE FIGURES

Figure III.3	Concept de système de contrôleur de vitesse de moteur BLDC	49
Figure III.4	Modèle Simulink de moteur BLDC	52
Figure III.5	Three phase inverter model	53
Figure III.6	Speed generator model	53
Figure III.7	Current generator state equation model	53
Figure III.8	State equation model of phase current IA	54
Figure III.9	State equation model of phase current IB	54
Figure III.10	Emf generation block	54
Figure III.11	Fuzzy logic controller	54
Figure III.12	EMF to gate signal converter model	55
Figure III.13	Actual motor speed plot in rpm	56
Figure III.14	Plot for gate signals	56
Figure III.15	Waveforms of Zero Crossing Points for all three phases	57
Figure III.16	Back emf_ Eabc	57
Figure III.17	Schéma électrique Simulation dans isis	59
Figure III.18	a	60
Figure III.18	b	60
Figure III.18	c	60
Figure III.18	d	61
Figure III.18	e	61

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : Généralités Sur le Moteur BLDC

Réant

CHAPITRE II : Commande Vectorielle d'un moteur BLDC

Réant

CHAPITRE III : Simulation de la Commande du Moteur BLDC

Réant



Introduction Générale

Introduction Générale

Bien que la plus ancienne des machines électriques industrielles, la machine à courant continu reste très utilisée et particulièrement comme actionneur. Ceci tient au fait que son fonctionnement est d'une grande simplicité, de même que sa modélisation, mais surtout ses performances statiques et dynamiques sont exceptionnelles [2].

En effet, le couple est le produit vectoriel de deux grandeurs naturellement orthogonales (flux inducteurs et courant d'induit) quasiment indépendantes et indépendantes de la vitesse et de la position du rotor.

Cependant, la fragilité du système balais collecteur a toujours été un inconvénient de la M.C.C, ce qui limite la puissance et la vitesse maximale et présente des difficultés de maintenance et des interruptions de fonctionnement [2].

C'est pour cette raison qu'on a eu intérêt à utiliser des moteurs BLDC afin d'écartier cet inconvénient.

Le moteur BLDC (Brushless Direct Current), qui appartient à la catégorie des moteurs synchrones à aimants permanents, a gagné en popularité dans le secteur industriel en raison de ce qu'ils peuvent faire.

Toutes les applications de sécurité essentielles peuvent bénéficier de cette approche.

Particulier :

- ✚ Disques durs et lecteurs DVD/CD, véhicules électriques, véhicules hybrides, bicyclettes électriques, robots industriels, machines de contrôle numérique, machines à laver, ventilateurs de refroidissement de micro-ordinateurs et applications médicales [2].
- ✚ Le contrôle trapézoïdal, le contrôle sinusoïdal, le contrôle direct du couple, le contrôle prédictif et le contrôle vectoriel sont quelques-unes des approches utilisées dans le contrôle du moteur BLDC.
- ✚ Les approches de contrôle scalaire basées sur la régulation du module de flux électromagnétique vectoriel de la machine ont été largement utilisées dans l'industrie, où les applications étaient auparavant limitées à la vérification du couple à flux constant [15].
- ✚ Les microcontrôleurs, qui sont des systèmes très performants et flexibles à programmer, ont rapidement supplanté les processeurs de signaux numériques grâce aux progrès de l'analyse numérique des signaux et de la technologie des microprocesseurs.

- ✚ Les contrôleurs logiques séquentiels sont des contrôleurs programmables. Ces avancées technologiques ont ouvert des possibilités à des applications plus exigeantes et précises, alors que le maintien du module à débit constant n'était plus suffisant. Le concept de commande vectorielle est né de la nécessité de réguler la phase du flux en plus du module de flux. [15]
- ✚ L'avantage fondamental de la commande vectorielle directionnelle est qu'elle peut régler le débit et le couple indépendamment, ce qui signifie que le couple peut être modifié alors que le débit reste constant et vice versa. Le découplage net se produit entre le flux et la paire [15].
- ✚ Les commandes de commande orientées vectorielles sont basées sur un modèle de référence, il faut le souligner. En d'autres termes, cette commande est exécutée en utilisant le modèle inverse de la machine.

Dans les situations sensibles aux prix, l'utilisation de moteurs sans capteurs peut économiser de l'argent. Les capteurs Hall, les encodeurs, les fils et les connecteurs sont rendus inopérants. Les ventilateurs, Les pompes, Les scanners, Les concasseurs, perceuses et autres applications à rotation rapide avec des performances de contrôle relativement élevées qui ne nécessitent pas de démarrage contrôlé sont des utilisations typiques dans ce domaine. Une version électromagnétique unique de contrôleur basé sur le champ est nécessaire pour les volumes énormes. [16]

En raison de ses performances, le moteur à courant continu sans balai (BLDC) est devenu un outil essentiel dans un large éventail d'applications. C'est pourquoi nous avons décidé de nous atteler à la tâche.

Notre travail sur une nouvelle technologie de contrôle moteur BLDC Connue sous le nom de "BLDC Engin Contrôle Simulation."

Organisation du mémoire

Ce mémoire est divisé en trois chapitres et se termine par une conclusion.

- Le premier chapitre traitera de la description et du fonctionnement du moteur BLDC, qui est basé sur la construction, le fonctionnement et les différents types de moteurs CC sans balais.
- Le deuxième chapitre fournit des informations générales sur les applications nécessitent un contrôle précis de la vitesse, de sorte qu'un régulateur de vitesse P, PI et PID, est utilisé, et la Commande de la vitesse par régulateur P.PI ET PID.
- Chapitre 3 Régulation de la vitesse du moteur BLDC utilisant une logique floue dans la technologie MATLAB EMF utilisant un contrôleur (FLC) La technique de position du rotor sans capteur est utilisée pour détecter les points de passage zéro du EMF trapézoïdal induit dans les bobines du moteur BLDC.



Chapitre I
Généralités Sur le
MOTEUR BLDC

I. Généralités Sur le 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. [1]

Historiquement, le moteur à courant continu est prisé pour les applications nécessitant un réglage de la vitesse ou du couple, tandis que les moteurs asynchrones sont utilisés pour les applications à forte puissance, vitesse constante et nécessitant des moteurs robustes. Les champs d'applications des différents moteurs s'élargissent progressivement grâce aux innovations sur l'électronique de puissance et les puissances de calcul, qui permettent de contrôler le courant de façon très flexible. [1]

Les moteurs sans balais offrent des rapports performances/dimensionnels très impressionnants par rapport aux technologies plus conventionnelles. Combinées à un système électronique, les performances de cette technologie ont été continuellement améliorées au cours des dernières années.

La technologie Brushless trouve sa place dans le groupe motopropulseur électrique et hybride des véhicules avec lesquels l'espace et le poids doivent être optimisés : robotique bien sûr, mais aussi véhicules électriques, outils portables, ventilateurs ou disques durs. Le principal défaut des moteurs à courant continu est la présence de balais, qui génèrent Le moteur est soumis à des frottements et des interférences ainsi qu'à une usure qui limite sa durée de vie. Pour éviter tous ces problèmes, nous utilisons des moteurs sans balais. [25] Cependant, grâce aux avancées dans le domaine de l'électronique de puissance et à l'introduction de nouveaux calculateurs numériques très avancés, ce désavantage n'est plus un problème.

I.2.Problématique

De nos jours, le moteur brushless est largement utilisé dans l'industrie. Le défaut principal des moteurs à courant continu est la présence des balais, qui engendrent des frottements, des parasites et limitent la durée de vie du moteur par leur usure. Pour éviter tous ces problèmes, on utilise des moteurs brushless. Alors, quelle est le moteur brushless, leur principe de marche, les différents types du moteur. [25]



Figure I.1 : le moteur brushless.

I.3.Description d'un brushless DC moteur

Le stator est constitué de bobines d'excitation qui sont généralement au nombre de trois ou de 6. Celles-ci sont le plus souvent connectées en étoile, mais elles peuvent également être connectées en triangle. Le rotor est constitué d'aimants permanents comportant 2 à 8 pôles avec une alternance des pôles Nord et Sud. La plupart des moteurs BLDC comprennent aussi un ensemble de trois capteurs à effet Hall qui, positionné à 60° ou à 120° l'un de l'autre, permettent de connaître la position du rotor. La connaissance de la position du rotor permet à un circuit électronique auxiliaire d'effectuer les 10 commutations de l'alimentation. [25]

I.4. Structure du moteur à courant continu sans balais

Un moteur BLDC est un moteur synchrone à aimants permanents qui utilisent des détecteurs de position et un onduleur pour commander les courants d'induit. Au lieu d'utiliser un commutateur mécanique comme dans le moteur à courant continu classique, le moteur BLDC emploie une commutation électronique ce qui le rend pratiquement sans entretien.

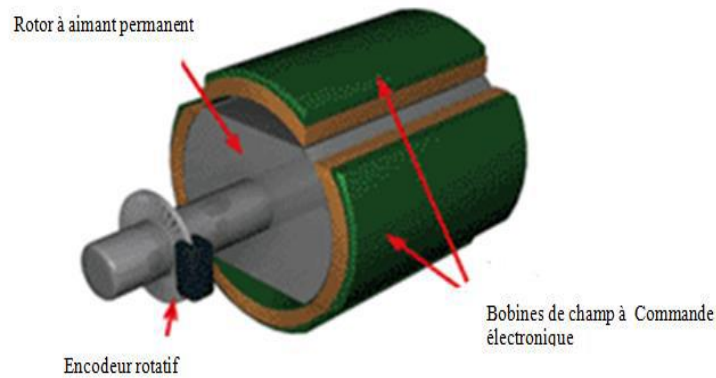


Figure I.2: Schéma simplifié d'un moteur BLDC.

I.4. Principe de fonctionnement des moteurs brushless

Un moteur Brushless entre dans la catégorie des machines alternatives synchrones.

La figure 2 montre une classification des machines électriques. Le premier niveau distingue la machine à courant continu (bien connue des professeurs de CPGE...) et les machines alternatives. Le moteur universel est un cas particulier de moteur fonctionnant aussi bien (ou aussi mal pourrait-on dire) sûr courant continu que sur courant alternatif.

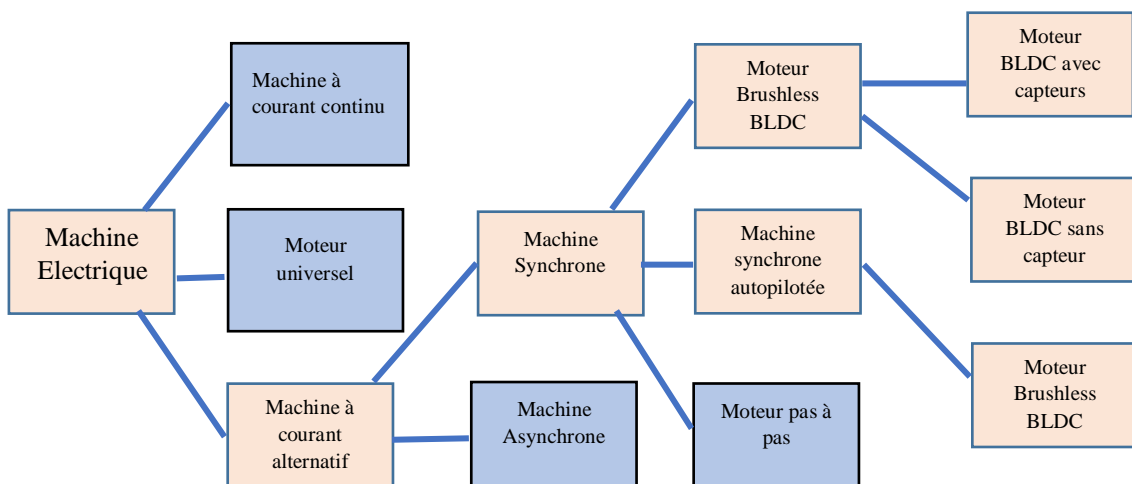


Figure I.3 : Classification des moteurs électriques.

Parmi les machines alternatives, le second niveau distingue les machines synchrones.

Parmi les machines synchrones, la machine synchrone autopilotée correspond au moteur brushless à commande sinusoïdale (BLAC, Brushless Alternative Current), tandis que le moteur BLDC (Brushless Direct Current) correspond à un moteur brushless à commande en créneau. [1]

I.5. Les constantes de vitesse et de couple dans un BLDC

Un moteur brushless de type BLDC est un moteur conçu pour être commandé à l'image d'un moteur à courant continu, en assurant la commutation électronique plutôt que par un collecteur. Pour une raison de régularité du couple que nous allons voir par la suite, le rotor est équipé d'un ou deux aimants disposés de telle façon qu'il impose un flux magnétique uniforme B_0 dans l'entrefer, au signe près (positif du côté nord et négatif du côté sud). L'expression mathématique du champ dans l'entrefer peut s'écrire sous la forme $B(\alpha) = \delta_B(\alpha) B_0$, avec $\delta_B(\alpha)$ représentant le signe :

$$\delta_B = -1 \forall \alpha \in [0, \pi] \text{ et } \delta_B = 1 \forall \alpha \in [\pi, 2\pi]$$

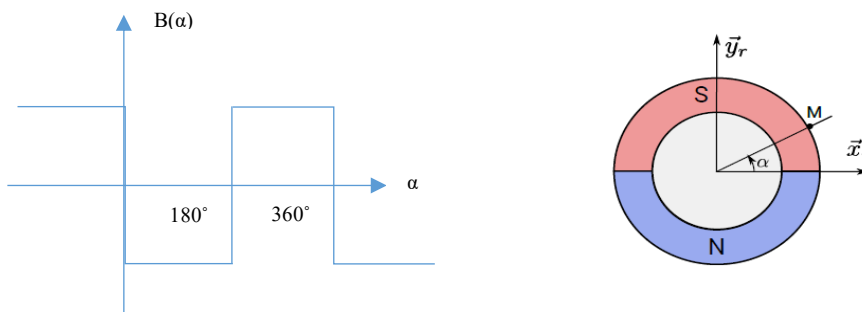


Figure I.4 : La convention de signe le moteur BLDC.

La convention de signe choisie ici conduit à un champ négatif (pôle sud) sur le haut et positif (pôle nord) sur le bas du rotor. Le dipôle magnétique $\vec{m} = -m\vec{y}_r$ est orienté vers le bas.

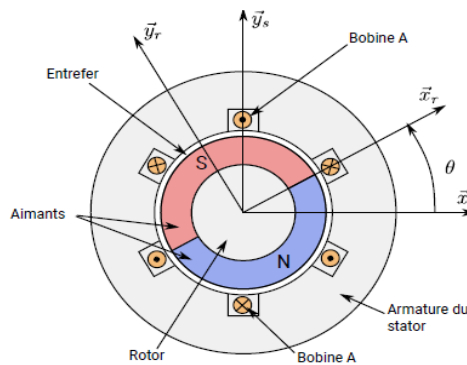


Figure I.5 : Architecture d'un moteur BLDC.

Les armatures du stator ainsi que l'acier du rotor canalisent le champ magnétique imposé par l'aimant, qui s'oriente positivement en allant des faces nord des aimants vers les faces sud (sauf à l'intérieur des aimants). Il faut noter que l'aimant indiqué « nord » a en réalité 2 pôles nord et sud, le pôle nord étant coté entrefer et exigeant ainsi l'orientation du champ magnétique dans l'entrefer. Le pôle sud de cet aimant est coté rotor. C'est bien entendu

l'inverse pour l'aimant noté « sud ». Lorsque le rotor tourne, les lignes de champs restent identiques dans un repère accroché au rotor (la géométrie du stator restant invariante par rotation). On suppose dans un premier temps que la bobine n'est pas alimentée (donc aucun champ magnétique n'est généré par-là bobine). [1]

I.6. Système de détection de la position du rotor

Le moteur brushless DC (BLDC) gagne en popularité parce que, comme son nom l'indique, il remplace les brosses classiques du moteur sujettes à l'usure par un contrôleur électronique qui augmente la fiabilité de l'unité. Un moteur BLDC peut également être fabriqué plus petit et plus léger qu'un moteur à balais avec la même puissance de sortie, ce qui le rend idéal pour les applications avec un espace limité.

D'autres processus sont nécessaires pour identifier les positions relatives des composants afin de faciliter la gestion du moteur en raison de l'absence de contact mécanique ou électrique entre le stator et le rotor du moteur BLDC. Pour ce faire, les moteurs BLDC utilisent l'une des deux approches suivantes : les capteurs à effet Hall ou la mesure de la force contre-électromotrice.

