

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université -Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
Filière : Electromécanique
Spécialité : Electromécanique
Thème

Le contrôle MLI de vitesse pour un moteur Brushless DC

Présenté Par :

- 1) Mr BEDIA Sidahmed.
- 2) Mr BEGHNI Mourad.

Devant le jury composé de :

| | | | |
|-----------------------|-------|--------------------------|---------------|
| Dr AISSOU Massinissa | M C B | UAT.B.B (Ain Temouchent) | Président |
| Mr AYACHE Zouaoui | M A A | UAT.B.B (Ain Temouchent) | Examineur |
| Mr BENS Aid Boubakeur | M A A | UAT.B.B (Ain Temouchent) | Encadrant |
| Mr MECIRDI Noureddine | M A A | UAT.B.B (Ain Temouchent) | Co- Encadrant |

Année universitaire 2020/2021



Formulaire de déclaration sur l'honneur Relatif à l'engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans l'élaboration d'un travail de recherche

(Annexe de l'arrêté n°933 du 28 juillet 2016 fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat)

Je soussigné,

Etudiant, Mr. **BEDIA Sidahmed.**

Détenteur d'une carte d'étudiant N° : 2745-T-15, délivrée le : 30/11/2015.

Inscrit à la faculté : **Sciences et de la Technologie ;**

Département : Génie Electrique

Et chargé de préparer un mémoire de fin d'étude Master 2.

Sous-titré : **Le contrôle MLI de vitesse pour un moteur Brushless DC.**

Déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requise dans l'élaboration du projet de recherche suscitée.

À **Ain Temouchent**, le : 08/07/2021

Signature



Formulaire de déclaration sur l'honneur Relatif à l'engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans l'élaboration d'un travail de recherche

(Annexe de l'arrêté n°933 du 28 juillet 2016 fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat)

Je soussigné,

Etudiant, Mr. **BEGHNI Mourad**.

Détenteur d'une carte d'étudiant N° :10332-T-15, délivrée le : 18/10/2015.

Inscrit à la faculté : **Sciences et de la Technologie** ;

Département : Génie Electrique

Et chargé de préparer un mémoire de fin d'étude Master 2.

Sous-titré : **Le contrôle MLI de vitesse pour un moteur Brushless DC.**

Déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requise dans l'élaboration du projet de recherche suscit.

À Ain Temouchent, le : 08/07/2021

Signature

REMERCIEMENTS

REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont tout premièrement, à Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage pour réaliser ce travail.

On tient à remercier :

*Notre encadreur **Mr : BENS Aid Boubakeur** pour son suivi continu ainsi que sa bonne orientation du travail.*

Nos remerciements vont également à nos professeurs pour leurs conseils précieux.

On remercie également les membres de jury :

D'avoir acceptés d'honorer par leur présence la soutenance de notre mémoire de fin d'étude.

Enfin on remercie tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin afin d'achever ce travail en particulier mes collègues.

Dédicace

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents.

Pour leur soutien inconditionnel, leurs encouragements, et bien sûr pour m'avoir permis de réaliser mes études dans les meilleures conditions.

A toute ma famille.

A tous mes amis.

A tous les enseignants qui m'ont aidé de proche ou de loin pour être un jour un Master.

A ceux qui m'ont soutenu pendant toute la durée de mes études.

BEDIA Sidahmed

Dédicace

Dédicace

Je dédie ce travail à mes très chers parents pour leurs soutiens inconditionnels.

Puisse Dieu, vous procurez santé, bonheur et prospérité.

A ma famille qui sont m'encourager tout au long de ma vie.
A tous les enseignants qui m'ont aidé ainsi que nos amis.

BEGHNI Mourad

RESUME

Résumé

Ce projet de fin étude en Master Electromécanique est porté sur le contrôle MLI de vitesse pour un moteur Brushless DC. Les modèles mathématiques ont été développés et subséquemment utilisés pour obtenir la simulation paramétrée. La technique de commande MLI est accomplie avec l'utilisation du logiciel /PSIM. Les paramètres de la méthode qui est utilisée pour développer ultérieures simulations.

Pour satisfaire les besoins de ce mémoire, notre travail s'articule principalement autour de quatre chapitres :

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

Le deuxième chapitre modélisation Mathématique concernant la machine **BLDC** équation mathématique et mécanique.

Le troisième chapitre la technique de commande **MLI** et définition convertisseurs statiques (onduleur). Boucle de régulation **PI**.

Le quatrième chapitre simulation association convertisseur machine Brushless et boucle de régulation pour contrôle de vitesse.

Le présent mémoire se termine par une conclusion qui résume tous les résultats obtenus dans cette étude et qui présente quelques perspectives.

RESUME

Abstract

This end of study project in Master Electromechanics is focused on PWM speed control for a Brushless DC motor. Mathematical models were developed and subsequently used to obtain the simulation parameters. The PWM control technique is accomplished with use under software / PSIM. The parameters of the method that is used to develop further simulations.

To meet the needs of this dissertation, our work is mainly structured around four chapters:

The first chapter is devoted to a definition of the BLDC with their operating principle, and to quote their characteristics and constitution.

The second chapter Mathematical modeling concerning the BLDC machine mathematical and mechanical equation.

The third chapter the PWM control technique and definition of static converters (inverter). PI regulation loop.

The fourth chapter simulation association brushless machine converter and regulation loop for speed control.

This memoir ends with a conclusion which summarizes all the results obtained in this study and which presents some perspectives.

المخلص

يركز مشروع نهاية الدراسة في Master Electromechanics على التحكم في سرعة PWM لمحرك DC بدون فرشاة. تم تطوير النماذج الرياضية واستخدامها لاحقاً للحصول على معلمات المحاكاة. يتم تحقيق تقنية التحكم في PWM باستخدام البرنامج PSIM. / معلمات الطريقة المستخدمة لتطوير المزيد من عمليات المحاكاة.

لتلبية احتياجات هذه لأطروحة يتمحور عملنا بشكل أساسي حول أربعة فصول:

تم تخصيص الفصل الأول لتعريف BLDC مع مبدأ التشغيل الخاص بهم ، والاقتراب من خصائصها ودستورها.

الفصل الثاني النمذجة الرياضية الخاصة بآلة BLDC للمعادلة الرياضية والميكانيكية.

الفصل الثالث هو تقنية التحكم في PWM وتعريف المحولات الساكنة العاكس . حلقة تنظيم PI.

الفصل الرابع محاكاة محول آلة فرش وتنظيم حلقة للتحكم في السرعة.

تنتهي هذه الورقة بخاتمة تلخص جميع النتائج التي تم الحصول عليها في هذه الدراسة والتي تقدم بعض وجهات النظر.

SOMMAIRE

SOMMAIRE :

CHAPITRE I

Machine synchrone/ Moteur Brushless DC moteur

| | |
|---|----|
| Introduction générale..... | 1 |
| I. Introduction..... | 2 |
| I.1 Problématique | 2 |
| I.2 Objectifs | 2 |
| II. Généralité moteur synchrone..... | 3 |
| II.1 Définition moteur synchrone | 3 |
| II.2 Principe de fonctionnement | 4 |
| III. Introduction moteur Brushless | 5 |
| III.1 Composition d'un moteur BLDC | 6 |
| III.2 Constitution du Moteur BLDC | 7 |
| III.3 Le Système de Détection de la Position du Rotor | 8 |
| III.4 Le Principe de fonctionnement de Moteurs BLDC | 9 |
| III.5 Les Caractéristique de Moteur BLDC..... | 10 |
| III.6 Les différents types de Moteur BLDC | 11 |
| III.6.1 Moteurs Brushless outrunner | 11 |
| III.6.2 Moteurs Brushless inrunner | 12 |
| III.6.3 Moteurs Brushless disques..... | 13 |
| III.7 Architecture et représentation du Moteur BLDC | 14 |
| III.8 Comparaison entre les moteurs | 15 |
| III.9 Démarrage d'un moteur BLDC | 16 |
| III.10 Avantages et Inconvénients du moteur BLDC | 16 |
| III.10.1 Avantages | 16 |
| III.10.2 Inconvénients | 17 |
| IV. Conclusion | 18 |

CHAPITRE II

Modélisation Brushless DC moteur

| | |
|--|----|
| I. Introduction..... | 19 |
| II. Modèle mathématique du Moteur BLDC | 19 |
| II.1 Les Équations Électrique | 19 |
| II.2 Équation mécanique | 20 |

SOMMAIRE

| | |
|--|----|
| II.3 Equations mathématiques du moteur Brushless | 21 |
| II.3.1 Rendement | 21 |
| II.3.2 Vitesse à vide | 21 |
| II.3.3 Couple de démarrage | 22 |
| II.3.4 La constante mécanique | 22 |
| II.3.5 La constante de vitesse | 22 |
| II.3.6 La constante du fore électromotrice | 22 |
| II.3.7 La constante de courant | 23 |
| II.3.8 Pente de la caractéristique | 23 |
| II.3.9 Accélération angulaire | 23 |
| II.4 La Force Électromotrice | 24 |
| II.5 Couple Électromagnétique | 25 |
| III. Modèle de l'ensemble machine commutateur électronique | 25 |
| IV. Modèle mathématique d'un moteur à courant continu | 27 |
| V. Conclusion | 32 |

CHAPITRE III

Commande/ Régulation Brushless DC moteur

| | |
|---|----|
| I. Introduction..... | 33 |
| II. Définition..... | 34 |
| II.1 Classification des onduleurs | 34 |
| II.1.1 Onduleurs non autonomes | 35 |
| II.1.2 Onduleurs autonomes..... | 35 |
| II.1.2.1 Onduleurs (autonomes) de tension..... | 35 |
| II.1.2.2 Onduleurs (autonomes) du courant | 35 |
| II.1.2.3 Onduleurs à résonance | 36 |
| II.2 Types d'onduleurs autonomes de tension..... | 36 |
| II.2.1 Les onduleurs mono phasés | 36 |
| II.2.2 Les onduleurs triphasés..... | 37 |
| II.3 Principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé | 38 |
| II.4 Domaines d'application..... | 38 |
| III. Techniques de commande de l'onduleur de tension triphasé | 40 |
| III.1 La Commande MLI | 40 |
| III.1.1 Différentes techniques de modulation de longueur d'impulsions (MLI) | 40 |
| III.1.1.1 La modulation linéaire multiple (UPWM) | 40 |
| III.1.1.2 La modulation sinusoïdale triangulaire unipolaire (SPWM)..... | 41 |

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| III.1.1.3 La modulation sinusoïdale partielle (ou modifiée) (MSPWM) | 42 |
| III.1.1.4 L'injection d'un harmonique 3 dans la référence | 43 |
| III.1.1.5 La modulation calculée | 44 |
| III.1.1.6 La modulation vectorielle | 44 |
| III.1.1.7 Commande MLI triangle- sinusoïdales | 45 |
| III.1.2 Caractéristiques de la modulation | 46 |
| III.1.3 Principe de base | 46 |
| III.1.4 Schéma de bloc | 47 |
| IV. Régulation | 48 |
| IV.1 Modélisation du moteur | 48 |
| IV.2 Choix du correcteur et détermination des coefficients | 52 |
| V. Conclusion | 53 |

CHAPITRE IV

Machine synchrone/ Moteur Brushless DC moteur

| | |
|---|----|
| I. Introduction | 54 |
| II. Logiciel PSIM | 54 |
| III. Simulation | 55 |
| III.1 Simulation démarrage à vide | 55 |
| III.2 Résultat de simulation démarrage à vide | 56 |
| III.3 Simulation avec la charge | 57 |
| III.4 Résultat de simulation avec la charge | 58 |
| III.5 Simulation démarrage avec la charge et changement de vitesse de référence | 59 |
| III.6 Résultat de simulation avec la charge et changement de vitesse | 60 |
| IV. Conclusion | 61 |
| Conclusion Générale | 62 |

Liste des Figures

Liste des figures

CHAPITRE I

Machine synchrone/ Moteur Brushless DC moteur

| | |
|---|----|
| Figure I.1. Les Composant d'un moteur BLDC..... | 6 |
| Figure I.2. Parties principales du moteur BLDC : (a)Machine Synchrone, (b) Circuit de commutation électronique, (c)source DC. | 7 |
| Figure I.3. Capteur à effet hall | 8 |
| Figure I.4. Principe de fonctionnement d'un moteur BLDC triphasé | 9 |
| Figure I.5. Moteurs Brushless outrunner..... | 11 |
| Figure I.6. Moteurs Brushless inrunner | 12 |
| Figure I.7. Dessin représentatif Moteurs Brushless disques..... | 13 |
| Figure I.8. Moteurs Brushless disques..... | 13 |
| Figure I.9. Bobinages de différents moteurs | 14 |

CHAPITRE II

Modélisation Brushless DC moteur

| | |
|---|----|
| Figure II.1. Schéma d'un moteur Brushless..... | 21 |
| Figure II.2. Formes typiques des courants et des FEMs | 24 |
| Figure II.3. Ensemble moteur-commutateur | 25 |
| Figure II.4. Signaux à effet hall..... | 26 |
| Figure II.5. le circuit électrique du moteur à courant continu | 27 |
| Figure II.6. Montage de système électromécanique du moteur à courant continu. | 27 |

CHAPITRE III

Commande/ Régulation Brushless DC moteur

| | |
|--|----|
| Figure III.1. Schéma de principe de l'onduleur | 34 |
| Figure III.2. Schéma de principe de l'onduleur monophasé | 36 |
| Figure III.3. Schéma d'onduleur de tension triphasé..... | 37 |
| Figure III.4. La modulation de largeur d'impulsions multiples | 40 |
| Figure III.5. MLI sinusoïdal triangulaire unipolaire | 41 |
| Figure III.6. La modulation sinusoïdale modifiée..... | 42 |
| Figure III.7. MLI avec l'injection de l'harmonique 3 | 43 |
| Figure III.8. Schéma de base MLI | 44 |

Liste des Figures

| | |
|--|-----------|
| Figure III.9. Schéma fonctionnel de la commande MLI..... | 47 |
| Figure III.10. Schéma du moteur | 49 |
| Figure III.11. Schéma bloc du moteur | 50 |
| Figure III.12. Schéma bloc complet de la régulation..... | 51 |
| Figure III.13. Diagramme de Black-Nichols de la fonction de transfert | 52 |

CHAPITRE IV

Machine synchrone/ Moteur Brushless DC moteur

| | |
|--|-----------|
| Figure IV.1. Schéma de la simulation contrôle vitesse BLDC..... | 56 |
| Figure IV.2. Résultat de la simulation vitesse BLDC | 57 |

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

CHAPITRE I

Machine synchrone/ Moteur Brushless DC moteur

| | |
|---|-----------|
| Tableau I.1. Comparaison entre les moteurs | 15 |
|---|-----------|

CHAPITRE II

Modélisation Brushless DC moteur

| | |
|--|-----------|
| Tableau II.1. Les expressions des FEMs induites dans chaque phase du moteur | 26 |
|--|-----------|

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

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

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

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

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

I. Introduction :

Les moteurs sans balais « Brushless » permettent d'obtenir des ratios performances/encombrement très impressionnants par rapport aux technologies plus conventionnelles. Associée à un système électronique, l'amélioration des performances de cette technologie est continue depuis une vingtaine d'années.

la technologie Brushless trouve sa place dans la chaîne de traction électrique et hybride des véhicules là où l'encombrement et le poids doivent être optimisés robotique bien sûr, mais aussi véhicules électriques, outillages portatifs, ventilateurs ou encore disques durs.

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, ou moteurs sans balais.

I.1 Problématique :

De nos jours le moteur Brushless est largement utilisés 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, ou moteurs sans balais.

Alors, quelle est le moteur Brushless, leur principe de marche, les différentes type du moteur et la commande de vitesse de ce moteur.

I.2 Objectifs :

Le contrôle MLI de vitesse pour un moteur Brushless DC.

II. Généralité moteur synchrone

Le moteur synchrone est aussi un moteur utilisé pour la motorisation des ascenseurs. Ces dernières années ont vu ce type de moteur revenir en force parallèlement au développement des variateurs de vitesse.

II.1 Définition moteur synchrone

Une machine synchrone est une machine électrique :

- soit produisant un courant électrique dont la fréquence est déterminée par la vitesse de rotation du rotor : Générateur électrique.
- soit absorbant un courant électrique dont la fréquence détermine la vitesse de rotation du rotor : Moteur électrique.

Au-delà de quelques kilowatts, les machines synchrones sont généralement des machines triphasées. Le rotor, souvent appelé « roue polaire », est alimenté par une source continue ou équipé d'aimants permanents.

La machine synchrone se compose d'une partie tournante, le rotor, et d'une partie fixe, le stator. Pour les faibles puissances, le rotor se compose d'aimants permanents, par exemple dans les horloges ou les disques durs informatiques, mais pour les puissances importantes on utilise un électro-aimant.

Pour produire du courant, on utilise une force extérieure pour faire tourner le rotor : son champ magnétique, en tournant, induit un courant électrique alternatif dans les bobines du stator. La vitesse de ce champ tournant est appelée « vitesse de synchronisme ».

Si l'on ne fait pas tourner le rotor par une force extérieure, il tournera seul s'il est alimenté par un courant alternatif : son champ magnétique s'alignera tour à tour sur chacune des trois bobines du stator provoquant, de décalage en décalage, la rotation du rotor. Sa vitesse de synchronisme sera directement liée à la fréquence de l'alimentation électrique [5].

II.2 Principe de fonctionnement :

Le moteur synchrone se compose, comme le moteur asynchrone, d'un stator et d'un rotor séparés par un entrefer. La seule différence se situe au niveau de la conception du rotor. La figure ci-dessous montre un rotor à pôles saillants constitués d'aimants permanents ou d'électro-aimants alimentés en courant continu.

Après le démarrage, le moteur tourne en synchronisme avec le champ tournant. A vide les axes des pôles du champ tournant et du rotor sont confondus. En charge, les axes sont légèrement décalés. La vitesse du moteur synchrone est constante quelle que soit la charge. On notera aussi que :

- La charge (le système d'ascenseur) ne doit pas dépasser l'effort de démarrage entre le rotor et le champ tournant.
- Le couple moteur est proportionnel à la tension à ses bornes.

Parmi les moteurs synchrones on trouve le moteur Brushless.

III. Introduction moteur Brushless :

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

Le stator est constitué de bobines d'excitation qui sont généralement au nombre de 3 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 également 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 commutations de l'alimentation.

III.1 Composition d'un moteur BLDC :

Un moteur Brushless comporte les mêmes éléments qu'un moteur à courant continu, excepté le collecteur, mais l'emplacement des bobines et des aimants permanents sont inversés. Le rotor est composé d'un ou plusieurs aimants permanents, et le stator de plusieurs bobinages [2].

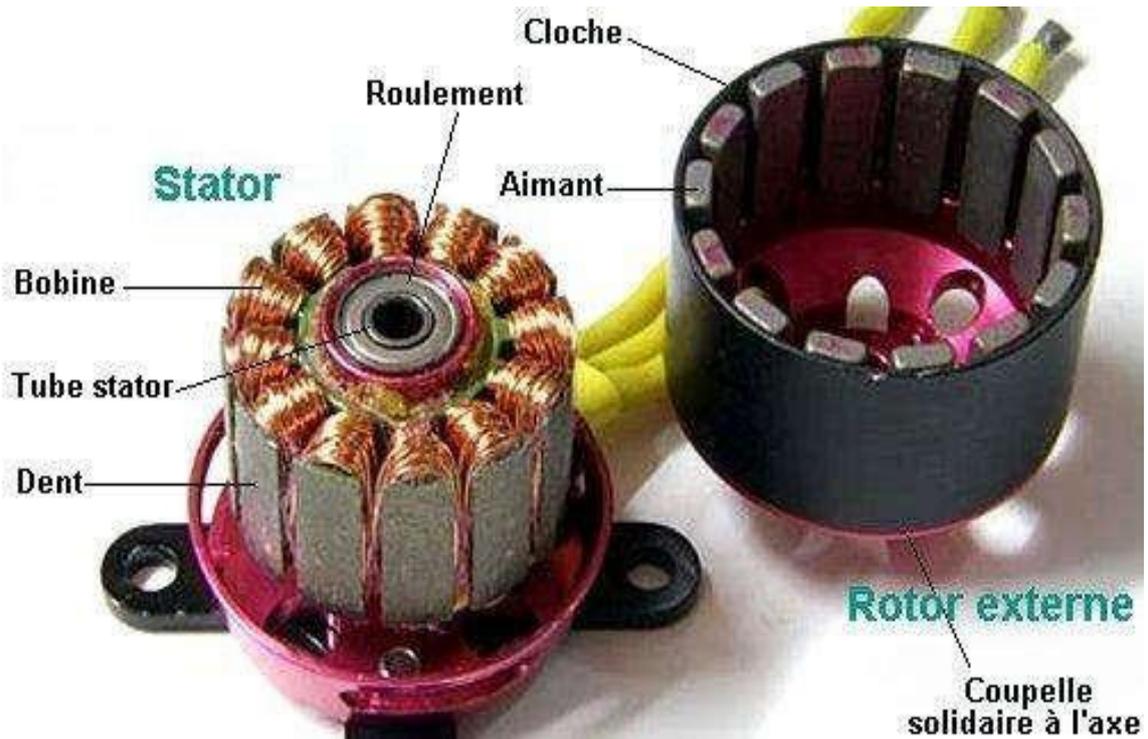


Figure I.1. Les Composant d'un moteur BLDC.

III.2 Constitution du Moteur BLDC :

Le moteur BLDC est défini comme une combinaison de la machine à courant alternatif (machine synchrone) avec un commutateur électronique et les capteurs de position du rotor. Ce type de moteur est caractérisé par une caractéristique mécanique linéaire mais, par rapport au moteur classique à courant continu il ne contient pas le commutateur mécanique et les balais. Le moteur à courant alternatif a des enroulements polyphasés sur le stator et les aimants permanents sur le rotor [1] [2].

Les parties principales du moteur BLDC, représentées sur figure I.2, sont :

Moteur synchrone (ayant en général trois phases)

Circuit de commutation électronique.

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

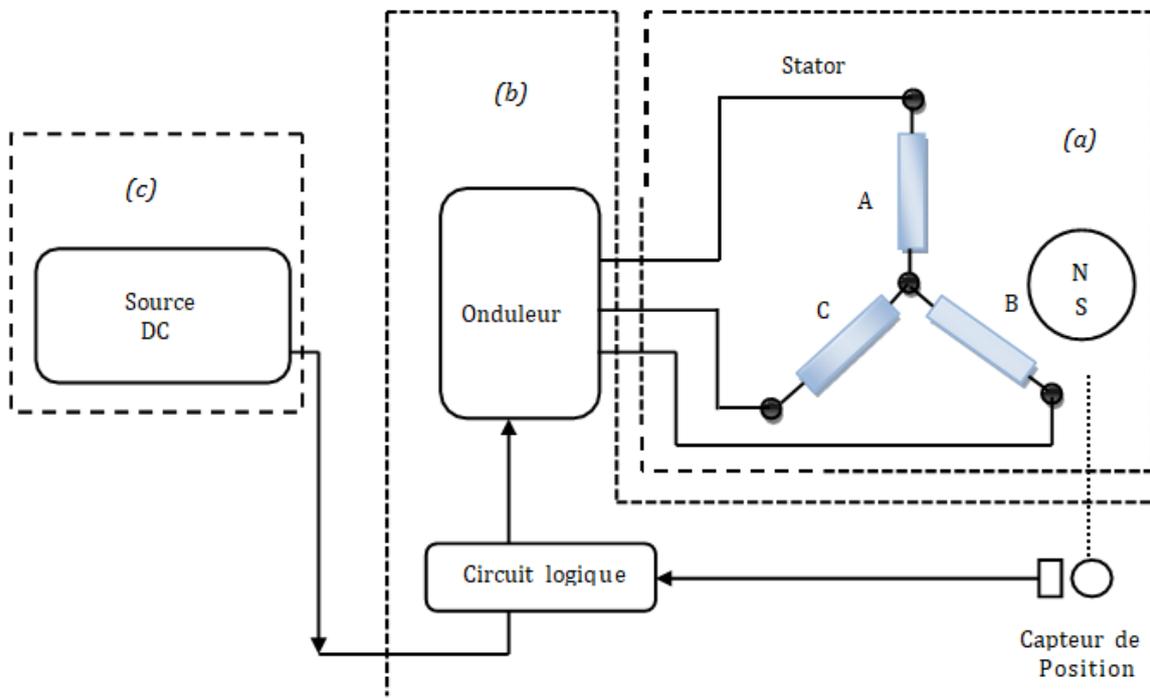


Figure I.2. Parties principales du moteur **BLDC** : (a)Machine Synchrone, (b) Circuit de commutation électronique, (c)source DC.

III.3 Le Système de Détection de la Position du Rotor :

Le capteur de position du rotor est une partie intégrée au moteur BLDC. La détection de la position du rotor peut être réalisée par deux méthodes:

Sans capteur (sensorless).

Avec le capteur.

Pour la dernière méthode, les capteurs électro-optiques (capteurs d'effet de Hall "du nom de celui qui remarqua le phénomène en 1879") et le dispositif le plus généralement utilisé [2].

- **Capteurs à effet Hall**

Contrairement à un moteur à courant continu balayé, la commutation d'un moteur BLDC est commandée électroniquement. Pour faire tourner le moteur BLDC, les enroulements de stator doivent être activés dans une séquence. Il est important de connaître la position du rotor afin de comprendre ce qui enroulement sera mis sous tension après la séquence d'excitation. La position du rotor est détectée en utilisant des capteurs à effet Hall intégrés dans le stator. La plupart des moteurs BLDC ont trois capteurs de Hall intégrés dans le stator sur le côté opposé à l'entraînement du moteur.

Chaque fois que les pôles magnétiques du rotor passent près des capteurs à effet Hall, ils donnent un signal haut ou bas, indiquant le N ou le pôle S passant à proximité des capteurs. Sur la base de la combinaison de ces trois signaux de capteurs de hall, la séquence exacte de commutation peut être déterminée.

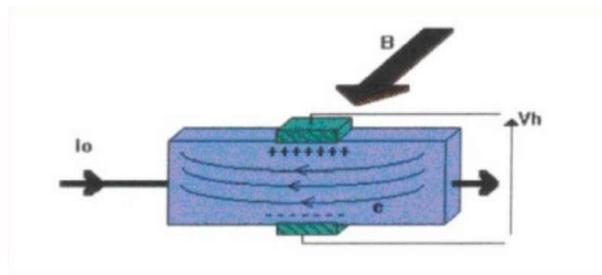


Figure I.3. Capteur à effet hall.

III.4 Le Principe de fonctionnement de Moteurs BLDC :

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

Comme le montre la figure (I.4), nous avons maintenant faire tourner le pôle nord du rotor vers la phase P2 du stator, le phototransistor PT1 détecte la lumière et met le transistor Tr1 en marche. Dans cet état, le courant électrique passant à travers l'enroulement W1 crée un pôle sud au niveau de la phase P1 qui va attirer le pôle nord du rotor pour le déplacer dans la direction de la flèche. Quand le pôle nord vient dans l'axe de la phase P1, l'obturateur de rotation, qui est relié à l'axe, cache PT1 mais le phototransistor PT2 sera exposé à la lumière et un courant traverse le transistor Tr2 [2].