I.7. Détecter la position sans utiliser de capteurs

Comme le poids est un élément limitant dans les applications aéronautiques, des moteurs sans capteurs ont été choisis (BLDC Sensorless). Cependant, ces moteurs peuvent avoir de la difficulté à démarrer ou à perdre la synchronisation pendant le fonctionnement, ce qui les fait décrocher.

En réalité, le fait de savoir à quel moment le rotor passe par une certaine position, associée à un angle électrique fixe et connu, est suffisant pour la commutation. Nous verrons que la génération d'un champ magnétique rotatif a nécessité une succession de six séquences de 60° . Si nous détectons que le rotor passe à 30° électrique, nous savons que nous devons déclencher l'interrupteur électrique de 30° plus tard, en supposant que le rotor se déplace à la même vitesse que le 30° précédent. Une autre méthode utilisée par les capteurs pour détecter le déplacement de 30° du rotor consiste à surveiller la force contre-électromotrice (Retour EMF).

Cette mesure se fait normalement en mesurant la tension entre le point central N des enroulements et la phase non utilisée de la séquence en cours (phase « en l'air »). Si on n'a pas accès physiquement à ce point (ce qui est le cas en général) on doit simuler ce point en créant un point au même potentiel à l'aide de trois résistances en étoile (figure I.7). [3]

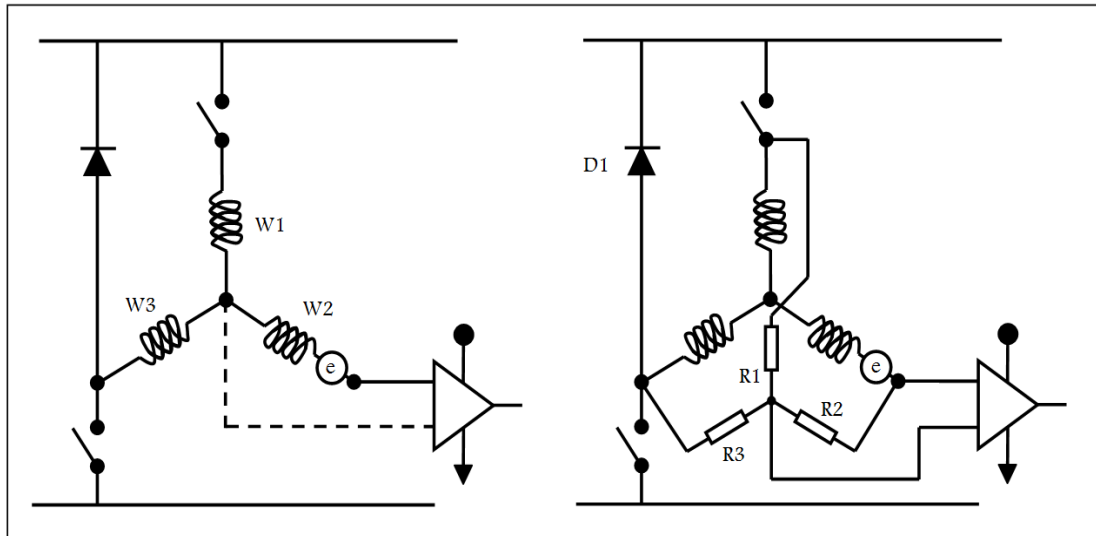


Figure I.6 : Détection de la position par la mesure des FEMs

I.8. Utilisations du moteur à courant continu sans balais

De nombreuses fonctions réalisées par des moteurs CC brossés peuvent être remplies par des moteurs sans balais, mais la complexité et le coût du contrôle empêchent les moteurs sans balais de remplacer complètement les moteurs brossés. Les moteurs sans balais dominent progressivement de diverses fonctions dans les secteurs du pétrole, du gaz, des transports, des appareils ménagers, du CVC, de la propulsion marine et de la production d'énergie.

Le moteur sans balai est ainsi devenu la solution idéale pour les applications d'aujourd'hui, de plus en plus exigeantes en termes de durée de vie et de fiabilité, d'encombrement et de poids, de consommation électrique (rendement), de faible niveau sonore et de variation de débit (asservissement).[26]

I.8.1. Les nombreux avantages du moteur sans balai

- **Durée de vie et fiabilité:** La longévité (env. 20000 h) est équivalente aux moteurs AC et jusqu'à quatre fois supérieur à un moteur DC avec balais. Les soucis liés au frottement des charbons sur le collecteur disparaissent : plus de parasites, 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 balai est également 2 à 3 fois plus léger qu'un moteur DC traditionnel. Pour un

poids et un encombrement identique, le moteur DLDC sera donc bien plus efficace en terme puissance.

- **Consommation électrique:** Le rendement est bien supérieur à celui d'un moteur DC 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 balai sont inférieurs aux autres types de moteur. La variation de vitesse aisée permet également de rechercher facilement le point de fonctionnement le plus silencieux.
- **Variation de débit et asservissement:** La technologie du moteur « brushless » 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). Le moteur « brushless » se permet donc le cumul La technologie du moteur « brushless » 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 notamment le maintien du couple (couple constant, car on ne modifie pas la tension d'alimentation).

Le moteur « brushless » se permet donc le cumul des avantages du moteur DC et AC.

Voici une liste d'autres avantages intéressants : fort couple au démarrage, parasitage électrique limité, échauffement du moteur plus limité et refroidissement (perte joules) du moteur facilité par son architecture, indice de protection IP en général plus élevé du fait de l'absence de balais, moins d'inertie, moins de débris et résidus (pas d'usure des collecteurs).

L'absence d'étincelles par exemple peut dans certains cas autoriser l'utilisation d'un moteur sans balais en zone potentiellement explosible (ATEX). [26]

I.8.2. Fonctionnement du moteur sans balai comparé au moteur traditionnel avec balais

Un moteur « brushless » est constitué d'aimants permanents sur le rotor et d'un bobinage triphasé sur le stator. Il suffit de faire passer un courant dans une partie du bobinage pour créer un champ magnétique qui va attirer les aimants et les aligner sur le champ magnétique.

Le bobinage est généralement en triphasé, c.-à-d. Qu'il est constitué de trois groupes de bobines reliées entre elles. En alimentant successivement les groupes de bobines, le rotor va à chaque fois s'aligner sur les champs et tourner.

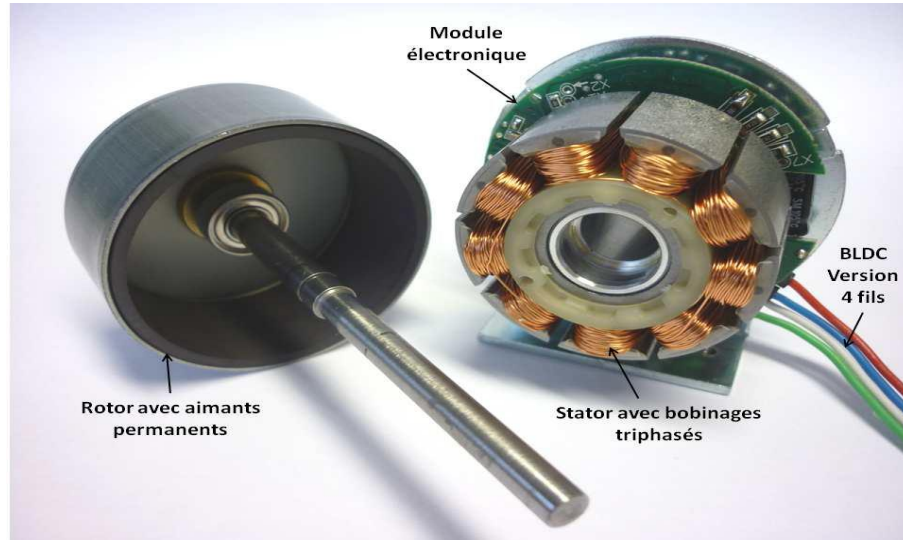


Figure I.7 : Les Composant d'un moteur BLDC.

Le moteur est simple, mais la commande électronique (codeur ou contrôleur) est plus élaborée. En effet, il faut connaître à chaque instant la position du rotor et envoyer le courant dans les groupes de bobines. Celle-ci transforme le courant continu en courant triphasé à fréquence variable et va alimenter successivement les bobines (enroulements) pour créer un champ tournant et donc la rotation. Ce module électronique est également capable de régler en permanence le courant pour que le moteur fonctionne dans sa zone de rendement maximum.

Dans le cas du moteur traditionnel DC à charbons ou balais, le système de commutation qui permet de faire passer le courant successivement dans les bobinages n'est pas réalisé électroniquement, mais mécaniquement par l'intermédiaire des lamelles du collecteur. Lors de la rotation, les charbons sont successivement en contact avec ces lamelles qui vont transmettre le courant continu aux bobines. La commutation électrique est simple, mais le frottement des charbons (ou balais) sur le collecteur entraîne une perte, un échauffement du collecteur et une usure inévitable de celui-ci. [25]

I.9. Constitutions de brushless DC moteur

I.9.1. Le stator

Les moteurs sans balais ont une utilité minimale pour les rotors des moteurs à courant continu ou des stators à moteur pas à pas.

Les machines obtenues ont des performances médiocres, et le couple montre des anomalies dues à des changements de réticence.

La solution classique est la seconde. Nous approchons la forme trapézoïdale des fluctuations des forces électromotrices générées en utilisant une distribution appropriée des conducteurs dans les encoches.

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. [3]



Figure I.8 : Stator du moteur à courant continu sans balais.

I.9.2. Le rotor :

Si la surface du composant polaire près de l'entrefer est inférieure à la surface offerte par l'aimant, la troisième situation peut permettre une concentration de flux. En conséquence, des champs apparaissent.

Les aimants à haute puissance produisent des machines très performantes. [3]

I.9.3. 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 rechargés permettent d'obtenir une longue durée de vie du moteur. 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. [27]

I.9.4. Carte électronique

Elle est utilisée pour piloter le moteur à courant continu sans balais. C'est elle qui définit la direction et la force du champ en fonction de l'information donnée par les capteurs à effet Hall [28]

I.10. Architecture et représentation du Moteur BLDC

Le rotor et le stator peuvent également être composés de deux disques.

Face à face, rayons et bobines dispersés conformément aux rayons de ces deux Disques. En raison du mouvement des bobines, ce type de moteur brushless est rarement utilisé.

Sur les aimants, il y a une force axiale importante qui nécessite l'utilisation de butées à billes. En conséquence. [5]



Figure I.9 : Bobinages de différents moteurs

I.11. Démarrage d'un moteur BLDC

Un moteur sans balais est démarré selon les étapes de base consistant:

1. à spécifier une position arbitraire du rotor et à appliquer des courants de commande tels aux trois entrées de phase du moteur que le rotor avance jusqu'à sa position arbitraire.
2. à appliquer une impulsion de courant à l'enroulement approprié de sorte que ledit rotor avance dans le sens de rotation voulu.
3. une fois que le moteur a commencé à tourner, à arrêter l'alimentation en courant aux entrées de phase du moteur.
4. à laisser décroître le courant passant dans le moteur jusqu'à un niveau auquel les chutes de tension $I \times R$ se produisant dans l'enroulement sont sensiblement

inférieures aux forces contre-électromotrices (f.c.é.m.), au régime auquel le moteur tourne.

5. à échantillonner les f.c.é.m. (très faibles) créées dans les enroulements.
6. à contrôler les f.c.é.m. échantillonnées afin de détecter si le rotor s'est avancé jusqu'à une position nécessitant un changement de commutation.
7. à alimenter en courant d'attaque les trois entrées de phase du moteur selon que oui ou non la nécessité d'un changement de commutation a été détectée à l'étape (5) et de sorte que le rotor continue à tourner dans le sens voulu.
8. à répéter les étapes (4) et (7) un nombre prédéterminé de fois à une vitesse supérieure à la vitesse de commutation (c'est-à-dire plus fréquemment à mesure que le régime du moteur augmente) et à une vitesse directement proportionnelle au régime du moteur
9. à répéter les étapes (4) et (5).
10. à déterminer la position du courant du rotor à partir des f.c.é.m. échantillonnées
11. à alimenter les trois entrées de phase du moteur à l'aide dudit courant, faisant tourner le moteur dans le sens voulu à partir de la position du courant.
12. à répéter les étapes (4) à (11) jusqu'à ce que les tensions des f.c.é.m. soient significativement supérieures aux pertes IR se produisant dans les enroulements.
13. lorsque les f.c.é.m. sont significativement supérieures aux pertes IR se produisant dans les enroulements, à alimenter. [26]

I.12. Conclusion

Nous avons passé en revue les différents types de moteurs BLDC dans ce chapitre et fourni quelques informations générales sur leur logique de commutation.

L'étude s'est concentrée sur le moteur triphasé parce qu'il est le plus couramment utilisé en raison de sa construction de base, et parce que la prochaine étude serait consacrée à ce type de moteur.

Nous avons une compréhension claire du concept de fonctionnement de ce moteur après avoir lu ce chapitre, ce qui nous permet de concentrer nos recherches sur la modélisation de contrôle.



Chapitre II
Commande Vectorielle
d'un moteur BLDC

II. Commande Vectorielle d'un moteur BLDC

II. 1. Introduction

Certaines applications nécessitent de fortes performances lors du démarrage, du freinage, de l'inversion de direction, du changement de vitesse rapide et de la vitesse transitoire. Ceci nécessite l'utilisation d'un contrôle d'écoulement vectoriel, qui implique l'estimation de la charge du moteur, qui est calculée en mesurant l'intensité dans le stade continu du variateur, l'estimation de la résistance statorique, qui est une caractéristique physique du moteur qui varie en fonction de la température.

La tension à appliquer au moteur à une certaine vitesse peut alors être calculée pour produire le débit optimal.

Un boosté transitoire, qui augmente la tension, est également possible avec ce contrôle. Lors d'une accélération rapide et d'un réglage de glissement pour maintenir une vitesse de rotation relativement constante, le moteur est fourni à une fréquence légèrement supérieure, qui est déterminée par l'estimation de la charge et la fréquence correspondant au glissement nominal du moteur.

Outre l'amélioration de la qualité du disque, le contrôle vectoriel permet une acquisition plus efficace de diverses fonctions auxiliaires. Par exemple, la capacité à la volée vous permet de reprendre le contrôle d'un moteur en rotation.

Lorsque le moteur est éteint, la vitesse du flux s'abaisse ; afin de rétablir le contrôle et d'éviter les surintensités, il est essentiel de connaître la vitesse et l'emplacement du flux pour le synchroniser. Il est possible d'estimer la vitesse et le débit pendant que le moteur est éteint en raison de la construction de cette commande. Même s'il n'y a qu'un faible débit résiduel dans la machine, il est possible d'estimer la vitesse. [10]

Malgré l'efficacité et les avantages du moteur BLDC, ses applications nécessitent un contrôle précis de la vitesse, de sorte qu'un régulateur de vitesse P, PI et PID, est utilisé [29].

II.2. Généralité sur la commande vectorielle

II.2.1. Origine de la commande vectoriel

Les pères de la lutte anti vectorielle des moteurs AC sont K. Hasse de l'Université de Darmstadt et F. Blaschke de l'Université technique de Brunswick. En 1968, le premier ordre des vecteurs indirects a été proposé, et en 1971, le deuxième ordre des vecteurs directs a été proposé. Werner Léonard, de l'Université technique du Brunswick, a préparé

le terrain pour le contrôle du débit directionnel et a contribué à rendre les moteurs à courant alternatif concurrentiels par rapport aux moteurs à courant continu.

Le contrôle des moteurs à courant alternatif n'est devenu plus démocratique qu'après la commercialisation des microprocesseurs au début des années 1980. Au départ, le contrôle axé sur le débit est plus coûteux, plus complexe et plus difficile à maintenir que le contrôle du moteur à courant continu. En effet, le premier avait besoin d'un grand nombre de capteurs, d'amplificateurs et d'autres composants électroniques pour fonctionner.

La transformation Park est couramment utilisée dans l'analyse et la modélisation de machines synchrones et asynchrones. C'est la base du contrôle orienté flux. Robert H. Park 1929 documents dans le domaine de l'électronique de puissance, a été classé deuxième en termes d'importance au XXe siècle en 2000. Sa principale contribution a été de permettre le remplacement des équations différentielles linéaires avec des coefficients constants dans le temps. [11]

II.2.2. Modélisation dans le repère diphasé dq

II.2.2.1. Transformation triphasée/diphasée

Le principe de base est qu'un système triphasé (a, b, c) peut être construit par un système triphasé composé de deux bobines décalées de $\pi/2$ dans l'espace et alimentées par des courants d'élimination progressive de $\pi/2$ dans le temps [12].