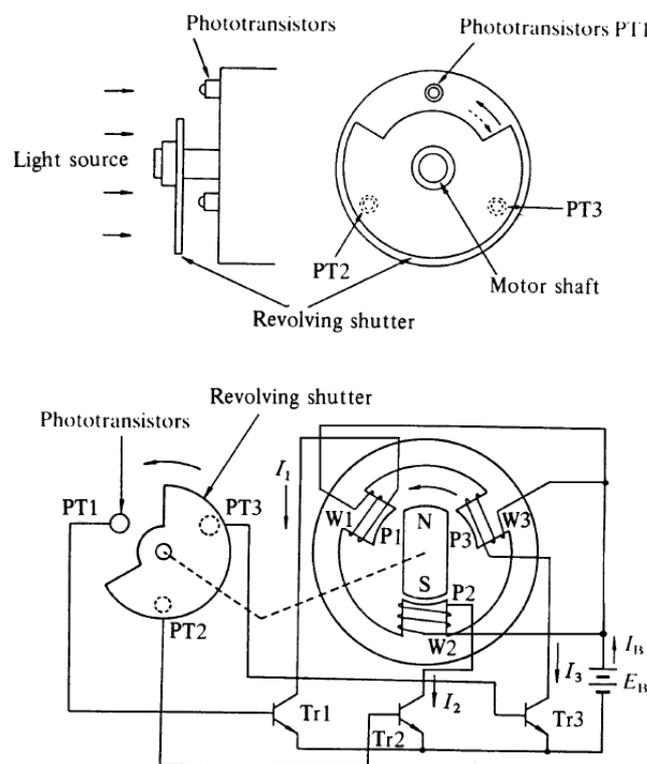


Figure I.4. Principe de fonctionnement d'un moteur BLDC triphasé.

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

III.5 Les Caractéristique de Moteur BLDC :

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

- Meilleure vitesse par rapport à la réponse de couple
- Réponse dynamique élevée
- Haute efficacité
- durée de vie longue
- Fonctionnement silencieux

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

III.6 Les différents types de Moteur BLDC :

III.6.1 Moteurs Brushless outrunner :

Les moteurs Brushless outrunner comprenant plus de 3 bobines et 2 pôles ne font qu'une fraction de tour lorsque le champ a tourné de 180° . Leur fréquence de rotation est donc plus faible mais le couple très élevé. Ces moteurs Brushless outrunner sont souvent utilisés dans des applications qui nécessitent un fort couple, car ils peuvent être reliés à la charge sans nécessiter de dispositif de réduction. Leur coefficient KV est relativement faible par rapport aux autres types de moteurs Brushless. Chaque composant des moteurs sont de la plus haute qualité, des matériaux utilisés, de la boîte qu'ils expédient. Ils sont conçus pour fournir une énergie fiable pour votre modèle réduit d'avion à des prix abordables, offrant une solution de performance totale [2].

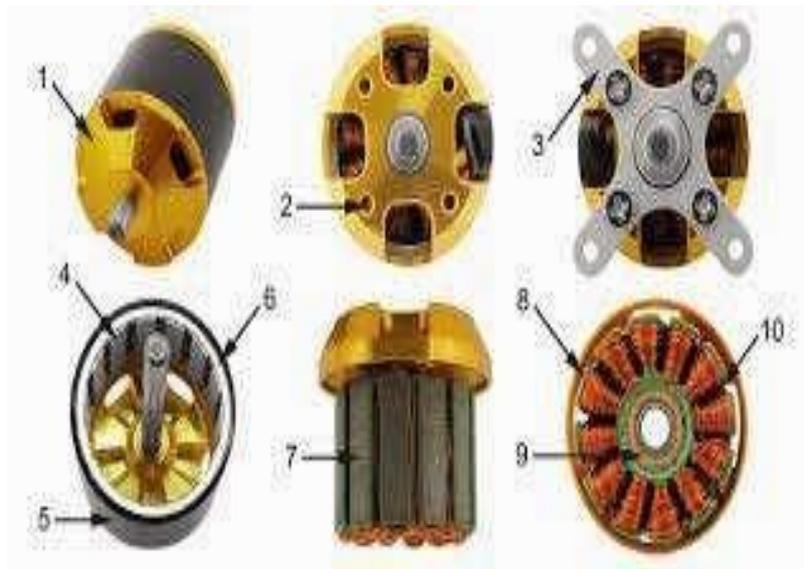


Figure I.5. Moteurs Brushless outrunner.

III.6.2 Moteurs Brushless inrunner

Les « inrunner » ont été les seuls moteurs Brushless utilisés au début de la propulsion électrique en aéromodélisme. Ils ont le plus souvent deux ou quatre pôles et nécessitent donc un réducteur du fait des régimes importants de rotation incompatibles avec les régimes de rotation maximaux des hélices. Leur rendement maximum est de l'ordre de 90 %, mais le réducteur en aval diminue ce rendement d'environ 5%. Ils sont d'une utilisation plutôt rare aujourd'hui dans notre univers car supplantés par les « outrunners ». On les distingue facilement par le fait que leur forme est un cylindre fixe avec seul un axe tournant à une extrémité [2].



Figure I.6. Moteurs Brushless inrunner

III.6.3 Moteurs Brushless disques :

Le rotor et le stator peuvent également être constitués de deux disques faces à face, avec les rayons et les bobines répartis selon les rayons de ces deux disques. Ce type de moteur Brushless est peu employé car l'action des bobines sur les aimants crée un effort axial important qui nécessite des butées à billes conséquentes [2].

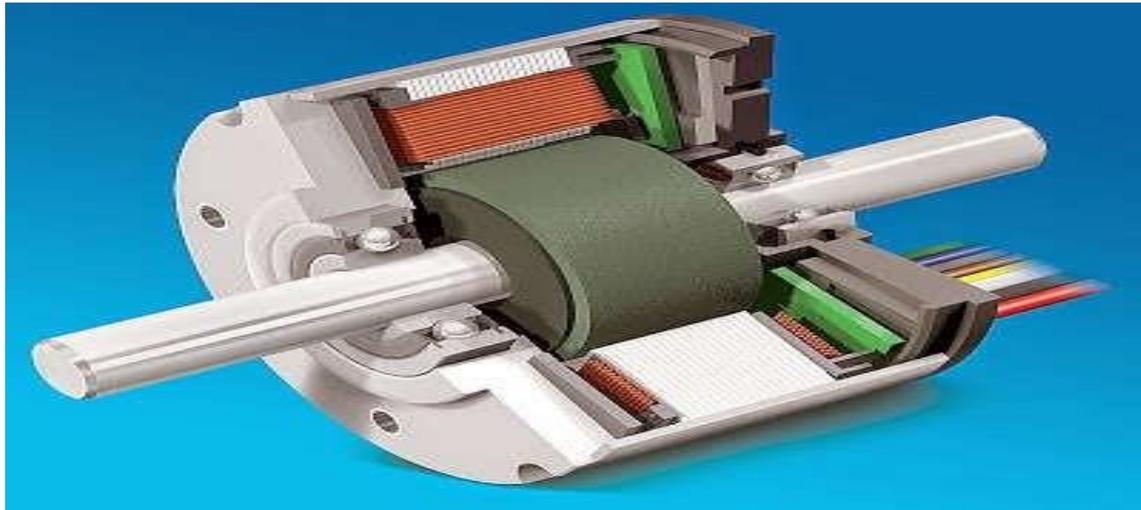


Figure I.7. Dessin représentatif Moteurs Brushless disques



Figure I.8. Moteurs Brushless disques

III.7 Architecture et représentation du Moteur BLDC :

Selon les critères de puissance, d'encombrement, ou de qualité, les bobinages des moteurs sont différents. Deux architectures se trouvent couramment : l'organisation des bobinages répartis sur plusieurs encoches (figure I.8, photo de gauche, sur les moteurs relativement puissants) ou au contraire des bobines isolées sur une encoche (photo de droite, sur les petits moteurs à bas coût).

La représentation figure I.9 s'approche de la photo de suivante.



Figure I.9. Bobinages de différents moteurs

III.8 Comparaison entres les moteurs :

Tableau I.1. :

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

III.9 Démarrage d'un moteur BLDC :

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

III.10 Avantages et Inconvénients du moteur BLDC :

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

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

III.10.1 Avantage :

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

➤ Haute efficacité

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

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

➤ **Plus silencieux**

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

➤ **Beaucoup de temps à l'aide**

En raison de l'absence de balais, moteurs Brushless, soulager les pertes dues à la friction. Et dans les plus grands modèles où la surchauffe peut être un problème, ils sont plus faciles à refroidir. Le renforcement de l'efficacité est plus grande dans la région de marche à vide et charge faible de la courbe de rendement du moteur.

III.10.2 Inconvénients :

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

IV. Conclusion

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

Dans ce chapitre nous avons donné une définition générale des machines synchrones et leurs principe de fonctionnement ainsi que une définition du moteur brushless et cité leur caractéristique et on définie leur fonctionnement.

I. Introduction :

L'objectif principal de ce chapitre est de développer un modèle continu du moteur BLDC. Donc, notre but est de faire la modélisation mathématique d'une machine synchrone (moteur Brushless).

Enfin, on donne une conclusion des modèles mathématique et les équations électriques et mécanique et la force électromotrice le couple électromagnétique ainsi que des constantes mathématiques d'un moteur Brushless et des moteurs a courant continu.

II. Modèle mathématique du Moteur BLDC :

Les Équations Électriques qui régissent le fonctionnement du moteur BLDC sont données par les équations suivantes.

II.1 Les Équations Électrique :

$$V^{\rightarrow} = [R] I \frac{d\varphi^{\rightarrow}}{dx} \quad \text{II.1}$$

$$\varphi^{\rightarrow} = [L] I + \varphi^{\rightarrow}_M \quad \text{II.2}$$

Où :

V^{\rightarrow}, I et φ^{\rightarrow} sont des vecteurs représentant la tension, le courant et le flux magnétique pour chaque phase respectivement [4].

φ^{\rightarrow}_M : est le vecteur du flux magnétique.

$[R]$ et $[L]$ sont les matrices résistances et inductances de la machine données par les matrices suivantes [4] :

$$R = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \quad \text{II.3}$$

$$L = \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ab} & L_b & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c \end{bmatrix} \quad \text{II.4}$$

Lorsque le moteur est couplé en étoile, les tensions de phase prennent la forme suivante [5] :

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L - M & 0 & 0 \\ 0 & L - M & 0 \\ 0 & 0 & L - M \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} ea \\ eb \\ ec \end{bmatrix} \quad \text{II.5}$$

Les forces électromotrice de la phase a, b et c sont données par les équations suivantes [5]:

$$e_a = K_a \omega_m \cos \theta t \quad \text{II.6}$$

$$e_b = K_b \omega_m \cos \left(\theta t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad \text{II.7}$$

$$e_c = K_c \omega_m \cos \left(\theta t + \frac{2\pi}{3} \right) \quad \text{II.8}$$

II.2 Équation Mécanique :

Le modèle mécanique du moteur BLDC est plus simple que le modèle électrique. En effet, la modélisation de la dynamique du rotor est standard dans le domaine des machines électriques.

La dynamique du rotor est définie par l'équation suivante [5] :

$$J = \frac{d}{dt} \frac{\omega_r}{c_e - c_r - F\omega_r} \quad \text{II.9}$$

ω_r est la vitesse angulaire en *rad/s* ;

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

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

F est le coefficient de frottement en *N. (m/rad). s-1*

En règle générale, le modèle mathématique d'un moteur DC sans balais n'est pas tout à fait différent du moteur à courant continu classique

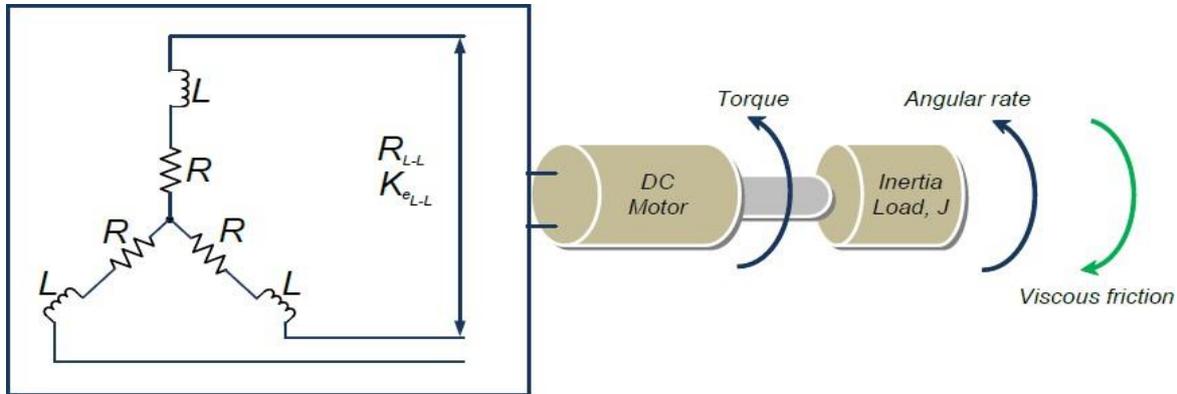


Figure II.1. Schéma d'un moteur Brushless

Cette différence affecte principalement les constantes mécaniques et électriques car ils sont des éléments très importants de paramètres de modélisation.

II.3 Equations mathématiques du moteur Brushless :

II.3.1 Rendement :

Le rapport maximal entre la puissance électrique absorbée et la puissance mécanique fournie par le moteur [5].

$$n_{max} = \left(1 - \sqrt{\frac{I_0 \cdot R}{U_N}}\right)^2 \quad \text{II.10}$$

II.3.2 Vitesse à vide :

C'est la vitesse atteinte par le moteur sans charge après stabilisation et à une température ambiante de 22 °C. Sauf spécification contraire, la tolérance en régime à vide est présumée être de ±12 % [5].

$$n_0 = \frac{U_N \cdot (I_0 \cdot R)}{2\pi \cdot k_M} \quad \text{II.11}$$

II.3.3 Couple de démarrage :

Couple maximum que le moteur peut produire à température ambiante et tension nominale pour une courte durée pendant le démarrage. Cette valeur peut changer du fait des limites actuelles possibles de l'électronique de commande.