Nous pouvons donc remplacer les grandeurs X_{abc} , d'un système triphasé par des grandeurs $X_{\alpha\beta}$ d'un système diphasé par la transformation suivante :

$$\begin{bmatrix} X_{\alpha} \\ X_{\beta} \\ X_{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = (2/3)^n \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2^n} & \frac{1}{2^n} & \frac{1}{2^n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix}$$

Où X_0 est la composante homopolaire. Dans la pratique, nous ne considérons pas la composante homopolaire. Cela vient du fait que le stator est supposé alimenté en étoile et que le système est équilibré. [12]

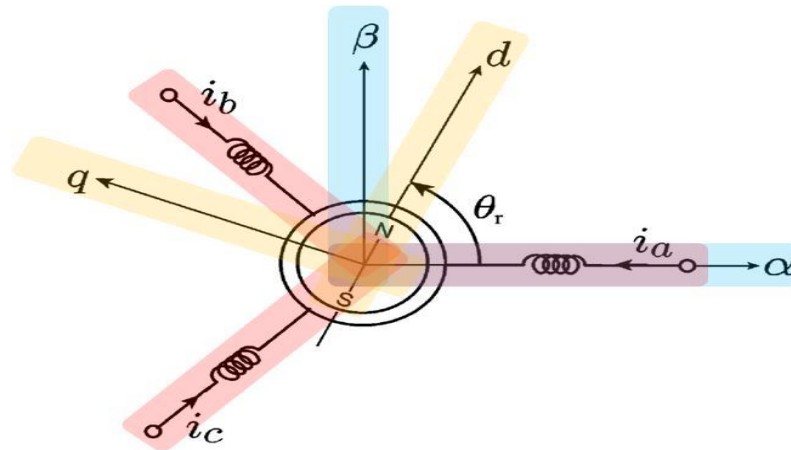


Figure II.1 : Diagramme schématisique du MSAP [12].

Il existe principalement deux types de transformations selon la valeur de N : Clarke (pour $n = 1$) et Concordia (pour $n = 0,5$) ; La transformation de Clarke conserve l'amplitude des grandeurs, mais pas la puissance ni le couple (on doit multiplier par un coefficient $3/2$). Tandis que celle de Concordia, qui est normée, elle conserve la puissance, mais pas les amplitudes. [12]

L'utilisation d'une matrice de passage non standardisée (Clarke) dans la création des règles de contrôle actuelles est extrêmement pratique. Cela vous permet de modifier le module courant absorber par le moteur directement sans avoir à passer par un facteur de multiplication. Il est néanmoins bien adapté à la transcription en valeurs inférieures.

L'utilisation d'une matrice standard (Concordia) est fréquemment utilisée en mathématiques pour simplifier les opérations matricielles en raison de la symétrie des transformations directes et inverses.

Comme notre objectif est la loi de commande vectorielle (qui est basée sur les courants régulateurs dans le marqueur dq), nous appliquerons la transformation de Clarke dans notre modélisation. [4]

III.2.2.2. La transformée de Park

La transformation de Park est une transformation en trois phases, deux phases, semblable à celle de Clarke (peut-être Concordia), suivie d'une rotation. Il vous permet de passer de la marque abc à la marque dq. Par rapport à la marque abc, la marque est toujours fixe, mais la marque dq est mobile. Il produit un angle avec la marque fixe connue sous le nom d'angle Park de transformation ou d'angle Park. [12]

La matrice de passage de cette transformation est notée P (pθ) :

$$P(p\theta) = \begin{bmatrix} \cos(p\theta) & -\sin(p\theta) \\ \sin(p\theta) & \cos(p\theta) \end{bmatrix}$$

Tel que les grandeurs dans le repère dq (Xdq) s'expriment en fonction des grandeurs Xαβ :

$$X_{dq} = \begin{bmatrix} \cos(p\theta) & \sin(p\theta) \\ -\sin(p\theta) & \cos(p\theta) \end{bmatrix} X_{\alpha\beta}$$

Remarquer:

La transformation de Park convertit les valeurs en trois phases abc en marqueur dqo, où désigne le composant homopolaire, et de q les composants directs et quadrature, respectivement. La composante homopolaire n'est nulle sous nos hypothèses (moteur équilibré), donc nous limitons nos équations aux composantes d'et q.

Interprétation physique:

La substitution de deux enroulements d'et q, dont les axes magnétiques sont attachés au rotor et tournent avec lui, pour les enroulements des phases a, b et c, dont les conducteurs magnétiques et les axes sont stationnaires en référence au stator. [12]

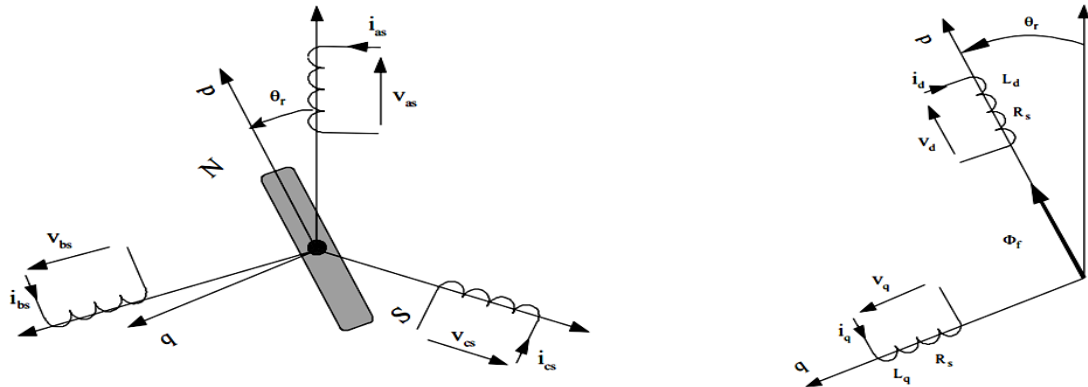


Figure II.2 : Interprétation physique de la transformation de Park [12].

Equations magnétiques:

La transformation de Park appliquée sur les courants donne :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(p\theta) & \sin(p\theta) \\ -\sin(p\theta) & \cos(p\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha \cos(p\theta) + i_\beta \sin(p\theta) \\ -i_\alpha \sin(p\theta) + i_\beta \cos(p\theta) \end{bmatrix}$$

Les flux dans le repère dq s'expriment comme suit :

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \phi_d \\ \phi_q \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos(p\theta) & \sin(p\theta) \\ -\sin(p\theta) & \cos(p\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_\alpha \\ \phi_\beta \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos(p\theta) & \sin(p\theta) \\ -\sin(p\theta) & \cos(p\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L i_\alpha + \phi_r \cos(p\theta) \\ L i_\beta + \phi_r \sin(p\theta) \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} L_d i_d + \phi_r (\cos^2(p\theta) + \sin^2(p\theta)) \\ L_q i_q + \phi_r (-\sin(p\theta) \cos(p\theta) + \cos(p\theta) \sin(p\theta)) \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} L_d i_d + \phi_r \\ L_q i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \phi_r \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Finalement, on obtient les expressions suivantes des flux :

$$\begin{aligned}
 \phi_d &= L_d i_d + \phi_r \\
 \phi_q &= L_q i_q
 \end{aligned}$$

Equations électriques

La loi d'Ohm donne :

$$\begin{aligned}
 v_d &= R_d i_d + \frac{d\phi_d}{dt} \\
 v_q &= R_q i_q + \frac{d\phi_q}{dt}
 \end{aligned}$$

Ce qui peut s'écrire sous la forme :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_d & 0 \\ 0 & R_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{d\phi_d}{dt} \\ \frac{d\phi_q}{dt} \end{bmatrix}}_{e_t} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{d\phi_d}{dt} \\ \frac{d\phi_q}{dt} \end{bmatrix} \frac{d\theta}{dt}}_{e_r}$$

Avec :

- ✚ e_t : La f.é.m. de transformation (par effet transformateur).
- ✚ e_r : La f.é.m. de rotation, due à la rotation de l'aimant rétorque par rapport au stator

$$e_t = \begin{bmatrix} e_{td} \\ e_{tq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix}$$

Les f.é.m. de rotation d'écrivent :

$$\begin{aligned} e_r &= \begin{bmatrix} e_{rd} \\ e_{rq} \end{bmatrix} = P(-p\theta) \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_\alpha \\ \phi_\beta \end{bmatrix} \\ &= P(-p\theta) \frac{d}{dt} P(p\theta) \begin{bmatrix} \phi_d \\ \phi_q \end{bmatrix} = P(-p\theta) \frac{d}{d\theta} P(p\theta) \begin{bmatrix} \phi_d \\ \phi_q \end{bmatrix} \frac{d\theta}{dt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} e_{rd} \\ e_{rq} \end{bmatrix} &= P(-p\theta) \Omega \frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} \cos(p\theta) & -\sin(p\theta) \\ \sin(p\theta) & \cos(p\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_d \\ \phi_q \end{bmatrix} \\ &= P(-p\theta) p\Omega \begin{bmatrix} -\sin(p\theta) & -\cos(p\theta) \\ \cos(p\theta) & -\sin(p\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_d \\ \phi_q \end{bmatrix} \\ &= P(-p\theta) p\Omega \begin{bmatrix} -\phi_d \sin(p\theta) & -\phi_q \cos(p\theta) \\ \phi_d \cos(p\theta) & -\phi_q \sin(p\theta) \end{bmatrix} \\ &= p\Omega \begin{bmatrix} \cos(p\theta) & \sin(p\theta) \\ -\sin(p\theta) & \cos(p\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\phi_d \sin(p\theta) & -\phi_q \cos(p\theta) \\ \phi_d \cos(p\theta) & -\phi_q \sin(p\theta) \end{bmatrix} \\ &= p\Omega \begin{bmatrix} -\phi_q \\ \phi_d \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Finalement on obtient :

$$\begin{aligned} e_{rd} &= p\Omega\phi_q = -\Omega L_q i_q \\ e_{rq} &= p\Omega\phi_d = -p\Omega L_d i_d + p\Omega\phi_r \end{aligned}$$

Donc les équations électriques du moteur synchrone à aimant permanent dans

Le repère dq est :

$$\begin{aligned} v_d &= R_d i_d + \frac{d\phi_d}{dt} - p\Omega\phi_q \\ v_q &= R_q i_q + \frac{d\phi_q}{dt} + p\Omega\phi_d \end{aligned}$$

Ou aussi :

$$v_d = R_d i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - p\Omega L_q i_q$$

$$v_q = R_q i_q + L_q \frac{di_q}{dt} - p\Omega L_d i_d + p\Omega \phi_r$$

Equations mécaniques

La puissance électrique instantanée fournie aux bornes de la machine synchrone est :

$$P_{elec} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c$$

Utilisons la transformation Park pour remplacer abc par dq (rappelez-vous que la multiplication par le coefficient 3/2 est de conserver les quantités), et nous obtenons :

$$P_{elec} = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q)$$

Utilisons les équations du Parc pour représenter cette puissance en termes de flux et de courants :

$$P_{elec} = \frac{3}{2} R (i_d^2 + i_q^2) + \frac{3}{2} \left(i_d \frac{d\phi_d}{dt} + i_q \frac{d\phi_q}{dt} \right) + \frac{3}{2} p (\phi_d i_d - \phi_q i_q) \Omega$$

- ✚ La première parenthèse représente les pertes joules dans les enroulements statoriques.
- ✚ La deuxième parenthèse représente la variation par unité de temps de l'énergie Magnétique emmagasinée.
- ✚ La troisième parenthèse représente la puissance électrique transformée en Mécanique à l'intérieur du moteur (Pméca). Comme est la vitesse instantanée De rotation, on en déduit l'expression du couple électromagnétique (moteur)

Cm :

$$P_{méca} = C_m \Omega \Rightarrow C_m = \frac{3}{2} p (\phi_d i_q - \phi_q i_d)$$

Remplaçant les flux par leurs expressions, on obtient:

$$C_m = \frac{3}{2} p [\phi_r - (L_q - L_d) i_d] i_q$$

La machine étant à pôles lisses ($L_q = L_d$), cette équation devient:

$$C_m = \frac{3}{2} p \phi_r i_q$$

II.2.3. Principe de la commande vectorielle :

Le principe du FOC est que le couple et le débit de la machine sont contrôlés séparément, de la même manière que la MCC d'excitation séparée, où les courants du stator sont transformés en un référentiel rotatif aligné sur le vecteur d'écoulement rotor al, statorique ou celui de l'intervalle d'air, pour produire des composants le long de l'axe d (contrôle du débit) et de l'axe q (production des composants) (contrôle du couple).

La commande FOC a été proposée pour la première fois en Allemagne à la fin des années 1960 et au début des années 1970 par deux procédés distincts : un qui assure l'orientation de l'écoulement (Hasse) connue par l'IRFOC en imposant une vitesse de glissement dérivée de l'équation dynamique de l'écoulement rotorique, et l'autre qui utilise l'estimation ou la mesure du débit pour obtenir l'amplitude et l'angle nécessaire pour l'orientation du débit (Blaschke) connue par DFOC. [12].

La technique de l'IRFOC était généralement préférée à celle du DFOC parce qu'elle a une configuration plus simple que le DFOC, qui nécessite des estimateurs ou des sondes Hall pour la mesure du débit qui sont soumis à des conditions de travail difficiles (température, vibrations, etc.), malgré le fait que la mesure est affectée par le bruit en fonction de la vitesse de rotation.

Mais sans omettre que la IRFOC dépend des paramètres de la machine et notamment la constante de temps rotorique T_r et surtout la résistance rotorique R_r [5].

Ces deux méthodes mentionnées sont basées sur l'orientation du flux rotorique (en fait, c'est le dq de référence qui est orienté), d'autres techniques ont été introduites telles que l'orientation du flux statorique du COAS avec les deux formes directes et indirectes, et l'orientation du flux d'air, mais leur performance est plus faible que les premiers, d'autant plus qu'ils nécessitent des algorithmes plus compliqués et surtout une compensation de découplage très sensible aux erreurs. [12]

II.3. Art de la recherche sur la commande de la vitesse d'un moteur BLDC

La Fig. II.3 présente le circuit responsable des commutations du courant dans les trois phases du stator d'un moteur BLDC. Ces commutations doivent avoir un ordre qui permet d'obtenir un champ tournant, dont le rôle est de faire tourner le rotor en l'entraînant avec lui (voir principe de fonctionnement).

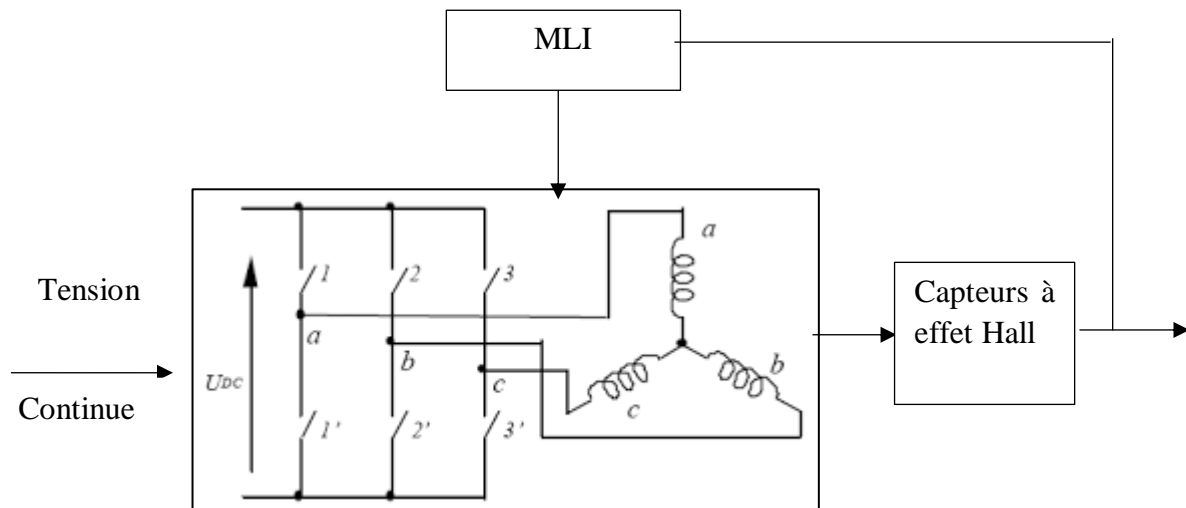


Figure II.3 : Circuit de commande électrique d'un moteur BLDC

Pour que le moteur démarre avec un couple important, ce qui permet de réduire la durée du régime transitoire, il faut savoir les phases à alimenter en premier, mais cela dépend de la position du rotor. Des capteurs à effet Hall installés dans le moteur permettent d'avoir cette importante information (Fig. II.3).

Aussi, une MLI est utilisée pour exploiter l'information sur la position du rotor obtenue à partir des capteurs effet Hall et génère des impulsions de commande des interrupteurs d'alimentation des phases du stator (Fig. II.3).

Donc, la stratégie de contrôle de vitesse d'un moteur BLDC (sans balais) dépend de l'instant (du moment) approprié pour la commutation du courant de chaque phase du stator, et les parties responsables de ce processus sont les capteurs à effet Hall et l'onduler MLI (voir Fig. II.3). [27]

II.4. Commande de la vitesse par régulateur P.PI ET PID

II.4.1. Régulateur P (proportionnelle)

Régulateur proportionnelle applique une correction instantanée pour tout écart entre la mesure et la consigne, plus la perturbation est grande, plus la correction apportée est grande, cette composante seule ne permet pas une grande précision surtout dans les systèmes à faible inertie.

L'équation suivante est utilisée pour le régulateur proportionnel (P) :

$$U(t) = K_p * e(t)$$

Avec:

- $U(t)$: signal d'actionnement.
- $e(t)$: signal d'erreur.
- K_p : constante de gain proportionnel

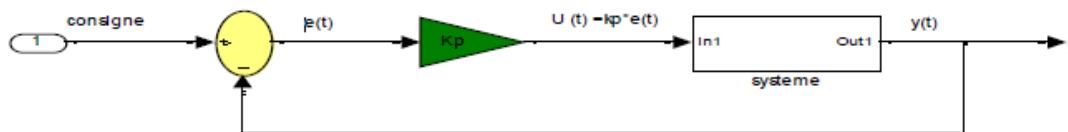


Figure II.4: Schéma block de régulateur P

II.4.2. Régulateur PI (proportionnelle intégrale)

Ce régulateur apporte une notion de temps d'intégration à la correction, cette notion de temps s'exprime généralement en seconde, l'action intégrale est complémentaire à l'action proportionnelle, elle permet de stabiliser dans le temps l'action proportionnelle, plus l'erreur mesurée est constante plus la correction est constante [29].

L'algorithme de la régulation utilisera une mémoire des différents écarts déjà mesuré pour affiner le temps d'intégrale à appliquer à la correction.

L'équation suivante est utilisée pour le régulateur P:

$$U(t) = K_p * e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt$$

Avec:

- K_i : constante de gain intégrale

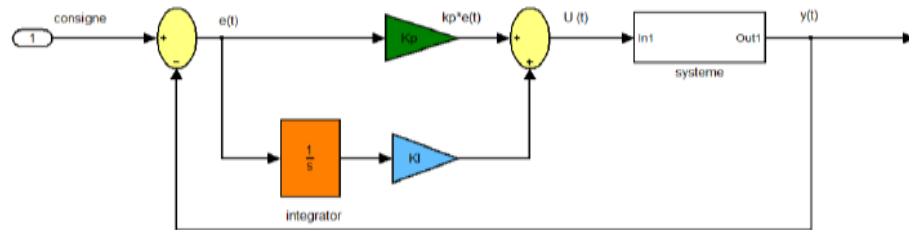


Figure II.5: Schéma block de régulateur PI

II.4.3. Régulateur PID (proportionnelle intégrale dérivé)

Le régulateur PID peut être le plus généralement utilisé dans le système de contrôle en boucle fermée, les trois parties du régulateur PID agissent comme suit :

Partie proportionnel pour réduit les perturbations dans la réponse d'erreur du système, partie intégrale pour éliminer l'erreur en régime permanent, et la Réponse dynamique avec La stabilité du système peut être atténuée et améliorée grâce à la partie d'intégration.

Les performances du système sont affectées par les paramètres PID (K_p , K_i et K_d), le problème dans le régulateur PID est le choix de ses paramètres, cela le rend apte à Contrôler, le paramètre proportionnel réduira le temps de montée du système, le paramètre intégral réduira l'erreur en régime permanent et Le paramètre dérivé réduira le temps de stabilisation et le dépassement [29].

Le signal de commande continu $U(t)$ du régulateur PID active équation suivante :

$$U(t) = K_p * e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt + K_d * \frac{d}{dt} e(t)$$

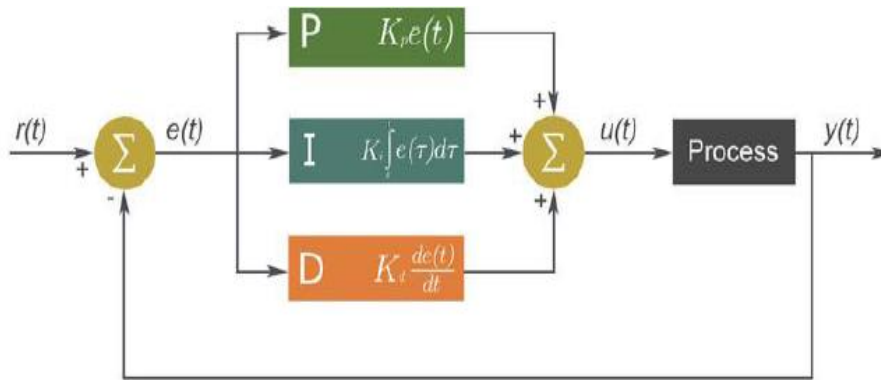


Figure II.6: Schéma block de régulateur PID

II.4. Structure de la commande vectorielle

La grandeur d'entrée du système est la vitesse de référence, qui est comparée à la vitesse réelle (dans le cas d'une commande 'avec capteur') ou estimée (Commande sensorless) pour générer, à travers le régulateur de vitesse (PI ou autres),

La consigne de couple et, par la suite, la référence de la composante en quadrature du courant.

Nous réglons donc le couple en réglant la composante en quadrature du courant tout en asservissant la composante directe du courant à une consigne nulle.

Le schéma de la figure 5 illustre cette structure en cascade.

Les composantes du courant réel sont élaborées à partir des courants circulant dans les trois phases de la machine et de l'information sur la position, en utilisant la transformation de Park. L'avantage majeur de ce mode de contrôle, outre ses bonnes performances, est le fonctionnement à un rapport couple/intensité optimal. [20]

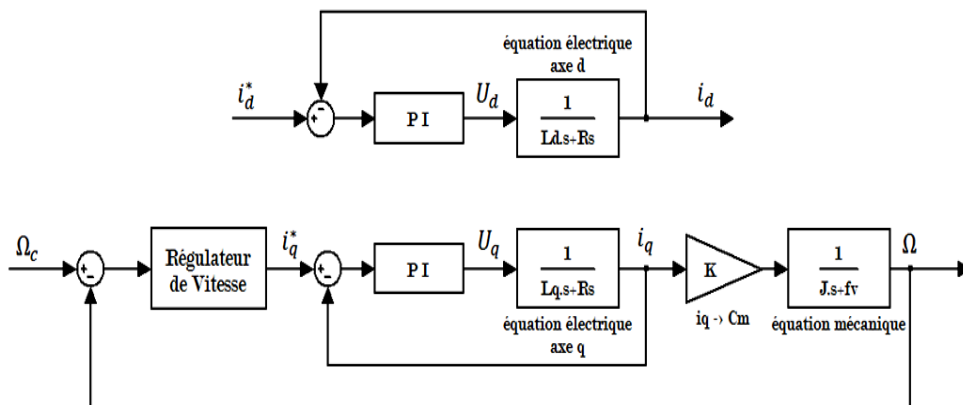


Figure II.7 : Boucles de commande.

Schéma de la commande vectorielle sensorless

D'après les mesures des courants et des tensions, la position électrique du flux θ_e est estimée par un observateur.

Cette position servira pour la commande (transformation de Park) et pour l'estimation de la vitesse mécanique (voir la figure 6).

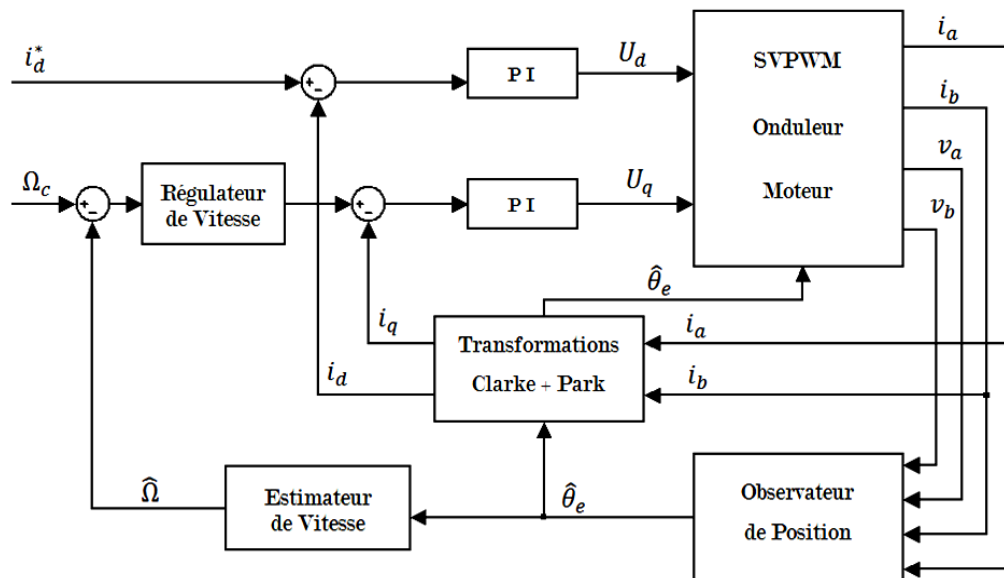


Figure II.8 : Structure de la commande vectorielle sensorless.

II.5. Comprendre la commande vectorielle sans capteur pour moteurs BLDC

Nous commençons par la théorie de base en termes de modèle de moteur BLDC, de principes de contrôle vectoriel, de transformation de Clark et Park, de modulation de largeur d'impulsion (PWM) et d'estimation de vitesse et de position. Ensuite, la commande vectorielle basée sur le capteur et son traitement normal sont brièvement expliqués.

Ensuite, nous nous concentrons sur une méthode de traitement pour le contrôle vectoriel qui n'utilise pas de capteurs de position ou de vitesse.

Une implémentation spécifique de l'observateur de flux basé sur un modèle moteur et une stratégie d'implémentation globale pour le contrôle vectoriel sans capteur sont décrites, ainsi que des techniques de mesure des courants via des capteurs conventionnels ou une reconstruction à un shunt. Enfin, nous présentons des données sur les performances du contrôle vectoriel sans capteur en termes de régulation de vitesse et d'utilisation de la bande passante CPU. [13]

II.5.1. Moteurs BLDC et contrôle vectoriel

Un moteur à courant continu sans balais comporte deux composants principaux : un rotor constitué d'aimants permanents et un stator avec un bobinage relié à l'électronique de commande. Cette implémentation supprime les balais et la bague de commutation d'un moteur à courant alternatif de type universel.

Au lieu de cela, il utilise l'électronique de contrôle pour générer une séquence appropriée pour la commutation. En raison de sa conception, le moteur BLDC est également connu sous plusieurs autres noms : moteur synchrone à aimants permanents (PMSM), moteur à aimants permanents sans balais ou moteur à courant alternatif à aimants permanents (PMAC). Parfois, cela s'appelle simplement un moteur PM. [13]

Le stator du moteur BLDC comporte trois ensembles de bobines. Ils sont appelés A, B et C, comme le montre la figure 3.

Lorsque le courant passe à travers deux bobines (la paire A et B), il génère un champ magnétique avec une polarité qui crée un couple sur l'aimant central - dans ce cas, le rotor.

Lorsque le courant passe dans une certaine direction, le rotor central tourne dans le sens des aiguilles d'une montre.

Lorsque le rotor atteint une position prédéterminée, le courant est commuté d'une bobine à une autre bobine. (Au lieu de la paire A-B, le courant passe par la paire A-C.) Le résultat est que le couple continue dans la même direction.

Lorsque le rotor avance vers une autre position spécifique, le courant est à nouveau commuté vers une autre paire de bobines et la génération de couple se poursuit. Le processus de commutation des bobines, appelé commutation, est effectué par le MCU et les dispositifs de commutation de puissance à semi-conducteurs (MOSFET et IGBT) dans l'électronique du moteur BLDC. [13]

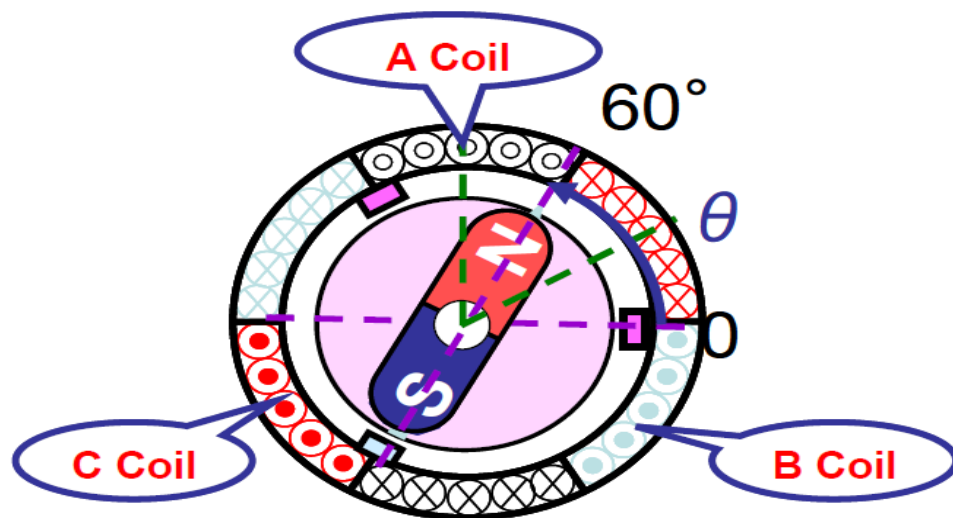


Figure II.9 : moteur BLDC triphasé typique à six bobines de stator et un rotor. [13]

La technique de base du contrôle BLDC est connue sous le nom de méthode en six étapes à 120 degrés, dans lesquelles seules deux bobines sont utilisées.

Le courant est modulé selon les besoins pour maintenir la vitesse appropriée du rotor. Cette technique présente un problème d'ondulation du couple qui limite les performances de contrôle.

Une méthode alternative, la modulation à 180 degrés, crée un couple régulier en activant les trois bobines simultanément avec des sorties PWM complémentaires.

Avec cette méthode, l'ondulation du couple peut être réduite lorsque la formulation vectorielle est utilisée.

Un avantage de la formulation vectorielle est que le couple et le flux sont contrôlés correctement en fonction d'une valeur de courant unique, similaire à une formulation de moteur à courant continu. [13]

Dans le cadre stationnaire abc, le modèle d'un moteur PMSM triphasé peut être décrit comme

$$V_{abc} = \Lambda_s i_{abc} + \frac{d}{dt} \lambda_{abc} \quad (1)$$

Ou : $\Lambda_s = \text{diag}[r_s \quad r_s \quad r_s]$

L'équation de liaison de flux peut être exprimée comme

$$\lambda_{abc} = L_s i_{abc} + \lambda_m \begin{bmatrix} \sin \theta_r \\ \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

L_s : est la matrice d'auto-inductance du stator,

λ_s : est la matrice de flux du stator,

λ_m : désigne l'amplitude des liaisons de flux établies par l'aimant permanent.

θ_r : est l'angle du rotor par rapport au référentiel du stator noté abc.

Le couple électromagnétique peut être écrit comme

$$T_e = \frac{P}{2} \lambda_m \left[\left(i_{as} - \frac{1}{2} i_{bs} - \frac{1}{2} i_{cs} \right) \cos \theta_r - \frac{\sqrt{3}}{2} (i_{bs} - i_{cs}) \sin \theta_r \right] + T_{cog}(\theta_r) \quad (3)$$

P : est le nombre de paires de pôles,

$T_{cog}(\theta_r)$: représente le couple cogging.

Le courant dans chaque bobine est désigné par son suffixe : a, b ou c.

Ainsi, les équations motrices sont non linéaires. De plus, ils sont fortement couplés les uns aux autres.

Ces facteurs rendent très difficile la réalisation d'un contrôle direct du flux et du couple en faisant varier les courants dans les bobines.

Les objectifs de la formulation du contrôle vectoriel sont de transférer ces équations non linéaires en équations linéaires et de découpler les courants statoriques triphasés en une composante de flux et une composante de couple.

Lorsque cela est fait, le couple et le flux peuvent être contrôlés directement, de la même manière que pour contrôler un moteur à courant continu excité séparément.