Tant le couple à l'arrêt M_H que le couple de démarrage M_A peuvent être calculés approximativement à l'aide de la formule suivante [5] :

$$M_H = M_A = k_M \cdot \frac{U_N}{R} - U_0 \quad \text{II.12}$$

II.3.4 La constante mécanique :

Temps nécessaire au moteur sans charge pour passer de l'arrêt à 63% de la vitesse finale [5].

$$\tau_m = \frac{R \cdot J}{k_M^2} \quad \text{II.13}$$

II.3.5 La Constante de vitesse :

C'est la variation de vitesse par volt appliquée aux bornes du moteur à charge constante [5].

$$k_n = \frac{n_n}{U_N - I_0 \cdot R} = \frac{1}{k_E} \quad \text{II.14}$$

II.3.6 La constante du fore électromotrice :

C'est la constante correspondant à la relation entre la tension induite dans le rotor et la vitesse de rotation [5].

$$k_E = 2\pi \cdot k_M \quad \text{II.15}$$

II.3.7 La Constante de courant :

C'est la constante entre le courant de la bobine du moteur et le couple développé à l'arbre de sortie [5].

$$k_I = \frac{1}{k_M} \quad \text{II.16}$$

II.3.8 Pente de la caractéristique :

C'est le rapport de la variation de la vitesse et de la variation du couple. Plus cette valeur est faible, meilleure est la performance du moteur [5].

$$\frac{\Delta n}{\Delta M} = \frac{R}{k_{M^2}} \cdot \frac{1}{2\pi} \quad \text{II.17}$$

II.3.9 Accélération angulaire :

C'est l'accélération au démarrage sans charge et à la tension nominale [5].

$$\alpha_{max} = \frac{M_H}{J} \quad \text{II.18}$$

II.4 La Force Électromotrice :

La force électromotrice induite est déterminée par la position angulaire de l'aimant, c'est à dire du rotor, il est très important de remarquer que la valeur crête de la FEM est directement proportionnelle à la vitesse angulaire instantanée du rotor [4].

$$E_p = k_e \omega_r \quad \text{II.19}$$

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

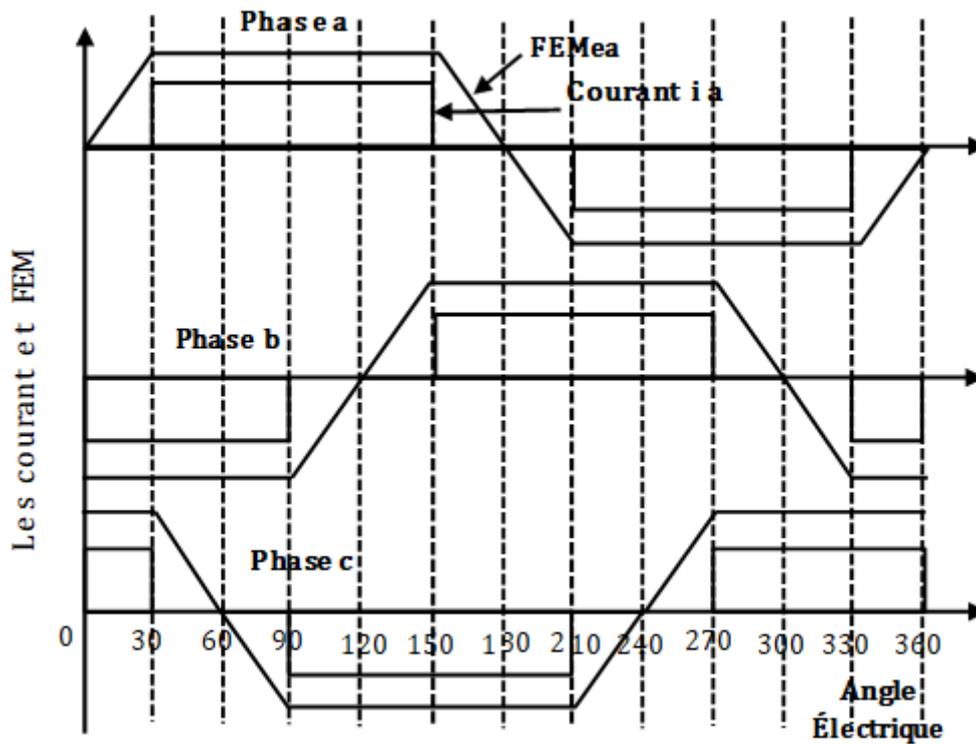


Figure II.2. Formes typiques des courants et des FEMs

II.5 Couple Électromagnétique :

Le couple électromagnétique développé par le moteur BLDC est donné par [4]

$$C_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{J} \quad \text{II.20}$$

III. Modèle de l'ensemble machine commutateur électronique :

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

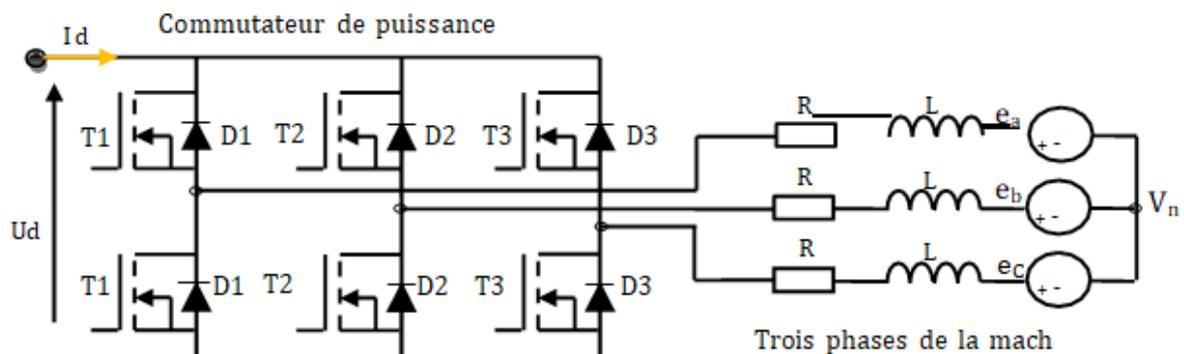


Figure II.3. Ensemble moteur-commutateur

Nous supposons que :

Les trois phases du moteur sont entièrement symétriques et produisent des FEMs induites périodiques de formes trapézoïdales.

Le temps de commutation entre les phases est séparé avec 60° électrique.

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

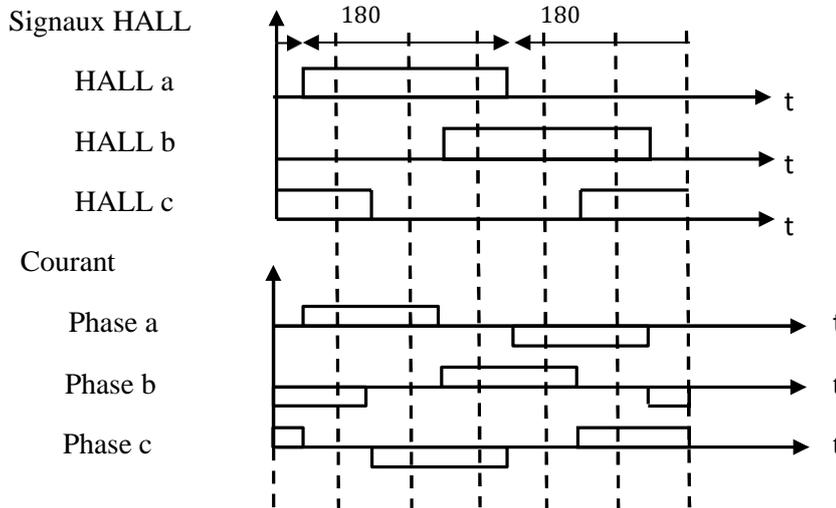


Figure II.4. Signaux à effet hall

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

| (θ) | $FEM\ e_a$ | $FEM\ e_b$ | $FEM\ e_c$ |
|---|--|--|---|
| $(0 \rightarrow \frac{h}{3})$ | $ke\ \omega r$ | $-ke\ \omega r$ | $-(6ke\ \omega r/\pi)\theta + ke\ \omega r$ |
| $(\frac{h}{3} \rightarrow \frac{2h}{3})$ | $ke\ \omega r$ | $(6ke\ \omega r/\pi)\theta - 3E_p$ | $-ke\ \omega r$ |
| $(\frac{2h}{3} \rightarrow \pi)$ | $-(6ke\ \omega r/\pi)\theta + 5ke\ \omega r$ | $ke\ \omega r$ | $-ke\ \omega r$ |
| $(\pi \rightarrow \frac{4h}{3})$ | $-ke\ \omega r$ | $ke\ \omega r$ | $(6ke\ \omega r/\pi)\theta - 7ke\ \omega r$ |
| $(\frac{4h}{3} \rightarrow \frac{5h}{3})$ | $-ke\ \omega r$ | $-(6ke\ \omega r/\pi)\theta + 9ke\ \omega r$ | $ke\ \omega r$ |
| $(\frac{5h}{3} \rightarrow 2\pi)$ | $(6ke\ \omega r/\pi)\theta - 11ke\ \omega r$ | $-ke\ \omega r$ | $ke\ \omega r$ |

IV. Modèle mathématique d'un moteur à courant continu :

Circuit de moteur à courant continu équivalent typique est illustré comme représenté dans le circuit représenté ci-dessous :

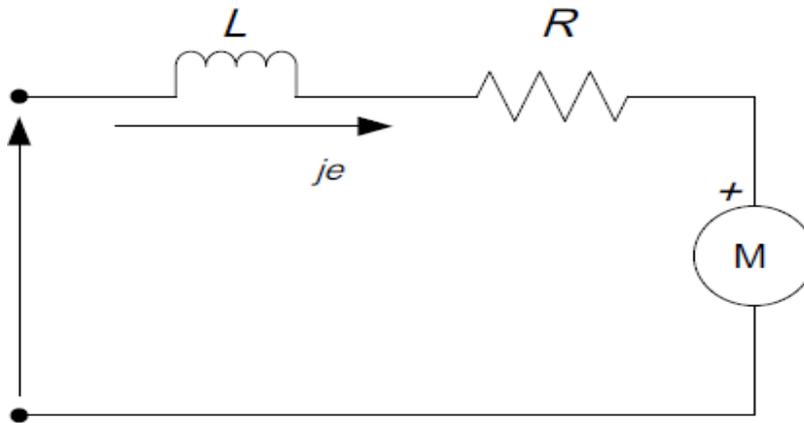


Figure II.5. le circuit électrique du moteur à courant continu

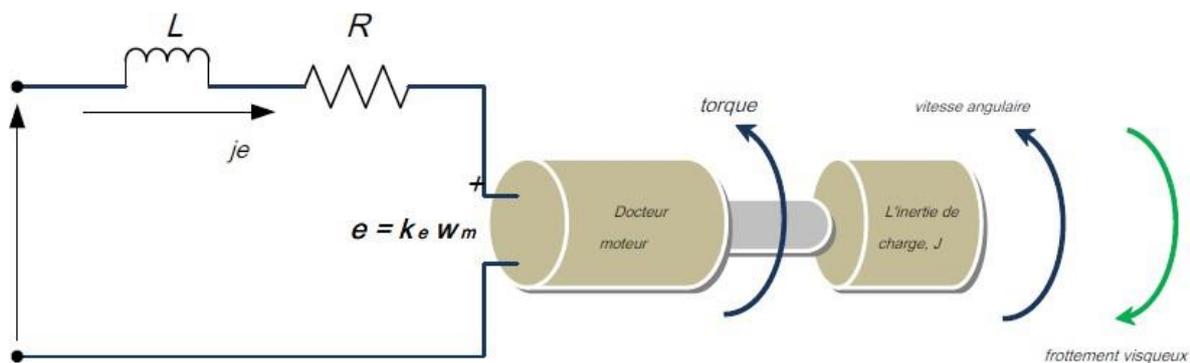


Figure II.6. Montage de système électromécanique du moteur à courant continu.

Le composant de base représentés sont la résistance d'induit, R et l'inductance d'induit L; en outre, il y a la fem arrière, e.