En fait, la commande vectorielle utilise des équations vectorielles et l'orientation du rotor pour transformer le modèle de moteur à courant alternatif triphasé couplé en un modèle linéaire très similaire au modèle de moteur linéaire du moteur à courant continu. Il permet aux performances des variateurs de vitesse BLDC d'être comparables, voire supérieures, à celles des variateurs de vitesse à courant continu. [13]

La lutte anti vectorielle offre de multiples avantages :

- ✚ Transformation d'un modèle de moteur AC couplé compliqué en un système linéaire simple
- ✚ Contrôle direct du flux et du couple, similaire à un moteur à courant continu
- ✚ Réponse dynamique rapide et bonnes performances en régime transitoire et en régime permanent
- ✚ Couple élevé et faible courant au démarrage
- ✚ Haute efficacité
- ✚ Large plage de vitesse en affaiblissant directement le flux.

La lutte anti vectorielle établit trois référentiels :

1. Cadre de référence du stator (a, b, c) dans lequel les axes a, b et c sont coplanaires, à 120 degrés l'un de l'autre
2. Un repère orthogonal ($\alpha\beta$) dans le même plan que le repère statorique de sorte que l'angle entre les deux axes soit de 90 degrés au lieu de 120 degrés. L'axe α est aligné avec l'axe α dans le deuxième cadre
3. Un cadre de rotor, connu sous le nom de cadre (dq), dans lequel l'axe d est le long des pôles N et S ou le long du vecteur de flux du rotor, et l'axe q est à 90 degrés par rapport à l'axe d. Ainsi, le repère dq est aussi un repère orthogonal

La figure 4 montre les trois cadres. La première transformation abc \longrightarrow $\alpha\beta$

Est connue sous le nom de transformation de Clark. Elle est donnée par l'équation 4 ci-dessous. La deuxième métamorphose $\alpha\beta \longrightarrow dq$

Est connue sous le nom de transformation de Park et est donnée par l'équation 5, comme le montre la figure 4. Voici la force motrice magnéto, et F est l'angle entre l'axe d et l'axe a , également appelé angle du rotor. [13]

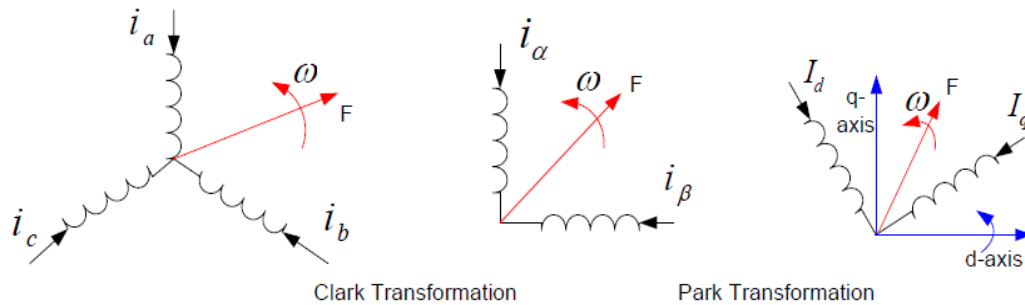


Figure II.10 : Transformations de Clark et Park. [13]

La projection des vecteurs courants statoriques dans le référentiel $\alpha\beta$ est donnée par l'équation (4) :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

La transformation de Clark convertit les trois courants abc équilibrés en deux courants $\alpha\beta$ équilibrés en phase.

Dans le repère $\alpha\beta$, l'expression du couple dépend toujours de la position du flux rotorique, empêchant toute solution aisée de l'équation différentielle électrique.

Pour supprimer cette dépendance, la transformation de Park est adoptée dans un système dq biphasé (comme illustré à la figure 4) qui tourne à la vitesse électrique du rotor, et l'axe d est aligné avec la position électrique du flux du rotor. Dans le référentiel dq, l'expression électrique du couple devient indépendante de la position du rotor. [13]

Les équations correspondant à cette transformation sont données par:

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

Le modèle de moteur PMSM triphasé (décrit dans les équations 1 à 3) peut être transformé du châssis de stator abc en châssis comme suit :

$$V_{ds} = r_s i_{ds} - \omega_r \lambda_{qs} + \frac{d}{dt} \lambda_{ds} \quad (6)$$

$$V_{qs} = r_s i_{qs} - \omega_r \lambda_{ds} + \frac{d}{dt} \lambda_{qs} \quad (7)$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} \quad (8)$$

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + \lambda_m \quad (9)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (10)$$

Où i_{ds} , i_{qs} sont les composantes de courant d'axe d et d'axe q de trois courants de stator combinés, respectivement ; V_{ds} , V_{qs} sont la tension d'axe d et la tension d'axe q des tensions de stator, respectivement :

λ_{ds} , λ_{qs} sont le flux d'axe d et le flux d'axe q, respectivement ; et T_e est le couple électromagnétique du moteur.

Afin de produire un couple maximal, un fonctionnement optimal est obtenu par la commande vectorielle, qui garantit que le vecteur spatial stator-courant ne contient qu'une composante en quadrature en considérant $i_{ds} = 0$. En conséquence, l'équation de couple devient

$$T_e = \frac{3}{2} p \lambda_m i_{qs} \quad (11)$$

Ainsi, le couple peut être commandé directement par le courant i_{qs} uniquement.

Cette approche est similaire à l'équation du moteur à courant continu dans laquelle le couple est proportionnel au courant d'enroulement.

Étant donné que la vitesse est directement liée au couple et que le couple est directement lié au courant de l'axe q, la vitesse du moteur peut être contrôlée en faisant varier le courant de l'axe q. Notez que le courant le long du champ magnétique du rotor génère un flux supplémentaire qui peut être converti en chaleur s'il n'est pas nécessaire pour entraîner le rotor.

Cette chaleur est de l'énergie gaspillée :

Il peut être minimisé en contrôlant correctement le courant d'axe d.

Afin de déterminer les courants des axes d et q, les courants de phase doivent être mesurés. Ensuite, pour transformer ces courants dans le bâti du rotor, il faut mesurer l'angle du rotor. Par conséquent, l'électronique nécessite des capteurs de courant, ainsi qu'un encodeur fixé à l'arbre du rotor pour mesurer l'angle du rotor.

Les étapes nécessaires pour le contrôle vectoriel sont détaillées dans la figure 5.

Comme indiqué, la commande de vitesse est une entrée de la méthode de contrôle vectoriel.

Sur le côté droit du schéma, l'électronique de contrôle vectoriel délivre des commandes PWM pour l'onduleur, qui est connecté au moteur.

Deux capteurs de courant dans la configuration mesurent les courants de phase U et de phase W.

Ces capteurs sont connectés à l'ADC (convertisseur analogique-numérique)

Intégré au MCU.

Le moteur a également un encodeur monté sur son rotor pour donner les impulsions en quadrature A et B, ainsi que l'impulsion de synchronisation zéro Z.

Les trois signaux de position du rotor sont envoyés au périphérique de capture d'entrée et de minuterie/compteur de quadrature du MCU pour effectuer des mesures de vitesse. [13]

L'angle est à zéro lorsque l'impulsion Z se produit. A partir de ce moment, une certaine valeur de comptage lui est attribuée lors de la lecture du compteur en quadrature.

Comme le montre la figure 4a, l'angle est de 18 et 34 comptes lorsqu'il est lu à des instants consécutifs à la fréquence de boucle actuelle. Ces décomptes sont transformés en une valeur d'angle appropriée afin que les valeurs sinus et cosinus puissent être calculées pour la transformation de Park. [13]

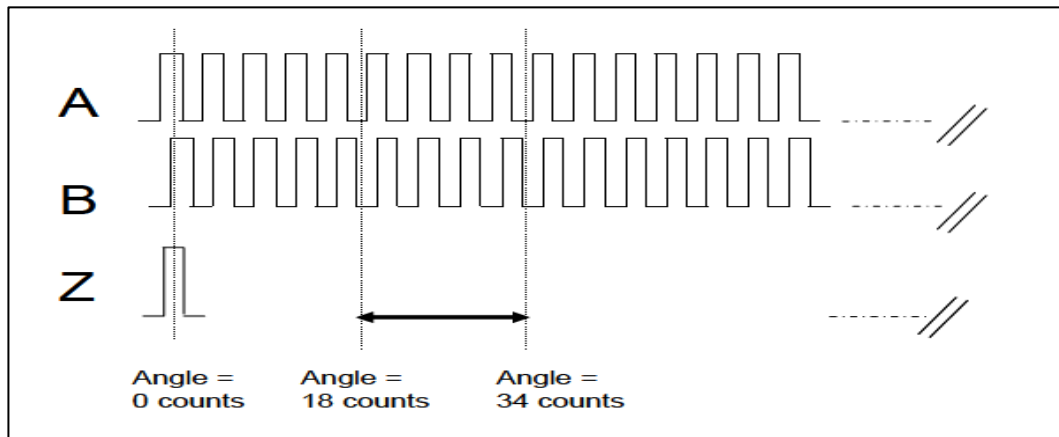


Figure II.11a : Mesurer l'angle du rotor avec le compte de l'encodeur. [13]

La vitesse du moteur détermine à quel point l'angle du rotor change avec le temps. Comme le montre la figure 4b, les impulsions A et B du codeur sont utilisées au rythme de la boucle de vitesse. Deux angles sont mesurés à intervalles de temps constants, donnant ainsi les mesures nécessaires au calcul de la vitesse : delta angle et delta temps. La vitesse est calculée en divisant l'angle delta $\Delta\theta$ par le temps delta Δt .

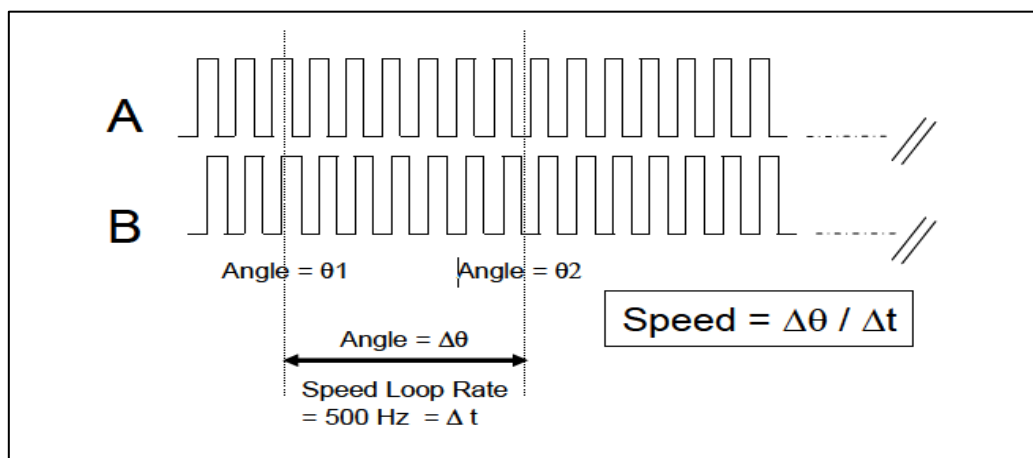


Figure II.11b : Mesures de vitesse à l'aide des impulsions du codeur A et B. [13]

La mesure de la vitesse et la commande de vitesse sont introduites dans la boucle PI ou le régulateur de vitesse automatique, qui génère le courant de référence de l'axe q nécessaire pour maintenir la vitesse commandée. Le courant de référence de l'axe q et le courant mesuré de l'axe q sont introduits dans le régulateur de courant automatique (ACR) pour créer une tension de l'axe q qui est appliquée au PWM suivant.

Le courant de référence dans l'axe d est généralement maintenu à une valeur constante pour assurer un flux correct dans le stator. Le courant d'axe d de référence et le courant d'axe d mesuré sont introduits dans un deuxième pour créer la tension d'axe d.

Des corrections sont apportées aux calculs de tension en fonction du nombre de paires de pôles et des courants de référence dans les axes d et q.

Lorsque les valeurs finales de V_d et V_q sont calculées, elles sont transformées du châssis du rotor au châssis du stator en utilisant une transformation inverse et la valeur de l'angle du rotor.

Trois tensions dans le châssis du stator - V_u , V_v et V_w - sont converties en valeurs PWM qui sont émises par l'unité de temporisation triphasée du MCU.

Les mesures de courant et les mises à jour ACR sont exécutées à une fréquence de boucle de courant. Ce processus, appelé "boucle interne", utilise l'algorithme de contrôle le plus rapide. Un taux de boucle interne typique est de 4 kHz ou plus. En revanche, les mesures d'encodeur - et en particulier les mesures de vitesse - sont effectuées à un rythme inférieur. Plus précisément, l'ASR et les calculs associés sont effectués à l'aide d'un processus plus lent appelé "boucle externe". Un calcul de vitesse typique basé sur un encodeur ou un taux de boucle externe n'est que d'environ 500 Hz, mais il peut parfois descendre jusqu'à 50 Hz.

II.6. Conclusion

Ce chapitre a été consacré aux généralités concernant la lutte anti vectorielle, y compris les origines de l'approche, sa loi de contrôle et les sujets connexes. Après avoir expliqué la théorie des vecteurs de contrôle, nous avons passé en revue la solution Texas Instruments InstaSpin-FOC et ses composants principaux.

Comme nous l'avons déjà mentionné, la maîtrise précise du moteur dépend de la conception d'un modèle de moteur précis. La technologie InstaSpin-FOC intègre un algorithme logiciel breveté appelé "observateur" qui calcule le débit, l'angle, la vitesse et le couple du rotor (FAST). Il reconnaît également les paramètres du moteur afin que les paramètres de performance puissent être extraits hors ligne pendant le développement et suivis tout au long de l'utilisation.

Ce chapitre résume l'état actuel de la commande du moteur sans balai, y compris le circuit de puissance qui alimente le moteur synchrone et la commande trapézoïdale des moteurs BLDC.



Chapitre III
Simulation de la
Commande
Du Moteur BLDC

III. Simulation de la Commande du Moteur BLDC

III.1. Introduction

Aujourd'hui, les ingénieurs utilisent les systèmes de commande de moteur pour les technologies numériques et analogiques afin de relever les défis passés, notamment le contrôle de la vitesse du moteur, le sens de rotation, la dérive et la fatigue du moteur. [21]

Ce système de commande de moteur a été développé dans des applications à petite et grande échelle avec des composants électroniques respectueux de l'environnement pour réduire la consommation d'énergie.

Les moteurs BLDC sont spécifiquement utilisés dans les domaines où l'espace, le poids, la fiabilité et la consommation d'énergie sont des facteurs critiques. Un exemple pour un tel domaine est l'application spatiale. [22]

Les avantages du moteur BLDC sont un rendement élevé, une fiabilité, une taille et un poids réduits, un contrôle de vitesse facile, un faible taux d'entretien, une large plage de vitesse et un moteur silencieux.

Le moteur BLDC utilise une commutation électronique pour contrôler le courant à travers les enroulements. Les moteurs BLDC utilisent des aimants permanents sur le rotor et le stator est enroulé avec des bobines électromagnétiques.

Les dispositifs de détection définissent la position du rotor. La logique de commutation et l'électronique de commutation convertissent les informations de position du rotor en excitation correcte pour les phases du stator. La position du rotor doit être détectée avec précision pour une commutation correcte.

Le contrôle sensoriel présente de nombreux inconvénients. Le capteur et ses connecteurs associés entraînent une augmentation du coût du système, une fiabilité réduite, pas pratique à utiliser dans certains environnements, sensibles à la température, montage de capteurs parfois impossible. Pour ces raisons, le contrôle sans capteur est souhaitable pour les applications. Dans ce projet, des circuits sont conçus pour une technique de contrôle sans capteur à utiliser dans des applications et pour effectuer des simulations dans MATLAB.

La technique de position du rotor sans capteur détecte les points de passage par zéro de la force contre-électromotrice induite dans les enroulements du moteur.

Le moteur BLDC a une FEM arrière de forme trapézoïdale. Les points de passage à zéro triphasés Back-EMF sont détectés alors que l'un des enroulements triphasés n'est pas alimenté. Les informations obtenues sont traitées afin de commuter la paire de phases sous tension et de contrôler la tension de phase à l'aide de la modulation de largeur d'impulsion (PWM). [23]

III.2. Objectifs et méthodologie

Les objectifs de cet article sont

- ✚ Remplacement du capteur de position existant (capteur à effet Hall) utilisé pour l'application avec la technique sans capteur.
- ✚ Conception des circuits requis pour la technique sans capteur.
- ✚ Modélisation du modèle de moteur MATLAB/SIMULINK BLDC
- ✚ Développement du contrôleur à logique floue

Moteur BLDC triphasé avec chaque phase ayant un intervalle conducteur de 120 degrés et chaque phase a deux étapes par intervalle conducteur. C'est ce qu'on appelle la commutation en six étapes. Par exemple, la séquence de phases de commutation peut être RG-RB-GB-GR-BR-BG comme illustré à la figure 1.

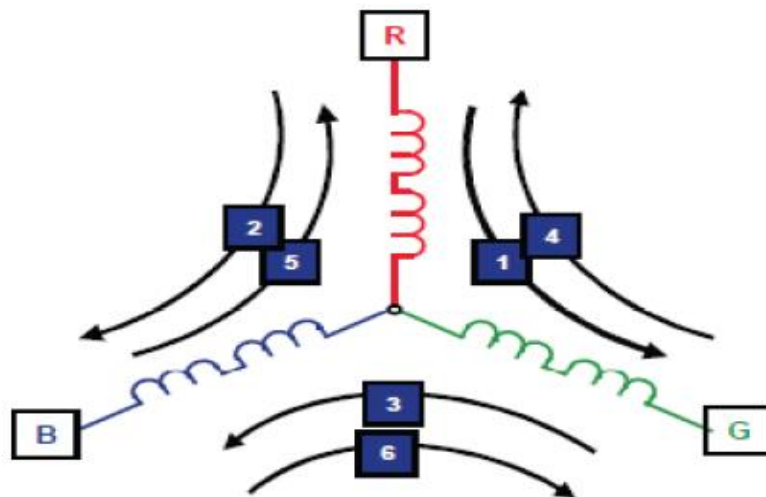


Figure III.1. Enroulement triphasé du moteur BLDC.

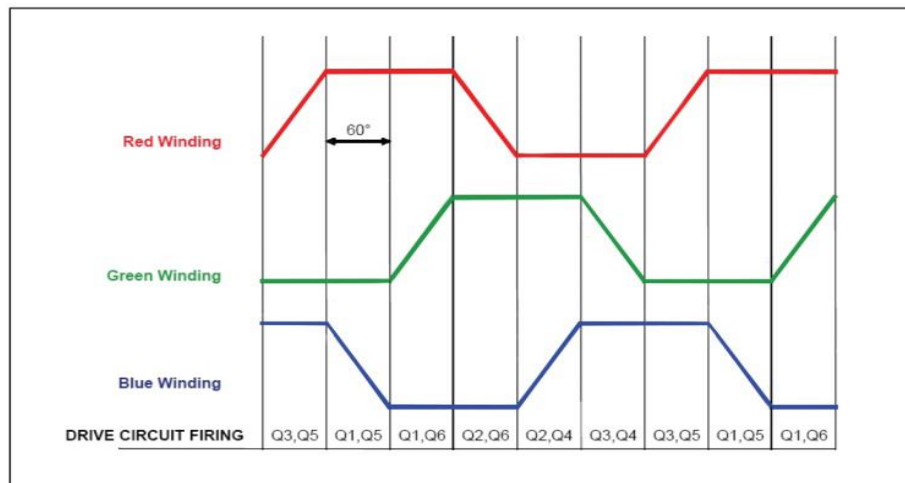


Figure III.2. BEMF trapézoïdal du moteur BLDC.

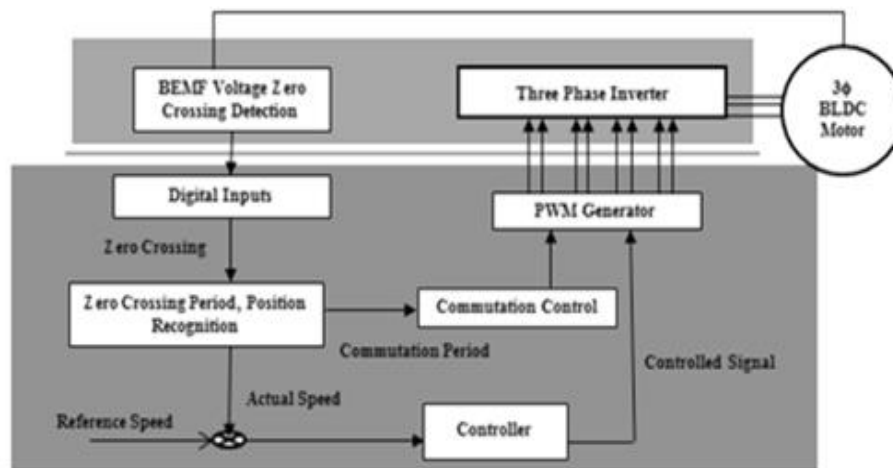


Figure III.3. Concept de système de contrôleur de vitesse de moteur BLDC.

L'enroulement du stator par l'aimant permanent. Cela se produit lorsque le rotor du moteur tourne. Pour le moteur BLDC, la tension contre-électromotrice obtenue est de forme trapézoïdale, comme illustré à la figure 2. Trois caractéristiques anti-électromotrices essentielles peuvent être utilisées pour les signaux de commande et de rétroaction.

Le concept tel qu'illustré dans la figure 3 ci-dessous est choisi. La technique de position du rotor sans capteur développée détecte les points de passage par zéro de la force contre-électromotrice induite dans les enroulements du moteur BLDC. Les points de passage à zéro de la contre-électromotrice de phase sont détectés alors que l'un des trois enroulements de phase n'est pas alimenté. Les informations obtenues sont traitées afin de commuter la paire de phases sous tension et de contrôler la tension de phase, à l'aide de la modulation de largeur d'impulsion. [14]

III.3. Modélisation et simulation

Dans cet article, un moteur BLDC de type back-EMF trapézoïdal connecté triphasé est modélisé.

La contre-EMF trapézoïdale fait référence au fait que l'inductance mutuelle entre le stator et le rotor à une forme trapézoïdale.

Le modèle mathématique du moteur BLDC est composé de deux parties : les équations électriques et mécaniques.

Équations électriques:

$$V_a = R * i_a + L * \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (1)$$

$$V_b = R * i_b + L * \frac{di_b}{dt} + e_b \quad (2)$$

$$V_c = R * i_c + L * \frac{di_c}{dt} + e_c \quad (3)$$

Où, V_a, V_b, V_c est la tension aux bornes, R est la résistance du stator, L est l'inductance du stator, i_a, i_b, i_c est le courant de phase du stator et e_a, e_b, e_c est la force contre-électromotrice induite dans chaque phase.

Pour obtenir le modèle : (1) et (2) sont combinés avec le fait que la somme de tous les courants de phase sera nulle, $i_a + i_b + i_c = 0$, ce qui donne

$$i_a = \frac{1}{3LS} [2V_{ab} + V_{bc} - 2e_a + e_b + e_c - 3 * Ri_a] \quad (4)$$

$$i_b = \frac{1}{3LS} [-V_{ab} + V_{bc} + e_a - 2e_b + e_c - 3 * Ri_b] \quad (5)$$

Cette équation d'état du courant de phase sera utilisée dans le modèle SIMULINK du moteur BLDC.

La contre-EMF trapézoïdale dans un moteur BLDC triphasé est liée à une fonction de la position du rotor où chaque phase est déphasée de 120° et donnée par

$$e_a = K_b * w * f(\theta) \quad (6)$$

$$e_b = K_b * w * f\left(\theta + \frac{2\Pi}{3}\right) \quad (7)$$

$$e_c = K_b * w * f\left(\theta - \frac{2\Pi}{3}\right) \quad (8)$$

Où K_b est la constante de force contre-électromotrice du moteur (V/rad/sec), w est la vitesse du rotor, θ est l'angle électrique du rotor et f est la fonction de référence de forme trapézoïdale par rapport à la position du rotor.

Équations mécaniques

$$T_e = B * w + J * \frac{dw}{dt} + T_l \quad (9)$$

Où, T_e : est le couple électromagnétique total, B est le coefficient de frottement (Nm/rad/sec, J est le moment d'inertie (kgm²), T_l est la charge au niveau du moteur.

Où:

$$T_e = (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) / w \quad (10)$$

Par conséquent, la vitesse du rotor est

$$W = 1/J_S [T_e - Bw - T_l] \quad (11)$$

III.3. 1. Modèles Matlab / Simulink

La figure 4 montre le modèle Simulink complet du moteur BLDC et décrit les blocs utilisés pour celui-ci.

La topologie d'un onduleur triphasé se compose de 3 branches ; chaque jambe comprend 2 interrupteurs pour exécuter la pulsation.

L'onduleur triphasé est développé à l'aide d'un bloc de source de tension contrôlée et d'un bloc de pont universel, comme illustré à la figure 5.

Le signal d'entrée Simulink dans une source de tension équivalente. Le bloc Universel Bridge implémente un onduleur de puissance triphasé universel qui se compose de 3 bras et de six interrupteurs de puissance connectés dans une configuration de pont.

Le bloc Universel Bridge permet la simulation d'un onduleur utilisant des dispositifs électroniques de puissance à commutation naturelle (diodes ou thyristors) et des dispositifs à commutation forcée (GTO, IGBT, MOSFET). A partir des bornes A et B, les signaux de sortie V_{ab} et V_{bc} sont obtenus pour des calculs ultérieurs.

Le bloc générateur de vitesse est la partie mécanique du moteur BLDC. Développement de ce modèle pour générer la vitesse réelle (w) du moteur BLDC en utilisant les équations mécaniques et électriques.

Le bloc générateur de vitesse est illustré à la figure 6.

Le bloc générateur de courant est utilisé pour obtenir les courants de phase du stator (i_a , i_b , i_c). Il est développé à l'aide des équations d'état (8) et (10).

Il est représenté sur les figures 7 et 8.

Le bloc générateur EMF est utilisé pour créer le BEMF du moteur BLDC est illustré à la Figure 10.

La conversion de l'angle de position du rotor (thêta) est effectuée comme illustré à la figure 11 et un bloc de contrôleur à logique floue est également mis en œuvre pour prendre la décision nécessaire et pour produire l'alignement de position requis de chaque. [14]

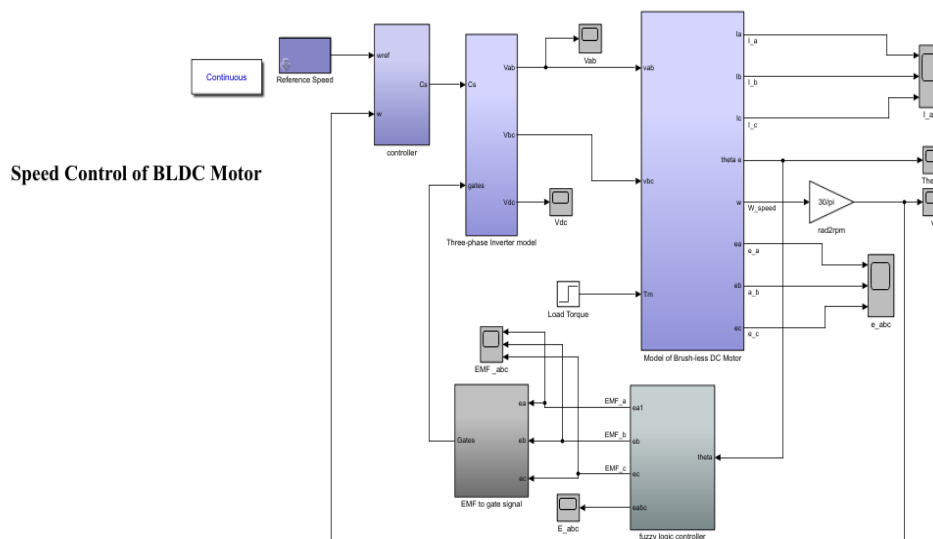


Figure III.4. Modèle Simulink du moteur BLDC.

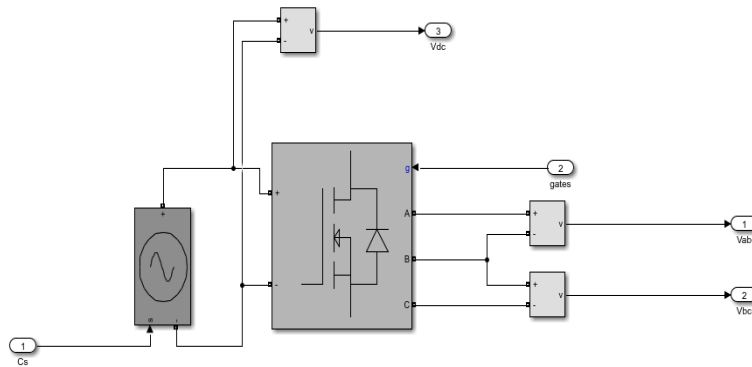


Figure III.5. Three phase inverter model.

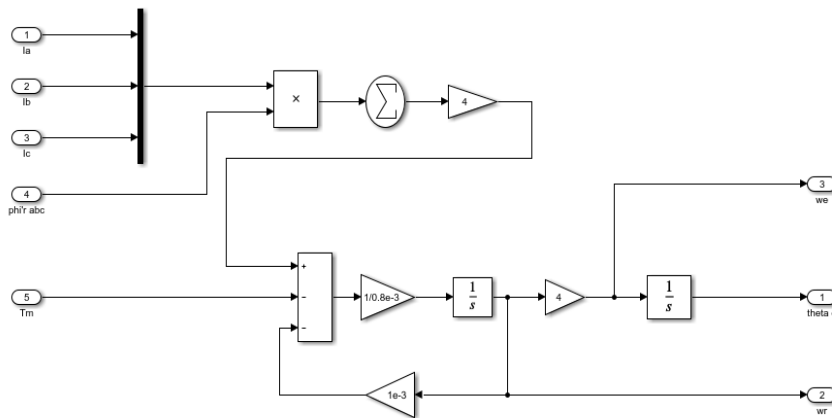


Figure III.6. Speed generator model.

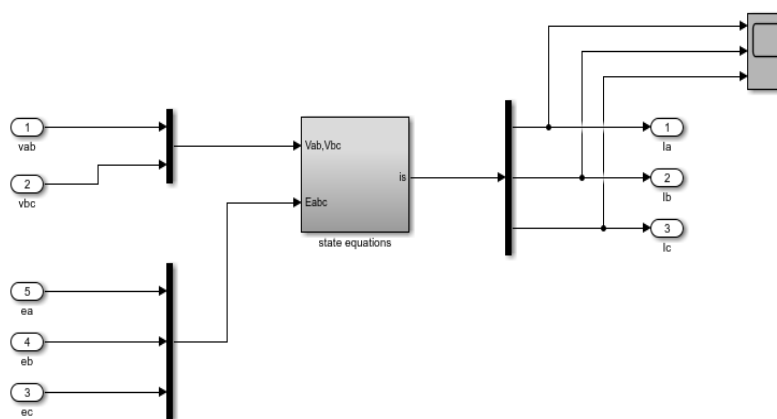


Figure III.7. Current generator state equation model.

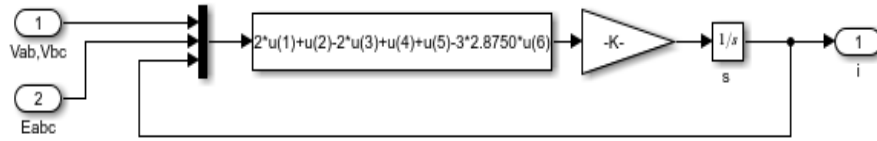


Figure III.8. State equation model of phase current IA

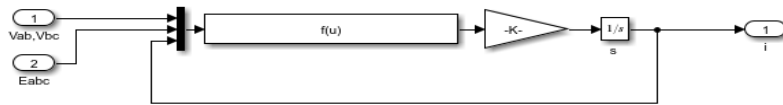


Figure III.9. State equation model of phase current IB.

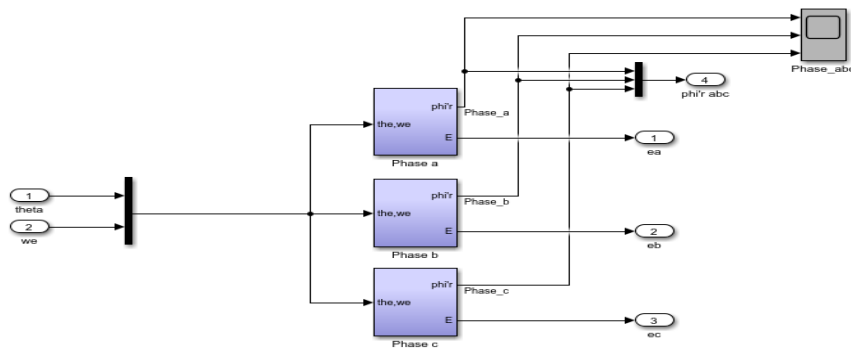


Figure III.10. Emf generation block.