De la **figure II.5** et **figure II.6** ci-dessus, les équations suivantes sont utilisées pour décrire la relation de fonctionnement [4].

$$Ve = Ri + L \frac{di}{dt} + e \tag{II.21}$$

$$Ve = Ri + e$$

$$e = -Ri - L \frac{di}{dt} + V_s \quad \text{II.22}$$

Par conséquent, les équations de réécriture II.2 et II.3, l'équation II.6 et II.7 sont obtenus [4] :

$$J \frac{dW_m}{dt} = \sum T_i \quad \text{II.23}$$

$$T_e = K_f W_m + J \frac{dW_m}{dt} + T_L \quad \text{II.24}$$

$$E = k_e W_m \quad \text{et} \quad T_e = k_f W_m \quad \text{II.25}$$

Pour l'équation :

$$\frac{di}{dt} = -i \frac{R}{L} - \frac{k_e}{L} W_m + \frac{1}{L} V_s \quad \text{II.26}$$

$$\frac{dW_m}{dt} = -i \frac{K_t}{J} - \frac{k_f}{J} W_m + \frac{1}{J} T_L \quad \text{II.27}$$

$$L \left\{ \frac{di}{dt} = -i \frac{R}{L} - \frac{k_e}{L} W_m + \frac{1}{L} V_s \right\} \quad \text{II.28}$$

ceci implique :

$$S i = -i \frac{R}{L} - \frac{k_e}{L} W_m + \frac{1}{L} V_s \quad \text{II.29}$$

$$L \left\{ \frac{dW_m}{dt} = -i \frac{K_t}{J} - \frac{k_f}{J} W_m + \frac{1}{J} T_L \right\} \quad \text{II.30}$$

ceci implique :

$$sW_m = -i \frac{K_t}{J} - \frac{k_f}{J} W_m + \frac{1}{J} T_L \quad \text{II.31}$$

à ne pas charger (TL = 0): équation II.11 devient:

$$sW_m = -i \frac{K_t}{J} - \frac{k_f}{J} W_m + \frac{1}{J} T_L \quad \text{II.32}$$

De l'équation II.12, i est fait l'objet d'un substitut dans l'équation II.9 :

$$i = \frac{sW_m + \frac{k_f}{J} W_m}{\frac{K_t}{J}} \quad \text{II.33}$$

$$\left(\frac{sW_m + \frac{k_f}{J} W_m}{\frac{K_t}{J}} \right) \left(s + \frac{R}{L} \right) = -\frac{k_e}{L} W_m + \frac{1}{L} V_s \quad \text{II.34}$$

L'équation II.14 devient:

$$\left\{ \left(\frac{s^2 J}{K_t} + \frac{SKF}{K_t} + \frac{SRJ}{K_t L} + \frac{KFR}{K_t L} \right) + \frac{Ke}{L} \right\} W_m = \frac{1}{L} V_s \quad \text{II.35}$$

$$V_s = \left\{ \frac{s^2 J L + s K F L + s R J + K F R + K e K t}{K t} \right\} W_m \quad \text{II.36}$$

$$G(s) = \frac{W_m}{V_s} = \frac{K t}{s^2 J L + s K F L + s R J + K F R + K e K t} \quad \text{II.37}$$

$$G(s) = \frac{W_m}{V_s} = \frac{K t}{s^2 J L + s (K F L + R J) + K F R + K e K t} \quad \text{II.38}$$

La constante de frottement est faible, c'est-à-dire f tend vers 0, ce qui implique que;

- $R_J \gg K_f L$, et
- $K_e K_t \gg R K_f$

Et les remises à zéro des valeurs négligeables, la fonction de transfert est finalement s'écrire :

$$G(s) = \frac{W_m}{V_s} = \frac{K_t}{s^2 J L + R J s + K_e K_t} \quad \text{II.39}$$

Donc, en réarrangement et de manipulation mathématique sur "JL", en multipliant haut et en bas de l'équation II.39 par:

$$\frac{R}{K_e K_t} \times \frac{1}{R}$$

Equation II.40 est obtenu après la manipulation :

$$G(s) = \frac{\frac{1}{K_s}}{\frac{R J}{K_e K_t} \times \frac{L}{R} \times s^2 + \frac{R J}{K_e K_t} \times s + 1} \quad \text{II.40}$$

De l'équation II.13, les constantes suivantes sont acquis, La mécanique (constante de temps) :

$$\tau_m = \frac{R J}{K_e K_t} \quad \text{II.41}$$

$$\tau_e = \frac{L}{R} \quad \text{II.42}$$

$$G(s) = \frac{\frac{1}{K_s}}{\frac{R J}{K_e K_t} \times \frac{L}{R} \times s^2 + \frac{R J}{K_e K_t} \times s + 1} \quad \text{II.43}$$

V_s = la tension de la source à courant continu i = le courant d'induit

T_e = le couple électrique

k_f = la constante de frottement

J = l'inertie du rotor

ω_m = la vitesse angulaire

T_L = la charge mécanique supposée

k_e = the back emf constant

K_t = la constante de couple

$U(t)$: la tension d'alimentation

R : la résistance de l'enroulement

L : l'inductance de l'enroulement

$i(t)$: le courant passant à travers l'enroulement ω : la vitesse angulaire du moteur

K_w : la constante "contre électromotrice" exprimée en V / RPM

$e(t)$: la force contre électromotrice

V. Conclusion :

Dans ce chapitre on a parlé de modélisation du moteur Brushless, ainsi que la modélisation du moteur a courant continu qui est la base du moteur Brushless.

On a mentionné les fonctions électrique et mécanique ainsi que les la force electrometrice et le couple électromagnetique ainsi que des constantes mathématiques du moteur Brushless.

I. Introduction :

Dans ce chapitre on va présenter l'onduleur triphasé dans lequel on va parler des onduleurs parmi ces onduleur on onduleurs triphasé qui va se contrôlé par la méthode MLI. Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné en la convertissant. Les premiers convertisseurs de puissance électrique ont été réalisés avec des machines électriques couplées mécaniquement. Avec l'apparition des semi-conducteurs et de l'électronique de puissance, avec les diodes, les transistors, thyristors etc. Les systèmes de conversion deviennent de plus en plus élaborés et ne nécessitent plus de machines tournantes. C'est l'ère des convertisseurs statiques.

On distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques :

Continu > Continu (Hacheur)

Continu > Alternatif (Onduleur)

Alternatif > Alternatif (Gradateur)

Alternatif > Continu (Redresseur)

La conversion continue –alternative est assurée par l'onduleur qui permet d'obtenir une tension alternative à partir d'une source de tension continue. Pour cela, ce premier chapitre présente la modélisation mathématique de l'onduleur triphasé de tension.

Les onduleurs de tension peuvent être pilotés suivant plusieurs stratégies. A faibles fréquences, ils sont pilotés à pleine onde, le signal de commande sera à la fréquence de la tension désirée à la sortie, et la source continue doit être réglable (à l'aide d'un redresseur à thyristor ou d'un hacheur).

A fréquence élevée, ils sont pilotés en modulation de largeur d'impulsion. Cette dernière stratégie permet de régler à la fois l'amplitude et la fréquence en gardant la source continue constante (pont à diode).

II. Définition:

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue – alternative, alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir l'alternatif à la sortie. L'onduleur est essentiellement utilisé pour fournir une tension ou un courant alternatif afin d'assurer l'alimentation en énergie des charges critiques (micro-ordinateur, station de télécommunication.) pendant la coupure du réseau électrique ou une alimentation permanente pour les systèmes autonomes (centrales photovoltaïques, engins aérospatiaux). La représentation symbolique d'un onduleur est donnée par la suivante **figure III.1** [3].

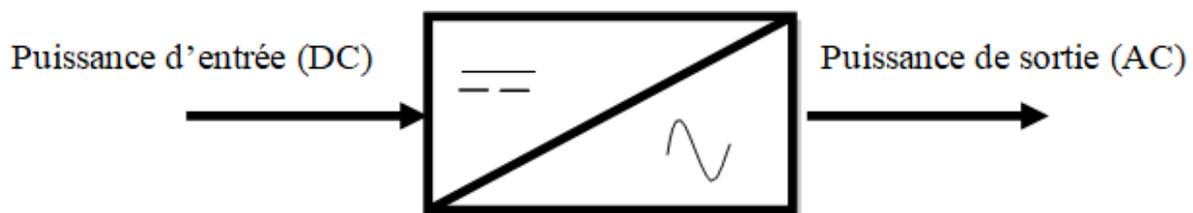


Figure III.1. Schéma de principe de l'onduleur

II.1 Classification des onduleurs:

Le stator est constitué de bobines d'excitation qui sont généralement au nombre de 3 ou de 6. Celles-ci sont le plus souvent connectées en étoile, mais elles peuvent également être connectées en triangle.

Une première classification peut être faite en distinguant : onduleurs non autonome et onduleur autonome.

Entre ces deux types d'onduleurs, il existe un type intermédiaire d'onduleur appelé onduleur à commutation par la charge « ou encore onduleur à résonance » [3]

II.1.1 Onduleurs non autonomes :

Un onduleur est dit non autonome si l'énergie nécessaire pour la commutation des thyristors est fournie par le réseau alternatif qui est donc un réseau actif. C'est le cas du fonctionnement en onduleur des redresseurs. La fréquence et la forme d'onde de la tension sont imposées par le réseau alternatif.

II.1.2 Onduleurs autonomes :

Un onduleur autonome est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif. Alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie.

Un onduleur autonome dépend essentiellement de la nature du générateur et du récepteur entre lesquels il est monté cela conduit à distinguer :

II.1.2.1 Onduleurs (autonomes) de tension :

Un onduleur de tension est un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue (source d'impédance interne négligeable), la tension « u » n'est pas affecté par les variations du courant « i » qui la traverse, la source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie.

Le courant à la sortie « i' » et donc le courant à l'entrée « i » dépendent de la charge placée du côté alternatif. Cette charge peut être quelconque à la seule condition qu'il ne s'agisse pas d'une autre source de tension (capacité ou f.e.m alternative) directement branchée entre les bornes de sortie.

II.1.2.2 Onduleurs (autonomes) du courant :

Un onduleur de courant (souvent appelé commutateur de courant) est alimenté par une source de courant continu, c'est -à - dire par une source d'inductance interne si grande que le courant « i » qui la traverse ne peut être affecté par les variations de la tension « u » à ses bornes.

II.1.2.3 Onduleurs à résonance :

Les onduleurs à résonance sont des onduleurs de tension ou de courant à un créneau par alternance fonctionnant dans des conditions particulières. La charge doit être un circuit oscillant peu amorti. On commande les interrupteurs par une fréquence voisine de la fréquence de résonance de la charge. Si celle-ci varie, il faut faire varier la fréquence de commande. L'onduleur doit donc être piloté par la charge, il n'est plus autonome.

II.2 Types d'onduleurs autonomes de tension :

II.2.1 Les onduleurs mono phasés :

Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue en utilisant deux interrupteurs, il faut un point milieu, soit du côté de la sortie alternative, soit du côté de l'entrée continue, cela correspond à :

- L'onduleur monophasé avec transformateur de sortie à point milieu appelé onduleur push- pull.
- L'onduleur monophasé avec diviseur capacitif à l'entrée appelé onduleur en demi pont.

Si on veut varier la largeur relative des créneaux formant les alternances de la tension de sortie, il faut quatre interrupteurs c'est : l'onduleur monophasé en pont **figure (III.2).**

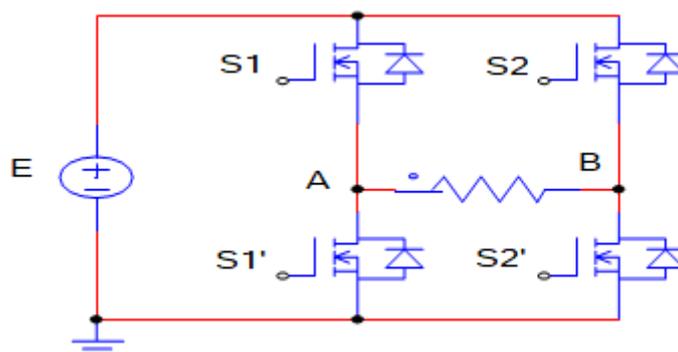


Figure III.2. Schéma de principe de l'onduleur monophasé

II.1.1 Les onduleurs triphasés :

L'onduleur de tension triphasé découle immédiatement de trois demi pont monophasé, on obtient l'onduleur triphasé à six interrupteurs [3].

Chaque demi pont comprend un thyristor (ou un transistor) et une diode. La source de tension continue est obtenue à partir d'un pont redresseur.

Pour assurer la continuité des courants de sortie alternatif I_a , I_b , I_c , les interrupteurs S_1 , S_1' et S_2 , S_2' , S_3 et S_3' doivent être complémentaires deux à deux.

On définit $S_i = (T_i, D_i)$ [4].

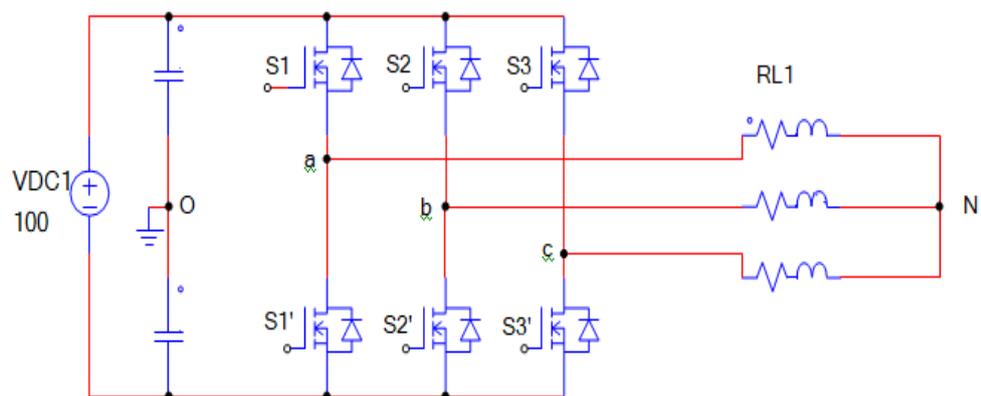


Figure III.3. Schéma d'onduleur de tension triphasé

II.3 Principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé :

La représentation schématique de l'onduleur est fournie par la (figure I.3) Pour assurer la continuité des courants de sortie alternatif I_a , I_b et I_c , les interrupteur S_1 et S_1' , S_2 et S_2' , S_3 et S_3' doivent être complémentaire deux à deux, et pour que les tensions de sortie V_a , V_b et V_c soient identiques à un tiers de la période T de leur fondamental prés, il faut commander chaque demi pont avec un retard de $T/3$ sur le précédent. En commande pleine onde on ferme donc :

- S_1 pour $\omega t = 0$ et S_1' pour $\omega t = \pi$.
- S_2 pour $\omega t = 2\pi/3$ et S_2' pour $\omega t = \pi + 2\pi/3$
- S_3 pour $\omega t = 4\pi/3$ et S_3' pour $\omega t = \pi + 4\pi/3$

La présence du neutre relié à la source est indispensable si le récepteur est déséquilibré et tout particulièrement s'il comporte des charges monophasées montées entre phase et neutre. Si le récepteur triphasé est équilibré (moteur triphasé par exemple) on peut supprimer la liaison entre le point neutre « N » et le point milieu « 0 » du la source, Donc supprimer celui- ci, on obtient alors l'onduleur triphasé proprement dit [3] [6].

II.1 Domaines d'application :

Les onduleurs ont été conçus essentiellement pour fonctionner dans les domaines d'applications suivants:

- Les alimentations sans interruption (ASI) : Certaines applications sensibles (secteur pétrolier, hôpitaux, serveurs informatiques...) ne peuvent supporter la moindre panne d'alimentation.
- Pour réaliser une alimentation sécurisée, on a la même structure que précédemment avec des batteries sur le bus continu, ce qui permet de continuer à fournir de l'énergie et donc une tension sinusoïdale le temps qu'un groupe électrogène prenne le relais. (Rq : onduleurs plus souvent en monophasé).

- En pratique, les onduleurs actuels (pour ASI ou variateurs) sont pilotés par des algorithmes très compliqués (contrôle vectoriel de flux) et surtout comporte des fonctionnalités annexes support de plusieurs protocoles de communication • pilotage par PC déporté paramétrage différent suivant la charge ...

Rq : l'onduleur seul peut fonctionner dans les quatre quadrants (à condition de mettre en anti parallèle des diodes sur les transistors), mais souvent le bus continu est alimenté par un pont redresseur triphasé à diode qui lui n'est pas réversible en courant.

- La variation de la vitesse : Comme nous l'avons vu sur les cours sur les MAS et machines synchrones, la façon la plus efficace de régler la vitesse de ces machines et d'agir sur la fréquence de leur tension d'alimentation. Pour répondre à ce besoin, on conçoit donc un redresseur triphasé qui fournit une tension continue et on place un onduleur à la suite qui crée le réseau de tension triphasé sinusoïdal à une l'amplitude et à la fréquence permettant le fonctionnement désiré.
- Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes
- Alimentation de sureté : pour contrarier les microcoupures ou les tensions parasites dans le système informatique.

III. Techniques de commande de l'onduleur detension triphasé :

III.1 La Commande MLI :

III.1.1 Différentes techniques de modulation de longueur d'impulsions (MLI) :

Plusieurs techniques de modulations ont été adoptées afin d'améliorer la qualité de la tension à la sortie de l'onduleur, parmi lesquelles on peut citer [3] :

III.1.1.1 La modulation linéaire multiple (UPWM) :

Dans cette technique on compare une porteuse triangulaire avec un signal de référence linéaire.

L'onde de sortie est sous la forme d'un train d'impulsion en créneaux de largeurs égales (**Figure III.4**). Si l'indice de modulation est égal à un, on obtient la modulation singulière, dans laquelle le signal de sortie est formé d'une seule impulsion par demi-période.

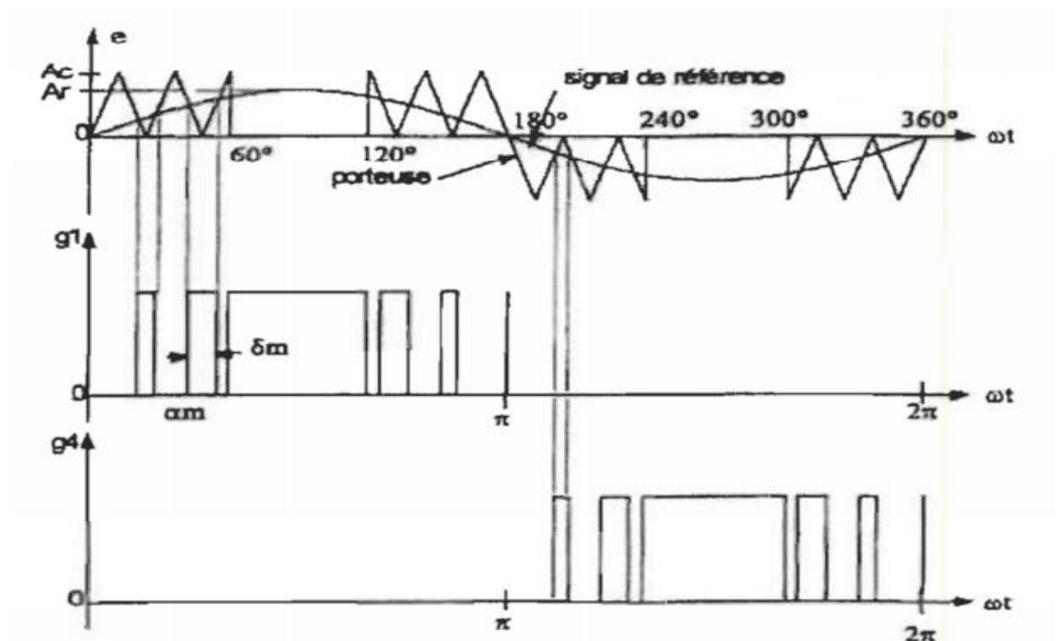


Figure III.4. La modulation de largeur d'impulsions multiples

III.1.1.2 La modulation sinusoidale triangulaire unipolaire (SPWM) :

Dans ce cas, le signal de référence est sinusoïdal, on obtient à la sortie de l'onduleur une onde formée d'un train d'impulsion de largeur variable (**Figure III.5**). Les instants de commutations sont déterminés par des points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. Ce type de MLI est la plus utilisée dans les applications industrielles, car elle s'est avérée la plus efficace pour la neutralisation des harmoniques.

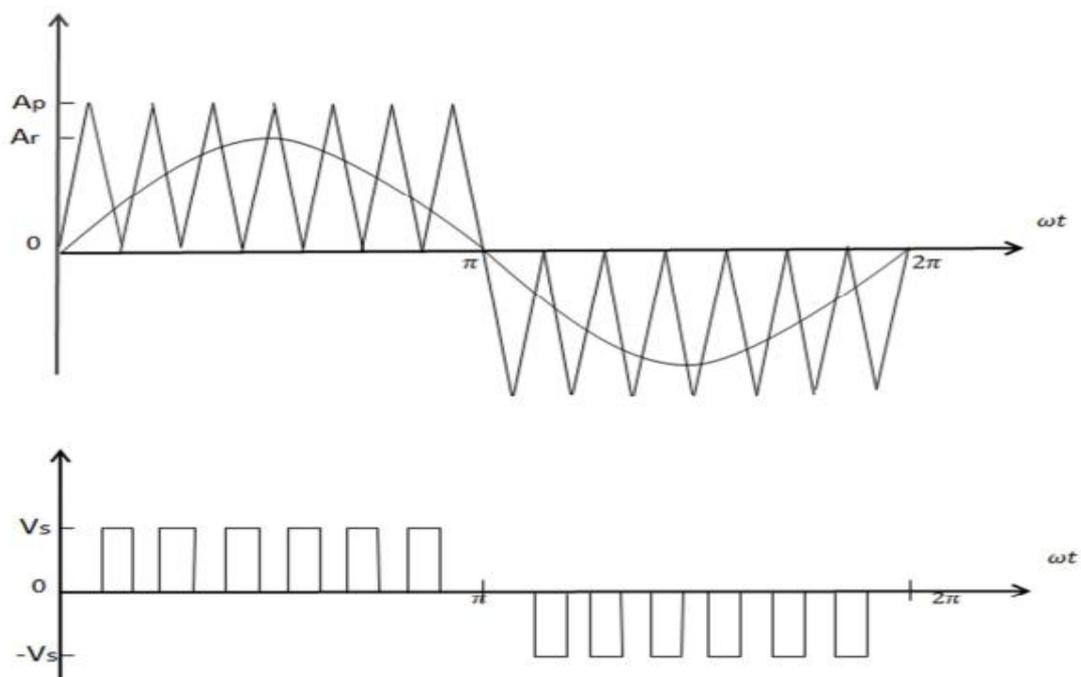


Figure III.5. MLI sinusoidale triangulaire unipolaire

III.1.1.3 La modulation sinusoidale partielle (ou modifiée) (MSPWM) :

Le signal référence est toujours sinusoïdal, sauf que dans cette technique la porteuse n'est pas appliquée au milieu des alternances de la sinusoïde (**Figure III.6**).

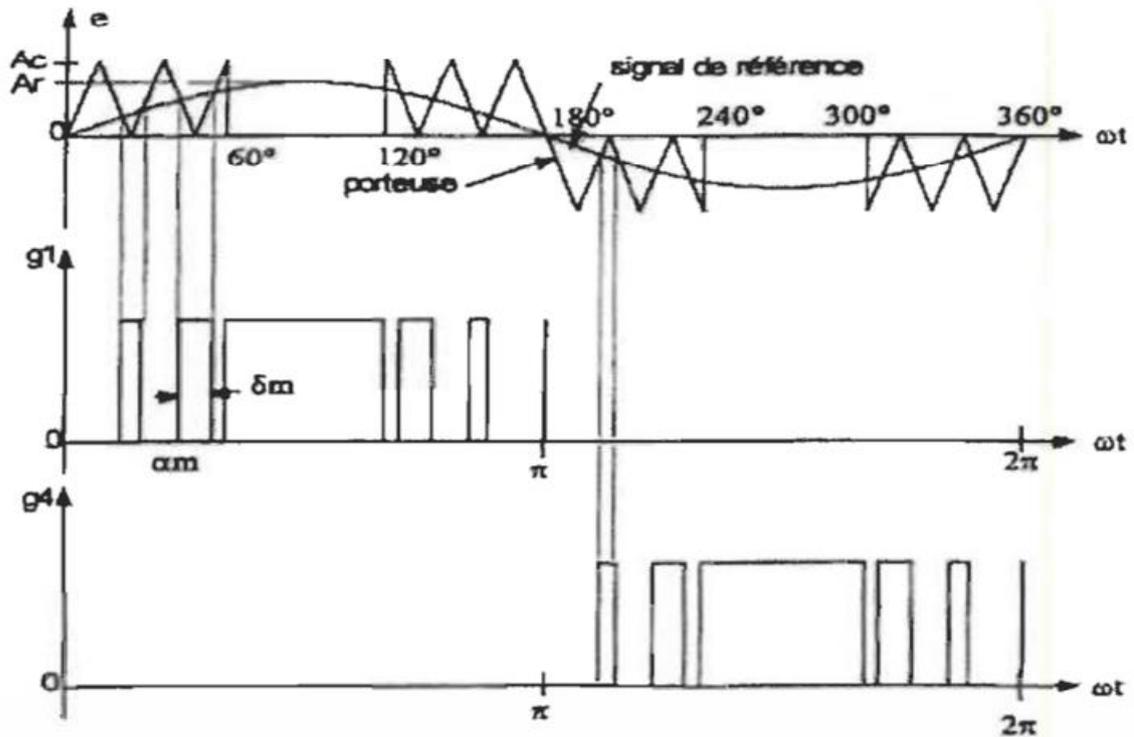


Figure III.6. La modulation sinusoidale modifiée

III.1.1.4 L'injection d'un harmonique 3 dans la référence :

En triphasé, on peut améliorer les performances de la modulation en utilisant cette technique qui consiste à ajouter l'harmonique 3 à la sinusoïde de fréquence « f » pour former l'onde de référence (**Figure III.7**).

L'addition d'harmonique permet d'augmenter l'amplitude maximale du fondamental dans la référence, et par là dans les tensions de sortie.

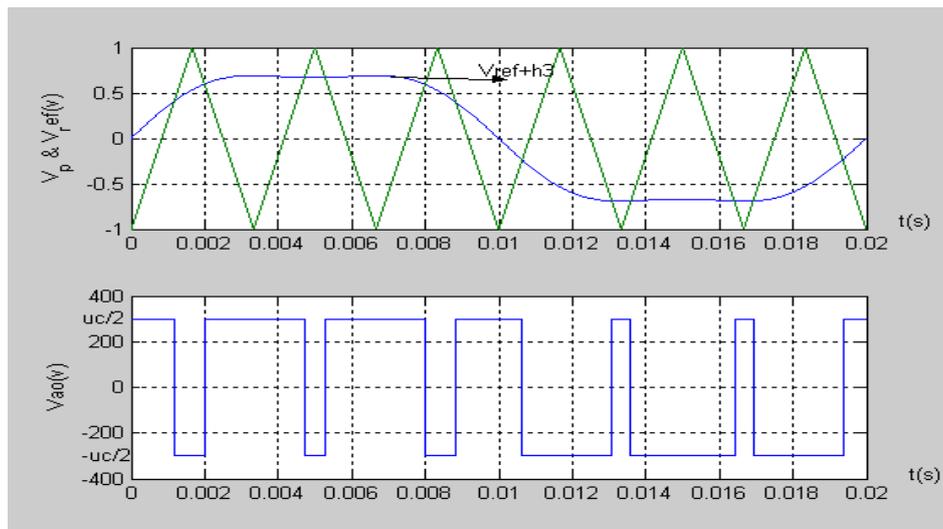


Figure III.7 MLI avec l'injection de l'harmonique 3

III.1.1.5 La modulation calculée :

Cette technique de MLI consiste à calculer les instants de commutation des interrupteurs de manière à répondre à certains critères portant sur le spectre fréquentiel de l'onde délivrée par l'onduleur. Les critères usuellement retenus sont :

- élimination d'harmoniques de rangs spécifiés.
- élimination d'harmoniques dans une bande spécifiée.
- minimisation d'un critère harmonique global.

III.1.1.6 La modulation vectorielle :

La MLI vectorielle est la méthode récemment la mieux adaptée au contrôle des moteurs asynchrones. Contrairement à d'autres méthodes, la MLI vectorielle ne s'appuie pas sur des calculs séparés des modulations pour chacun des bras de l'onduleur.