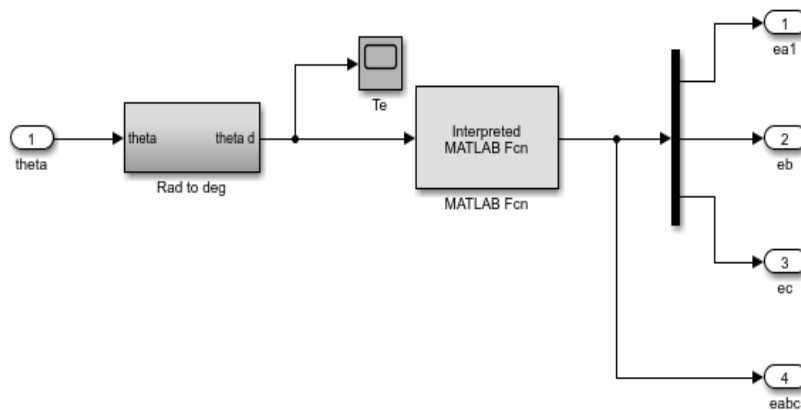


Figure III.11. Fuzzy logic controller

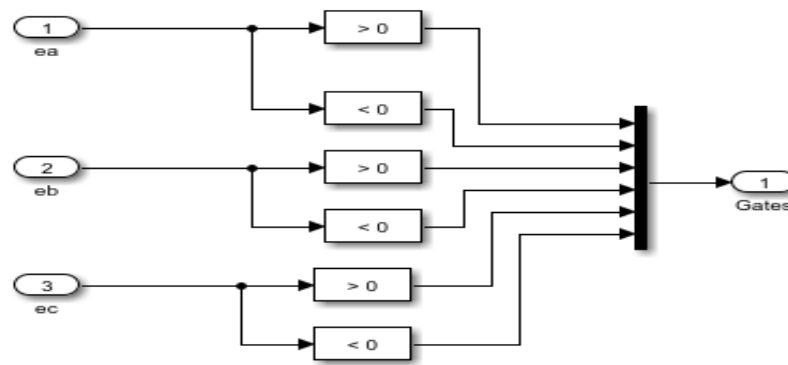


Figure III.12. EMF to gate signal converter model.

Phase. Les signaux du sous-système du contrôleur logique flou sont convertis de façon appropriée en signaux de synchronisation à l'aide des comparateurs à zéro, comme le montre la figure 12. Ceci à son tour est appliqué à l'onduleur triphasé

III.4. Résultats de la simulation

Le modèle Simulink du moteur BLDC a été simulé et les formes d'onde sont fournies ci-dessous. La vitesse de référence du moteur BLDC a été réglée à 2 000 tr/min, puis réduite à 1 000 tr/min après une période de 0,4 seconde et un couple de charge de 2 Nm après 0,2 seconde après le démarrage du moteur.

La forme d'onde de la forme trapézoïdale Retour EMF (e_a , e_b , e_c) générée en utilisant le bloc générateur EMF et l'équation d'état La figure 16.

Après 0,4 seconde, la tension BEMF diminue à mesure que la vitesse diminue, ce qui indique que la tension BEMF est directement proportionnelle à la vitesse du moteur BLDC.

La figure 13 montre la vitesse réelle du moteur en tr/min, la vitesse diminuant progressivement de 2 000 tr/min à 1 000 tr/min, avec une chute de vitesse en raison du couple de charge à 0,2 seconde, puis un tassement.

La figure 14 montre le signal de la porte créé en comparant les signaux BEMF à zéro. Lorsque la vitesse a été réduite, la largeur de l'impulsion de la porte a augmenté après 0,4 seconde. [14]

Le circuit de base du projet est un circuit de détection de passage à zéro EMF inversé.

Une impulsion de sortie est créée lorsque le BEMF trapézoïdal traverse la tension zéro.

La figure 15 montre la forme d'onde de la détection de passage à zéro pour les trois phases.

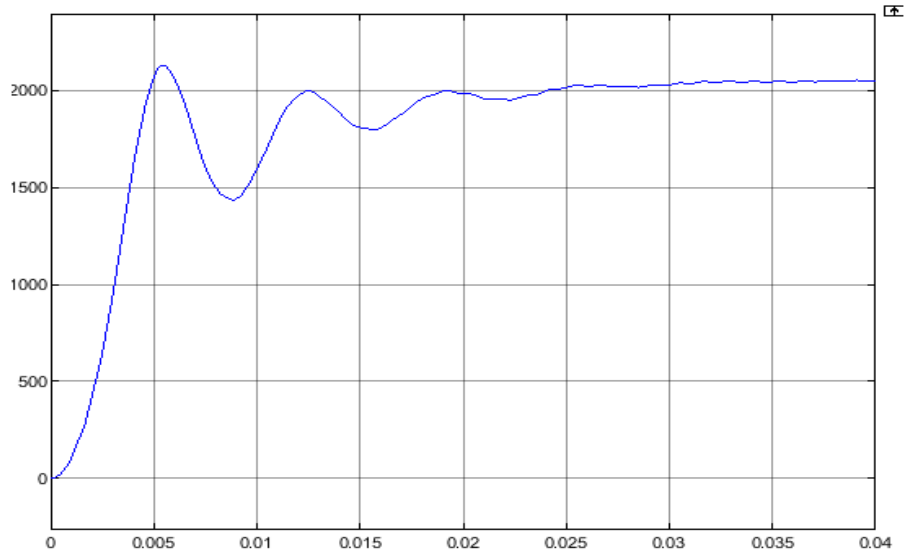


Figure III.13. Actual motor speed plot in rpm.

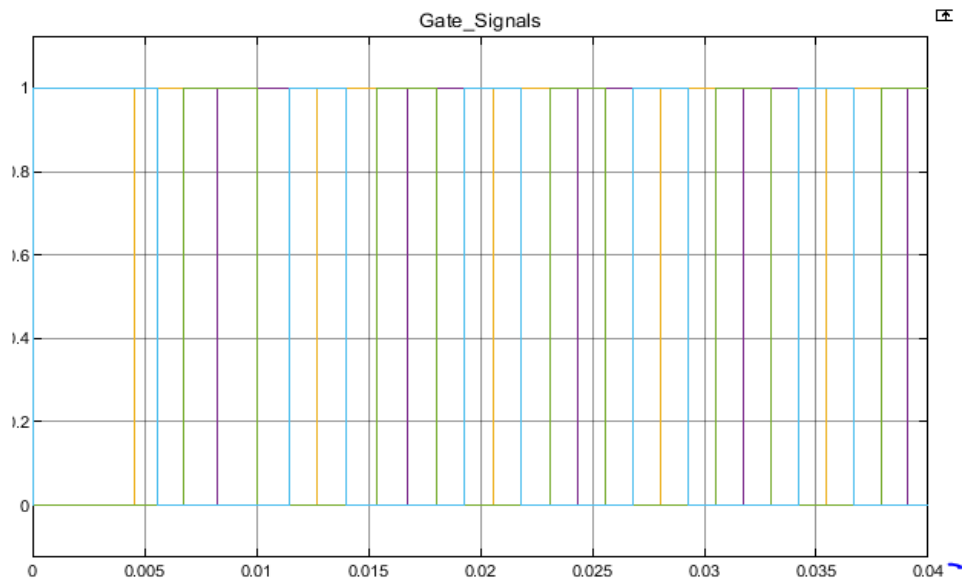


Figure III.14. Plot for gate signals.

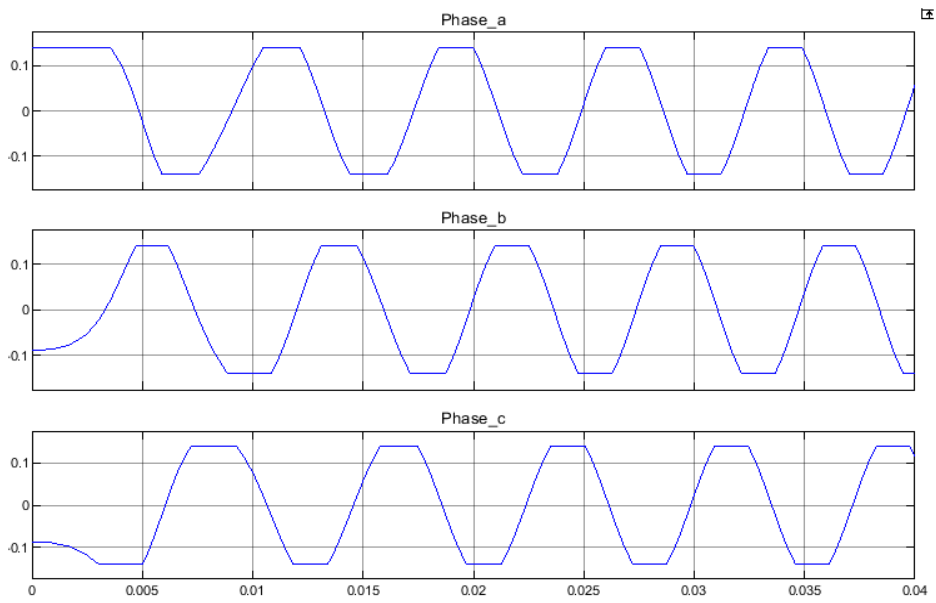


Figure III.15. Waveforms of Zero Crossing Points for all three phases.

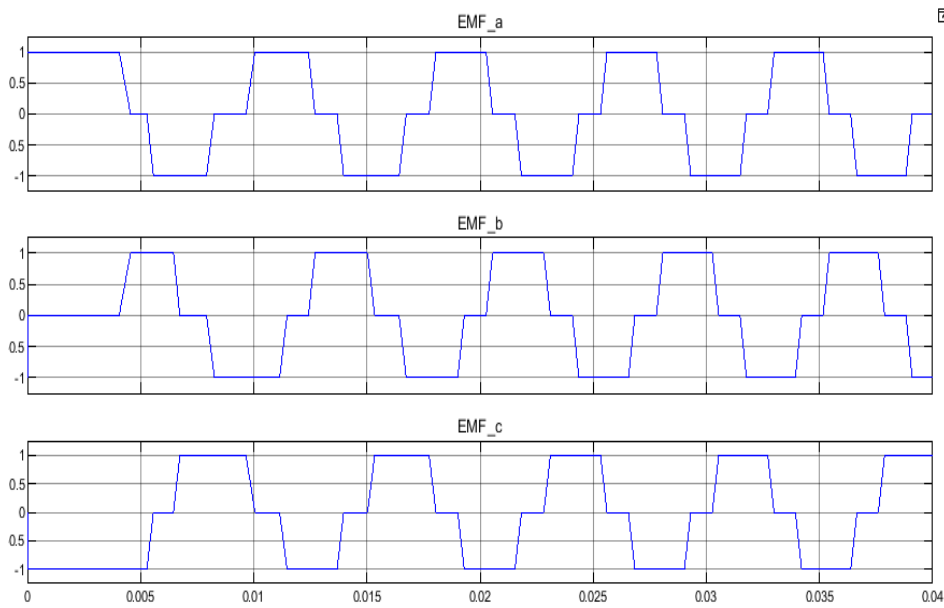


Figure III.16. Back emf_ Eabc.

III.5.Simulation sur proteus**III.5.1.Introduction**

L'utilisation de moteurs DC (BLDC) sans balais suscite beaucoup d'intérêt. Parmi les nombreux avantages d'un moteur BLDC

Les avantages de ceci par rapport à un moteur DC brossé sont les suivants :

- L'absence du commutateur mécanique permet des vitesses plus élevées.
- La performance des balais limite la réponse transitoire dans le moteur CC.
- Avec le moteur CC, ajouter la chute de tension dans les balais, entre autres pertes de moteur.
- Les restrictions de brosse sur la tension de réactance de l'induit limitent la longueur du cœur, réduisant la vitesse de réponse et l'augmentation de l'inertie pour un couple spécifique
- La source de chauffage dans le moteur BLDC est dans le stator, tandis que dans le moteur DC il est dans le rotor. Il est plus facile de dissiper la chaleur dans le BLDC.
- Réduction du bruit sonore et électromagnétique. [24]

III.5.2.Commande de moteur

Le contrôle du moteur BLDC se compose de deux parties:

- La partie 1 consiste à changer le moteur au taux le plus efficace.
- La partie 2 règle la vitesse du moteur.

Dans les limites de paramètres définis. Le but de cette note d'application est d'illustrer une élégante technique sensorielle qui peut être mise en œuvre sur les microcontrôleurs à faible coût. Tous les logiciels de démonstration fonctionneront en boucle ouverte sans régulation de vitesse. [24]

Détecteur de passage à zéro

Le système de passage à zéro consiste à faire passer les entrées à un comparateur de façon synchrone avec la commutation et à surveiller la sortie du comparateur. La sortie du comparateur est filtrée avec un détecteur majoritaire. Ce filtre est piloté par table et recherche une transition de la plupart des 1 à la plupart des 0. Une fois la transition détectée, la commutation peut avoir lieu. [24]

III.5.3. Résultats de la conception et de la simulation du moteur d'entraînement BLDC

La figure 17 montre le circuit schématique du système d'entraînement du moteur BLDC. Le circuit et ses éléments interactifs forment le circuit du conducteur. Comme on peut le constater, des composants autres que le μC sont nécessaires pour une structure complète et fonctionnelle du contrôleur BLDC. En particulier, on a besoin d'un microcontrôleur (ici nous avons choisi le PIC16F887 pour ses caractéristiques et son faible coût), un résonateur à cristaux (d'une fréquence de 20 MHz).

Schéma électrique Simulation dans isis:

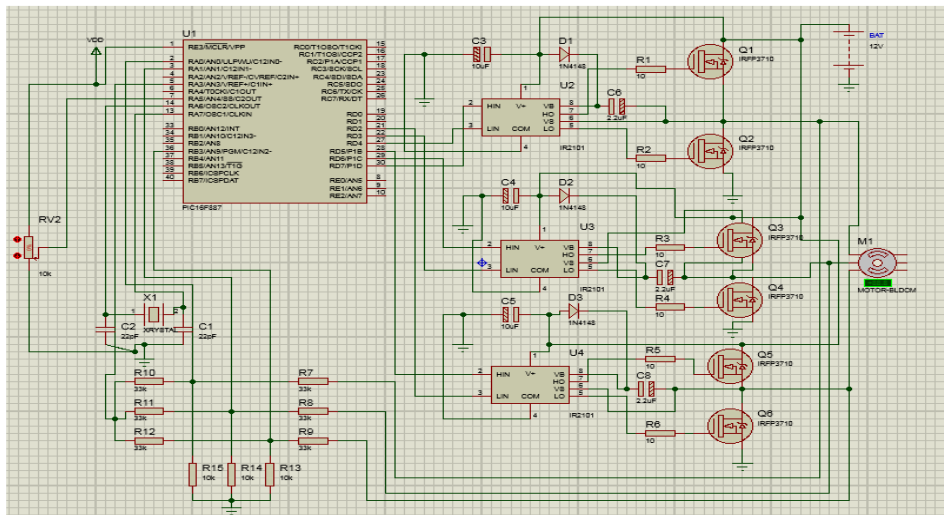


Figure III.17. Schéma électrique Simulation dans isis

III.5.4. Résultats expérimentaux

Résultats indicatifs de la simulation : l'ordre indiqué,

- a) Formes d'onde typiques des tensions aux bornes du moteur BLDC.
- b) Impulsions de sortie des pilotes MOSFET (dans l'ordre indiqué) : côté haut pour la phase « a », côté bas pour la phase « a », côté eau pour la phase « b », côté bas pour la phase « b ».
- c) Impulsions de sortie des pilotes MOSFET (dans l'ordre indiqué) : côté haut pour la phase « a », côté bas pour la phase « a », côté eau pour la phase « c », côté bas pour la phase « c ».
- d) Extrait MOSFET pour la phase « a » (cycle de service : 100 %).
- e) Extrait MOSFET pour la phase « a » (cycle de service : 75 %).