III.1.1.7 Commande MLI triangle- sinusoidales :

Le principe de base de la modulation de largeur d'impulsion est sur le découpage d'une pleine onde rectangulaire. Ainsi la tension de sortie de l'onduleur est formée par une succession de créneaux d'amplitude égale à la tension d'alimentation (continue) et de largeur variable. La technique la plus répandue pour la reproduction d'un signal MLI est de comparer un signal triangulaire appelé porteuse de haute fréquence à un signal de référence appelé modulatrice et qui constitue l'énergie du signal recueil à la sortie de l'onduleur, **figure III.8.**

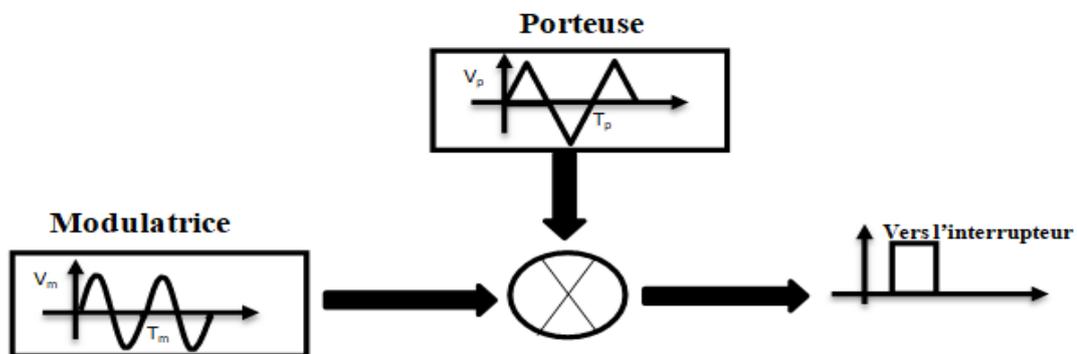


Figure III.8. Schéma de base MLI

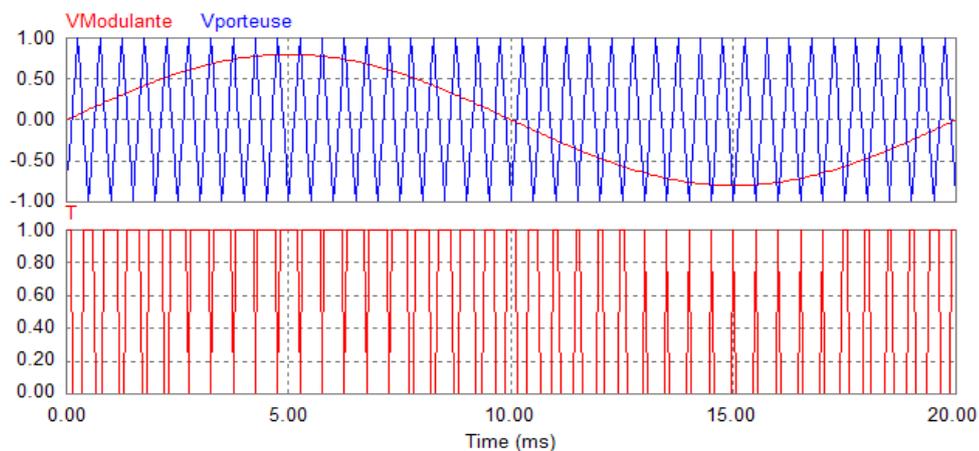


Figure III.9. La modulation triangle-sinusoidale

III.1.2 Caractéristiques de la modulation :

La technique de la **MLI** se caractérise par deux grandeurs :

- **Le coefficient de réglage :** qui est défini comme étant le rapport de l'amplitude de l'onde modulante à celle de l'onde porteuse. Il permet de déterminer l'amplitude du fondamental de l'onde de modulation de largeur d'impulsion [6]

$$r = \frac{V_m}{V_a} \quad \text{III.1}$$

- **L'indice de modulation :** Il est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse à celle de l'onde modulante [6]

$$m = \frac{f_p}{f_m} \quad \text{III.2}$$

III.1.3 Principe de base :

La modulation de largeur d'impulsion sinus triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante, la fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. En triphasé, trois références sinusoïdale déphasées de $2\pi/3$ à la même fréquence f_s . Comme la sortie de l'onduleur de tension n'est pas purement sinusoïdale, l'intensité de courant ne l'est pas aussi, donc elle comporte des harmoniques, seuls responsables des parasites (pulsation de couple électromagnétique) ce qui engendre des pertes supplémentaires.

Le principe de cette stratégie peut être résumé par l'algorithme suivant :

$$V_m > V_p \rightarrow S(t) = 1 \text{ sinon } S(t) = 0$$

III.3

Avec :

V_m : la tension référence.

V_p : la tension porteuse.

$S(t)$: est le signal MLI résultant.

III.1.4 Schéma de bloc :

Le schéma fonctionnel de la **figure III.10**. Montre le principe de la commande triangulons-sinusoïdale MLI :

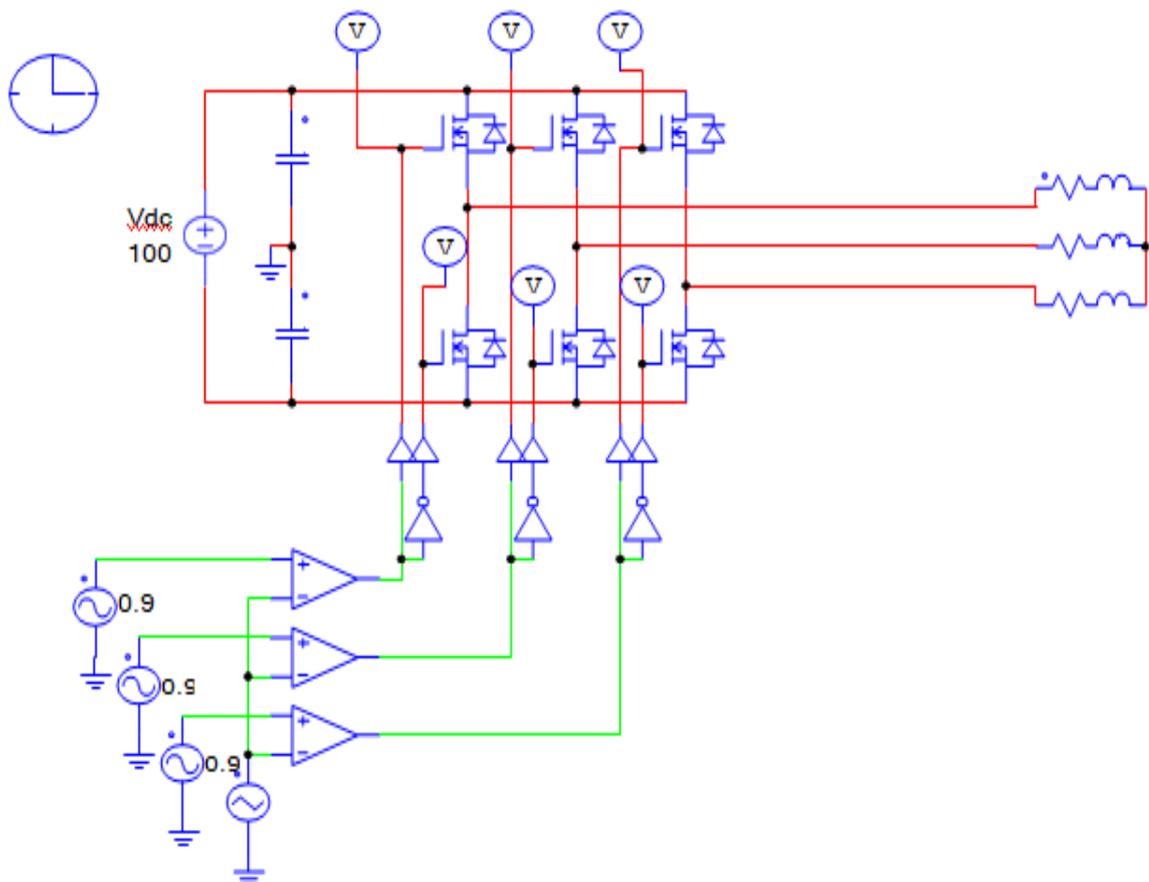


Figure III.10. Schéma fonctionnel de la commande MLI

IV. Régulation

La régulation permet de maintenir la vitesse de rotation du moteur constante conformément à la consigne et indépendamment des perturbations.

Cette régulation se fait en boucle fermée, c'est-à-dire que le système dispose d'informations sur la vitesse du moteur grâce au circuit de détection de passage par zéro et au module de retour d'information du microcontrôleur. La fonction de la régulation est de déterminer l'erreur entre la vitesse du moteur et la vitesse de référence et d'agir en conséquence pour diminuer cette erreur. Cette diminution se fait grâce à l'aide d'un correcteur (proportionnel, intégrateur, dérivé, etc.).

La régulation ne se fera qu'à partir du moment où la consigne d'entrée et le régime du moteur sont approximativement constants. En effet, si ces deux conditions ne sont pas respectées, on risque de modifier la consigne d'entrée d'un écart tel que l'inertie du rotor ne lui permet pas de suivre le champ magnétique tournant et un décrochage se produira.

Le choix du correcteur à mettre en œuvre se fait de manière graphique grâce à la représentation de la fonction de transfert du moteur [2].

IV.1 Modélisation du moteur :

Le moteur, principalement constitué d'un aimant permanent pour le rotor et le stator, peut être représenté par une résistance et une inductance en série. La figure 3 représente de manière simplifiée le schéma électrique équivalent du moteur.

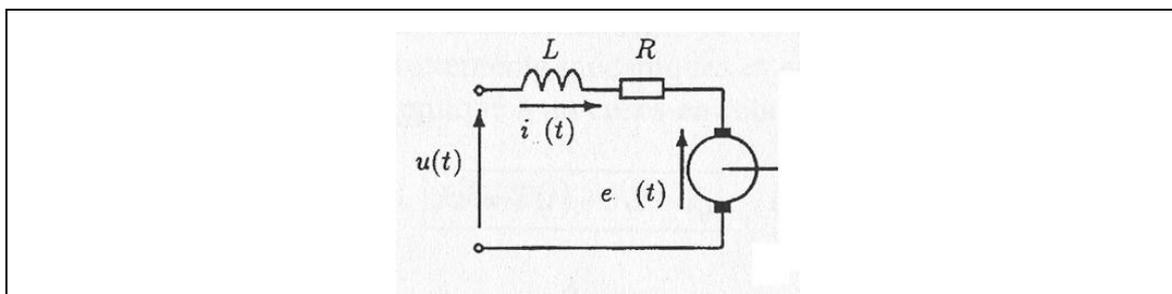


Figure III.11. Schéma du moteur

Les équations électriques sont :

$$E(t) = k_w \cdot (\omega t) \quad \text{III.4}$$

$$U(t) = r \cdot I(t) + l \frac{dI}{dt}(t) + E(t) \quad \text{III.5}$$

Où :

U(t) : la tension d'alimentation.

R : la résistance de l'enroulement.

L : l'inductance de l'enroulement.

I(t) : le courant passant à travers l'enroulement.

ω : la vitesse angulaire du moteur.

E(t) : la force contre électromotrice

K_w : la constante "contre électromotrice" exprimée en V / RPM

Les équations mécaniques sont :

$$J\theta = T(t) - b \cdot \theta - T_d \quad \text{III.6}$$

$$T(t) = k_t \cdot I(t) \quad \text{III.7}$$

Où :

J : le moment d'inertie ramené sur l'arbre du moteur

b : les frottements proportionnels du moteur

T_d : le couple résistant

T(t) : le couple produit

$\theta = \omega$

Ces équations exprimées dans la variable de Laplace permettent de tracer le schéma bloc du moteur et ainsi d'établir sa fonction de transfert comme illustré à la figure III.12.

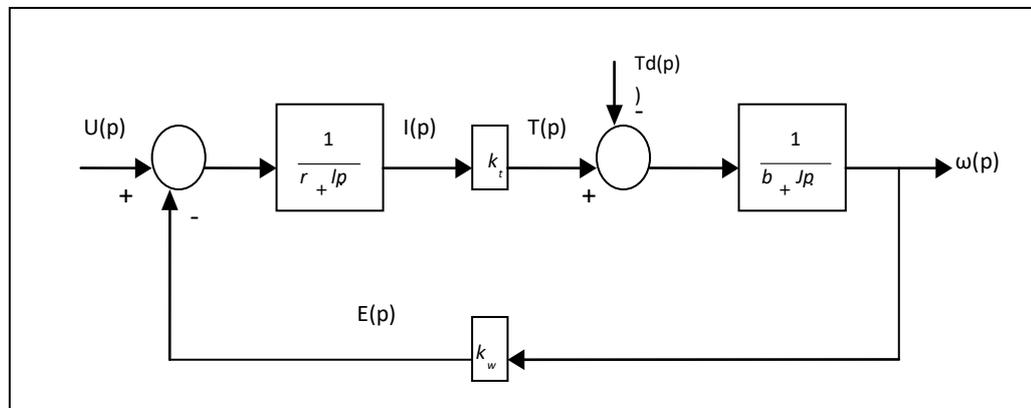


Figure III.12. Schéma bloc du moteur

En négligeant le couple résistant, la fonction de transfert en boucle fermée devient :

$$H(p) = \frac{\omega(p)}{U(p)} = \frac{k_t \cdot k_w}{k_t \cdot k_w + (r + p \cdot l) \cdot (b + p \cdot J)} = \frac{\frac{k_t \cdot k_w}{(k_t \cdot k_w + r \cdot b)}}{1 + \frac{(r \cdot J + b \cdot l)}{(k_t \cdot k_w + r \cdot b)} \cdot p + l \cdot J \cdot p^2} \quad \text{III.8}$$

En connaissant le schéma bloc du moteur, nous pouvons alors dessiner le schéma bloc complet de la régulation du moteur en assimilant la tension de sortie du générateur PWM à sa valeur moyenne, comme représenté à la **Figure III.13**.