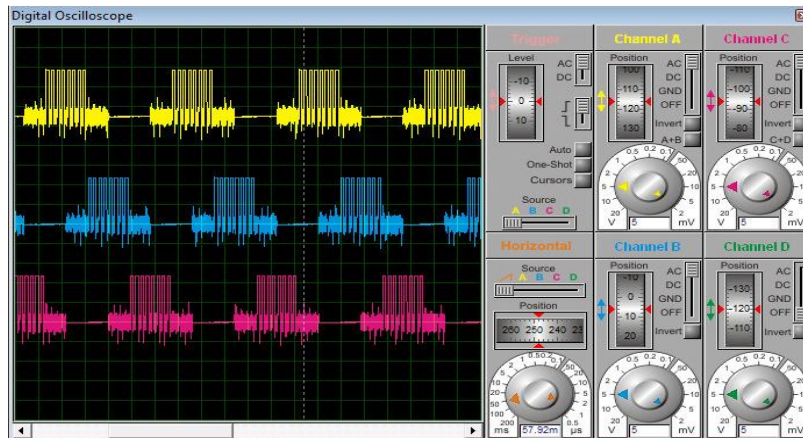


Figure III.18. (a)

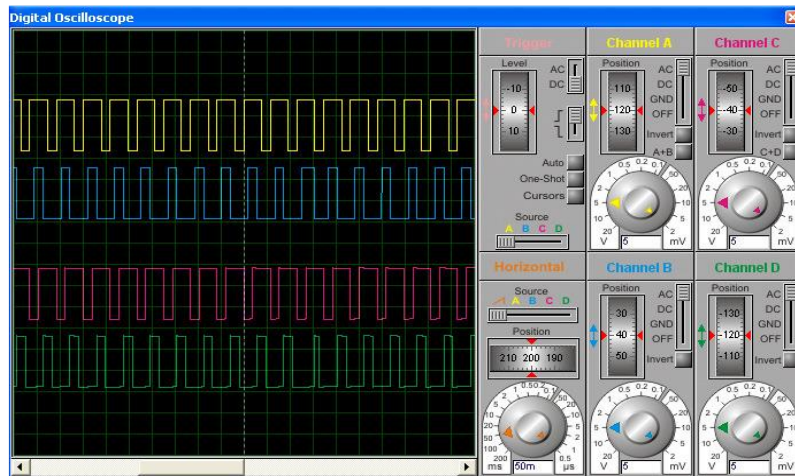


Figure III.18. (b)

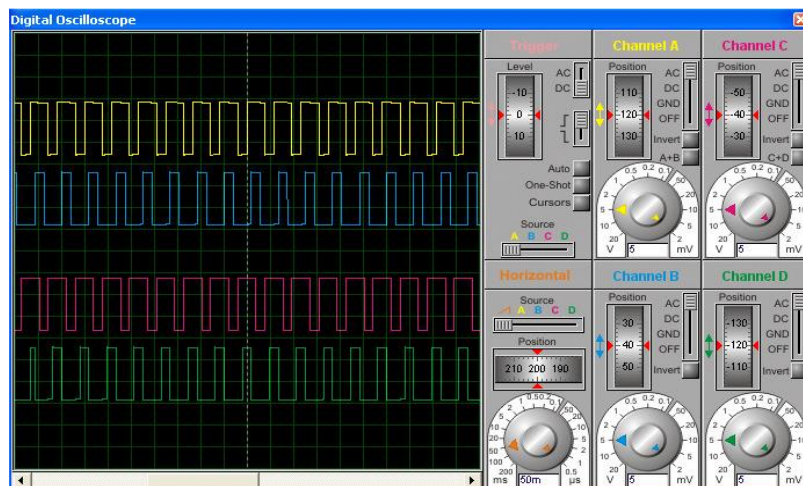


Figure III.18. (c)

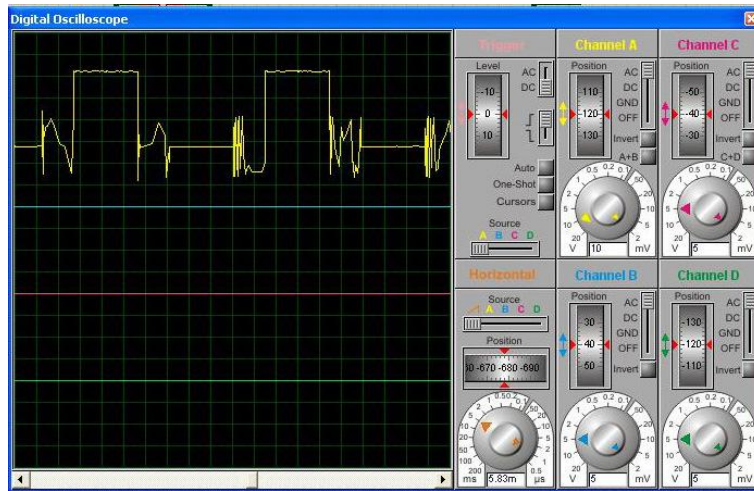


Figure III.18. (d)

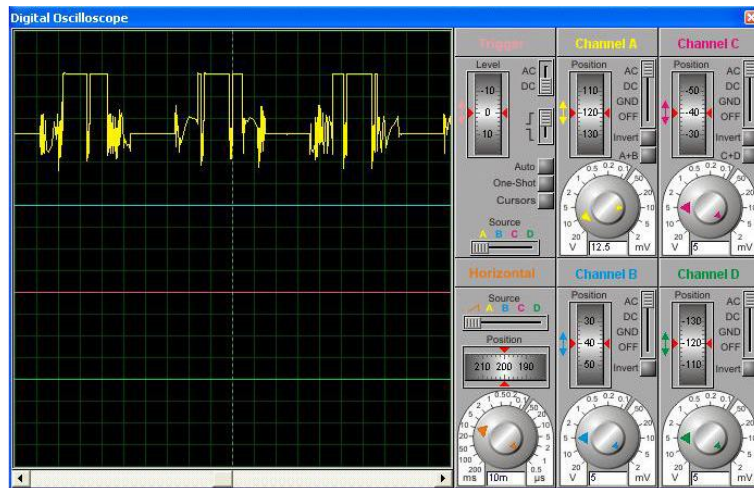


Figure III.18. (e)

III.6. Conclusion

Une technique simple pour détecter le retour de l'EMF pour le contrôle de la vitesse du moteur BLDC est définie dans ce document. La commutation des moteurs BLDC est basée sur la position du rotor. La position du rotor doit être déterminée à l'aide d'une technique sans capteur qui détermine les emplacements de passage à zéro du BEMF. La simulation de la méthode proposée est réalisée dans MATLAB/SIMULINK.

Proteus est utilisé pour simuler un circuit de détection de passage à zéro et un circuit d'entraînement du moteur BLDC à onduleur triphasé sans capteur avec un microcontrôleur à faible coût PIC 16F887.



Conclusion Générale

Conclusion Générale

Selon nos recherches, le vecteur d'approche de contrôle (FOC) présente de nombreux avantages par rapport aux stratégies de contrôle classiques pour les moteurs électriques. Le fait que la commande FOC assure un contrôle exact du couple et de la vitesse est l'un des avantages les plus importants.

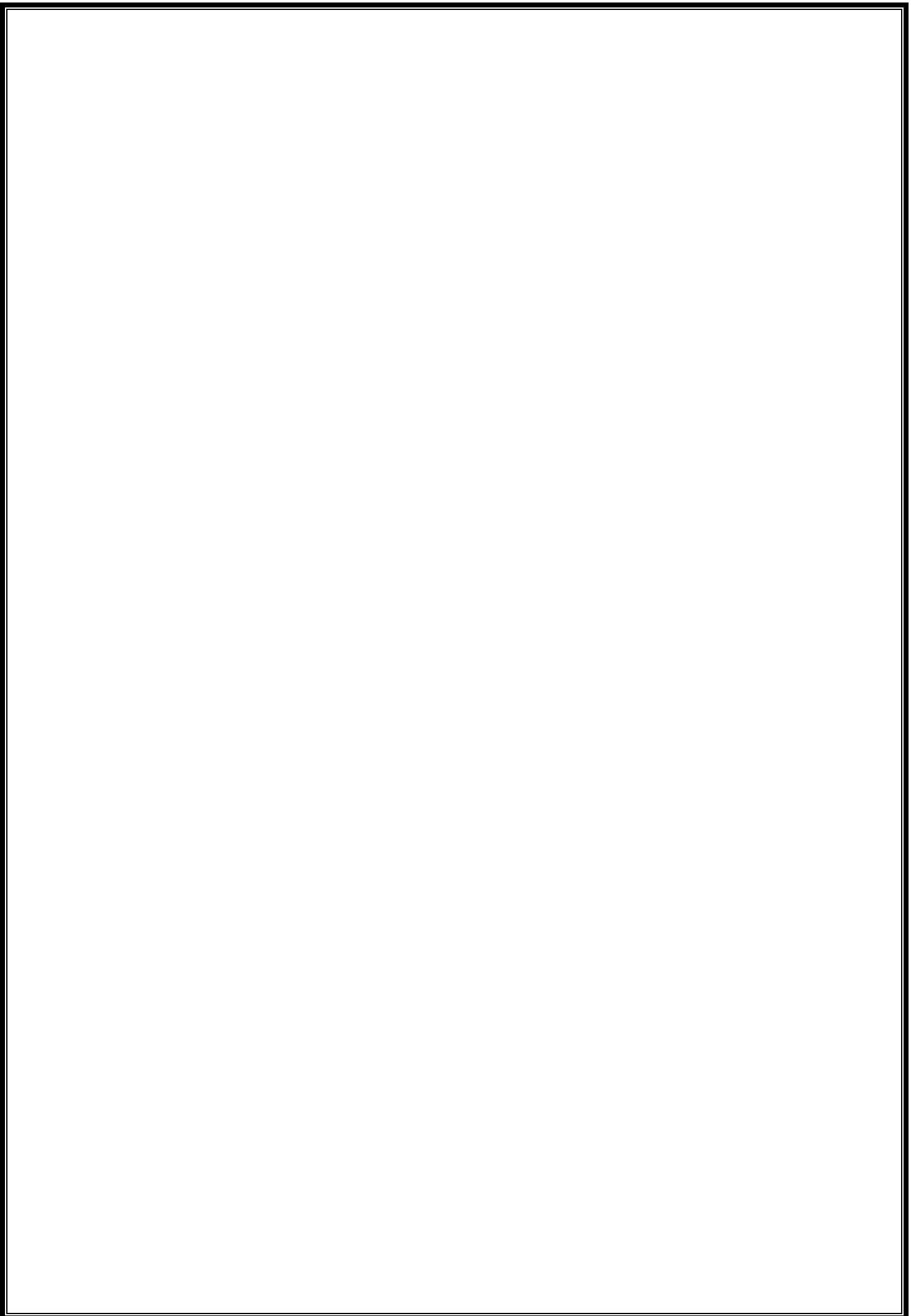
Cependant, le capteur requis par les techniques traditionnelles de contrôle vectoriel augmente les coûts et limite la liberté de création des concepteurs. InstaSpin-FOC, en combinaison avec la technique de codage du logiciel FAST de Texas Instruments, fournit une solution pour la conception directe d'applications FOC.

Dans le premier chapitre, nous avons discuté des différents types de moteurs BLDC et fourni quelques informations générales sur la logique de commutation. L'étude s'est concentrée sur le moteur triphasé puisqu'il est le plus populaire en raison de sa conception de base, et parce qu'il fera l'objet de l'étude suivante.

Il existe deux techniques de commande des moteurs BLDC : la commande avec capteurs de position (SENSORED BLDC) où des capteurs à effet Hall sont généralement utilisées et la commande sans capteurs (SENSORLESS BLDC) où on utilise les points de croisement nul des FCEM des bobines du moteur pour détecter les instants de commutation qui agissent depuis la commande de l'onduleur sur les alimentations à appliquer aux trois bobines du moteur BLDC

Le troisième chapitre consiste à appliquer une méthode pour détecter les mesures des forces contre-électromotrice FCEM générés dans les bobines du moteur et puis détecter les instants de leurs croisements nuls. Ces instants permettent de déclencher les commutations des alimentations des bobines triphasées du moteur BLDC. Cette technique a été simulé sur le logiciel SIMULINK pour commander la vitesse du moteur à l'aide d'un simple PID. Les résultats de simulation montre que le moteur atteint son état stable au bout de 25ms

Nous avons utilisé le logiciel Proteus pour simuler la technique de commutation électronique basée sur les FCEM (Back EMF) BLDC sans capteur avec un microcontrôleur à faible coût PIC 16F887.





Bibliographie

Bibliographie

[1] « Modélisation des moteurs brushless »

<https://eduscol.education.fr>

[2]. BOUSEBSI MERIEM, MORDJAOUI MOURAD, MEDOUED AMMAR
« Modélisation et simulation du moteur BLDC Application : Commande
Prédictive» génie électrique - Université 20 Aout 1955-Skikda, 2019

[3]. TOUIL Moustafa et ZOUBIRI Noureddine « Modélisation et commande
Par la logique floue d'un moteur à courant continu sans balais » thèse
D'ingénieur d'état en génie électronique - Université MOHAMED BOUDIAF -
M'SILA, 2009

[4] Salem SI HALI, «Commande d'un moteur BLDC sans capteur de position»,
Thèse de Master en Génie électrique, Machines électriques ; université Mouloud
Mammeri, Tizi-Ouzou, 2017.

[5]. NAIDJI Assia « Commande Floue-Glissant d'un Moteur BLDC » thèse de
Master en Automatique, Automatique et système - Université MOHAMED
BOUDIAF - M'SILA, 2018

[6]. TEBRI Zoulikha « Etude des propriétés dynamiques des entraînements
Électriques à moteurs à commutation électronique » thèse Magister en
Électrotechnique, Entraînements électriques- Université Mouloud Mammeri de
Tizi-Ouzou, 2017

[7]. BENNOURA ABDEL MADJID et DJABRI KHALED « Etude et
Simulation d'un variateur de vites d'une Machine à courant continu» thèse de
Master en électrotechnique, génie électrique - Centre Universitaire Belhadj
Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2017

[8]. Master Ingenieros « Moteur sans balais (Sans charbons) –Caractéristiques
Fondamentales» Site Web www.masteringenieros.com

[9]. KNF_techno36_1204 « Les nombreux avantages du moteur sans balais »
Site Web www.lmdindustrie.com

- [10] « Cartes_modules_controle_moteurs_201006 » Site Web www.lmdindustrie.com
- [11] « Commande vectorielle» Site Web fr.wikipedia.org
- [12] Mohamad Koteich « ' Commande Vectorielle Sensorless des Moteurs Brushless de Mini-Drones »Thèse de Master 2 Recherche - Gif-sur-Yvette le 7 Septembre 2012.
- [13] Huangsheng Xu, Ph. D. & Yashvant Jani, Ph. D.
Sr. Staff Applications Engineer & Director of MPU Application Engineering
Renesas Technology America « Understanding Sensorless Vector Controlfor Brushless DC Motors», 2008
- [14] K. Neethu, M. Boopathi, Giriraj Mannayee and T. C. Kanish
Department of Mechatronics, Nehru College of Engineering and Research Centre,
Pampadi, Thrissur – 680597
Kerala, India /July 2016
- [15] « Tutorial-Motor-Parameter-Identification-with-PSIM»
<https://psim.powersimtech.com>
- [16]. commande-sans-captur-de-moteurs-brushless - Site Web www.mdp.fr
- [17]. Jacob Beningo « Un moteur BLDC opérationnel en moins d'une heure grâce à une combinaison de matériel/logiciel » - Site Web www.digikey.fr
- [18]. Site Web www.ti.com/lit/ds/sprs523n/sprs523n.pdf
- [19]. Site Web www.ti.com/tool/BOOSTXL-DRV8305EVM
- [20]. « Tutorial-Motor-Parameter-Identification-with-PSIM»
Site Web <https://psim.powersimtech.com>
- [21]. Gamazo-Real JC, Vázquez-Sánchez E, Gómez-Gil J. Position and speed control of brushless dc motors using sensorless techniques and application trends.Sensors. 2010; 10:6901–47.
- [22]. Rao APC, Obulesh YP, Babu CHS. Performance improvement of BLDC motor with hysteresis current controller.International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. 2013; 2(12):5900–7.

[23]. Rajashekar JS, Kumar SCP. Simulation study of MOSFET based drive circuit design of sensorless BLDC motor for space vehicle. International Journal Of Current Trends in Engineering and Technology. 2014; 1(1):1–6.

[24]. «Sensorless Brushless DC Motor Control with PIC16»

Site Web <https://www.microchip.com/>

[25]. GOURAA HANIA et DOUAOUDI SALIMA «Modélisation d'un moteur BLDC par un réseau de neurones MLP» MASTER EN ELECTRONIQUE, Université Abdelhamid Ibn Badais Mostaganem. 2019/2020

[26]. « Brushless DC motor en angles » Site Web <https://www.lmdindustrie.com>

[27]. HARMAT Brahim et DJAAFRI Nafissa, «Comparaison des contrôleurs P, PI et PID à la commande de la vitesse d'un moteur à CC sans balais (BLDC)» 2020/2019

[28]. LAHBIB AMAANAN, « Les différentes techniques de commande des moteurs brushless », livre, Ecole polytechnique Clermont Ferrand, 2013-2014.

[29]. Principe de régulation P-PI-PID. [PDF] (2022),

<https://www.abcclim.net/regulation-p-pi-pid.html> 15/07/2022