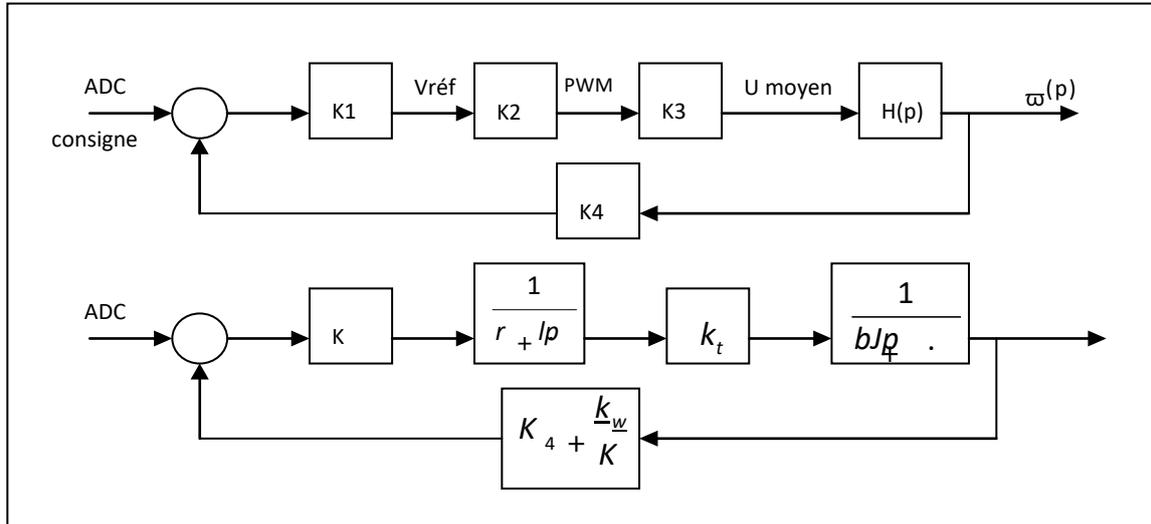


Figure III.13. Schéma bloc complet de la régulation

Avec

K1 : conversion de la consigne d'entrée en vitesse de référence.

K2 : conversion de la vitesse de référence en signal modulé en largeur d'impulsion.

K3 : conversion du signal modulé en largeur d'impulsion en tension moyenne.

Et la fonction de transfert en boucle ouverte devient alors :

$$G(p) = \frac{k_t \cdot k_w \cdot (k_4 + \frac{k_w}{k})}{(r+p.l) \cdot (b+p.J)} = \frac{k_t \cdot k_w \cdot (k_4 + \frac{k_w}{k})}{1 + \frac{(r.J+b.l)}{r.b} \cdot p + \frac{J.l}{r.b} \cdot p^2} \quad \text{III.9}$$

IV.2 Choix du correcteur et détermination des coefficients

En connaissant les caractéristiques du moteur utilisé, la fonction de transfert du système en boucle ouverte peut être représentée par le diagramme de Black-Nichols, comme indiqué à la **Figure III.14**. Ce diagramme nous informe sur la phase en degrés en abscisse et le module en décibels en ordonnée.

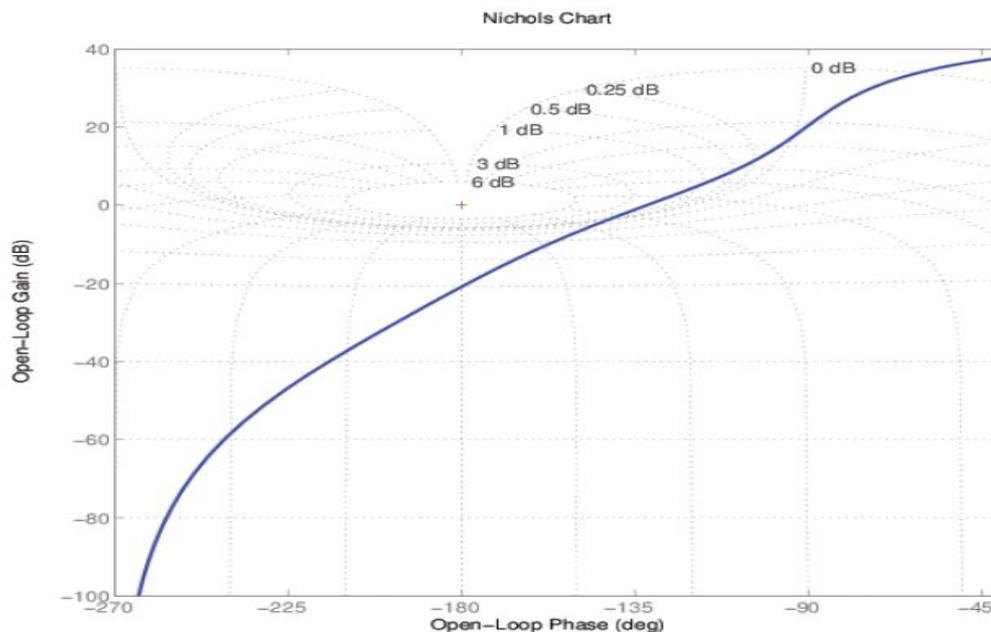


Figure III.14. Diagramme de Black-Nichols de la fonction de transfert

Etant donné le diagramme de la fonction de transfert, un correcteur dérivé n'apporterait pas énormément de changement à la fonction de transfert. Le correcteur utilisé sera donc du type proportionnel intégrateur.

Le correcteur proportionnel intégrateur

$$s = k_p \cdot e + k_i \cdot \int_0^t e \cdot dt \quad \text{III.10}$$

Peut s'exprimer par sa fonction de transfert en variable de Laplace :

$$C(p) = k_p \frac{1+p \cdot \tau_i}{p \cdot \tau_i} \quad \text{III.11}$$

En régime statique, le terme intégral permet d'annuler l'erreur, tandis qu'en régime dynamique, le terme intégral augmente le temps de réponse (système moins rapide) et augmente l'instabilité. Ces inconvénients sont éliminés grâce à la partie proportionnelle du correcteur proportionnel intégrateur.

V. Conclusion ;

Dans ce chapitre, on a parlé des différents types d'onduleur et on a basé sur l'onduleur triphasé ainsi qu'on a montré que la technique de commande de l'onduleur triphasé est la technique de modulation de largeur d'impulsion MLI qui nous permet de nous donner les meilleurs résultats ainsi que l'utilisation de la technique PI dans la régulation.

I. Introduction :

Ce chapitre parle de l'logiciel PSIM qu'on va le présenter ainsi que son utilisation sur la simulation qui cerne a commandé la vitesse du moteur Brushless par la commande MLI au niveau de l'onduleur triphasé.

On présente le résultat de simulation par des graphes des expériences sur le démarrage du moteur par à vide et au charge et performance et on déduit l'efficacité de la commande MLI au niveau de ce dernier moteur.

On atteint notre objectif qui est le contrôle MLI de vitesse pour un moteur Brushless DC et la performance de cette commande.

II. Logiciel PSIM :

PSIM est un logiciel de simulation pour l'électrotechnique et l'électronique de puissance.

Le logiciel permet de dessiner le schéma du montage, à partir des éléments de la bibliothèque (machines, transformateurs, interrupteurs électroniques, éléments de commande et de contrôle...).

Les appareils de mesure disposés sur le schéma de montage définissent les courbes représentatives des grandeurs électriques et mécaniques que l'on peut obtenir après simulation.

III. Simulation

III.1 Simulation démarrage à vide :

Figure IV.1 représente le schéma de la simulation de vitesse du moteur Brushless par commande MLI au niveau de l'onduleur triphasé et la régulation PI.

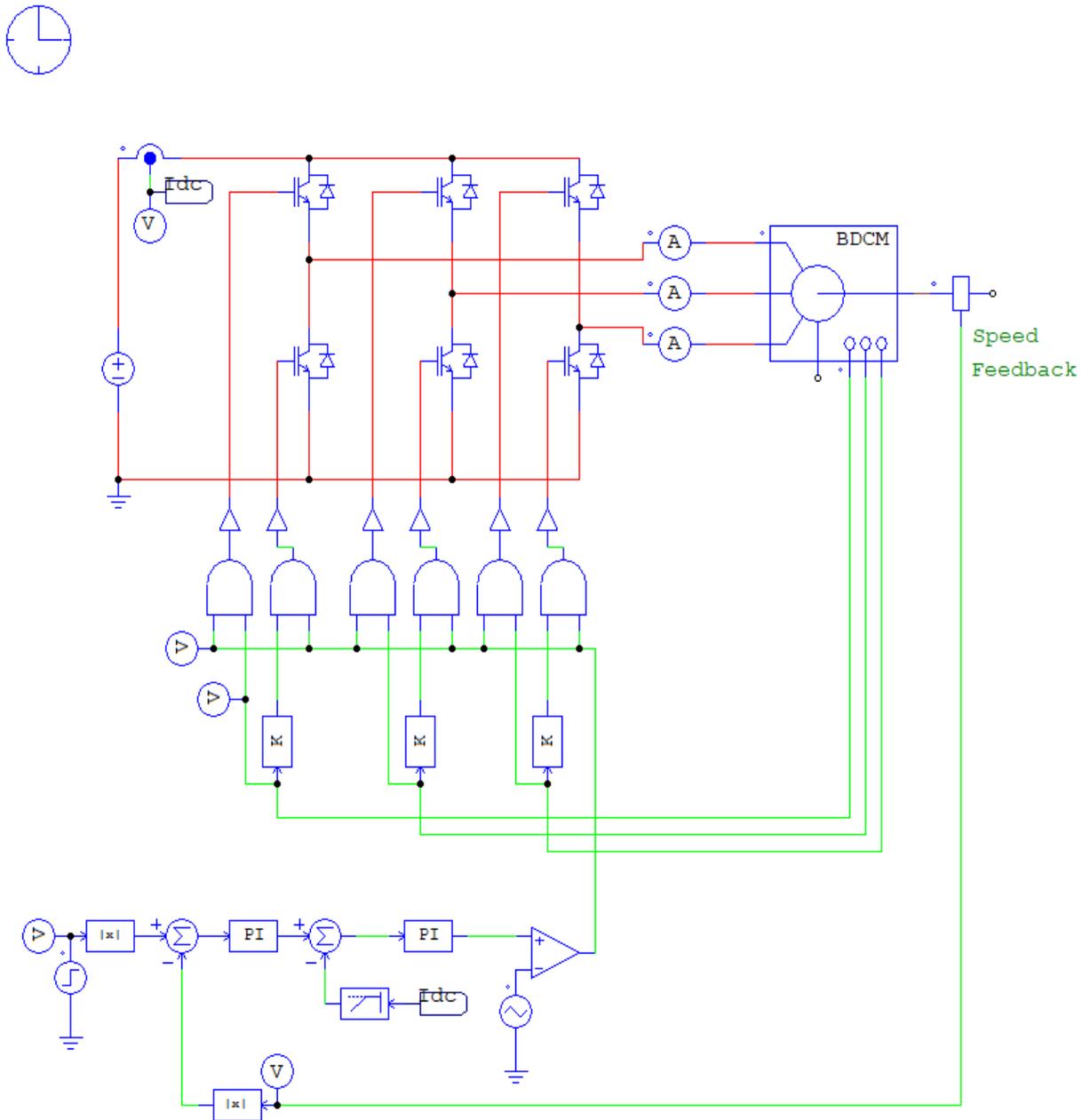


Figure IV.1. Schéma de la simulation contrôle vitesse BLDC

III.2 Résultat de simulation démarrage à vide :

La figure suivante représente le résultat de simulation au démarrage du moteur à vide.

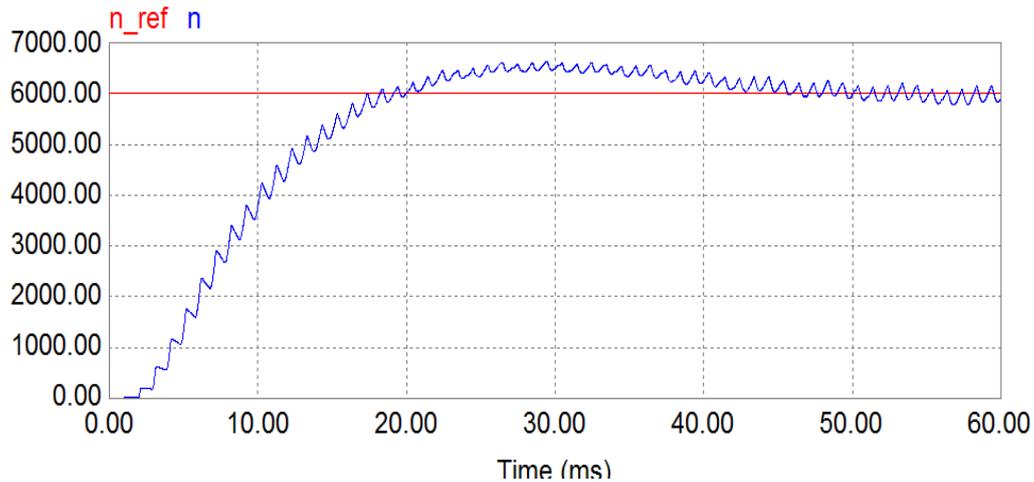


Figure IV.2. Résultat de la simulation contrôle vitesse BLDC à vide

- Interprétation :

La **Figure IV.2** représente la courbe de vitesse qu'on remarque qu'elle suit la référence avec un régulateur PI après un temps constant de temps de **20 ms**.

III.3 Simulation démarrage avec la charge :

Figure IV.3 représente le schéma de la simulation de vitesse du moteur Brushless par commande MLI au niveau de l'onduleur triphasé et la régulation PI avec la présence de la charge.

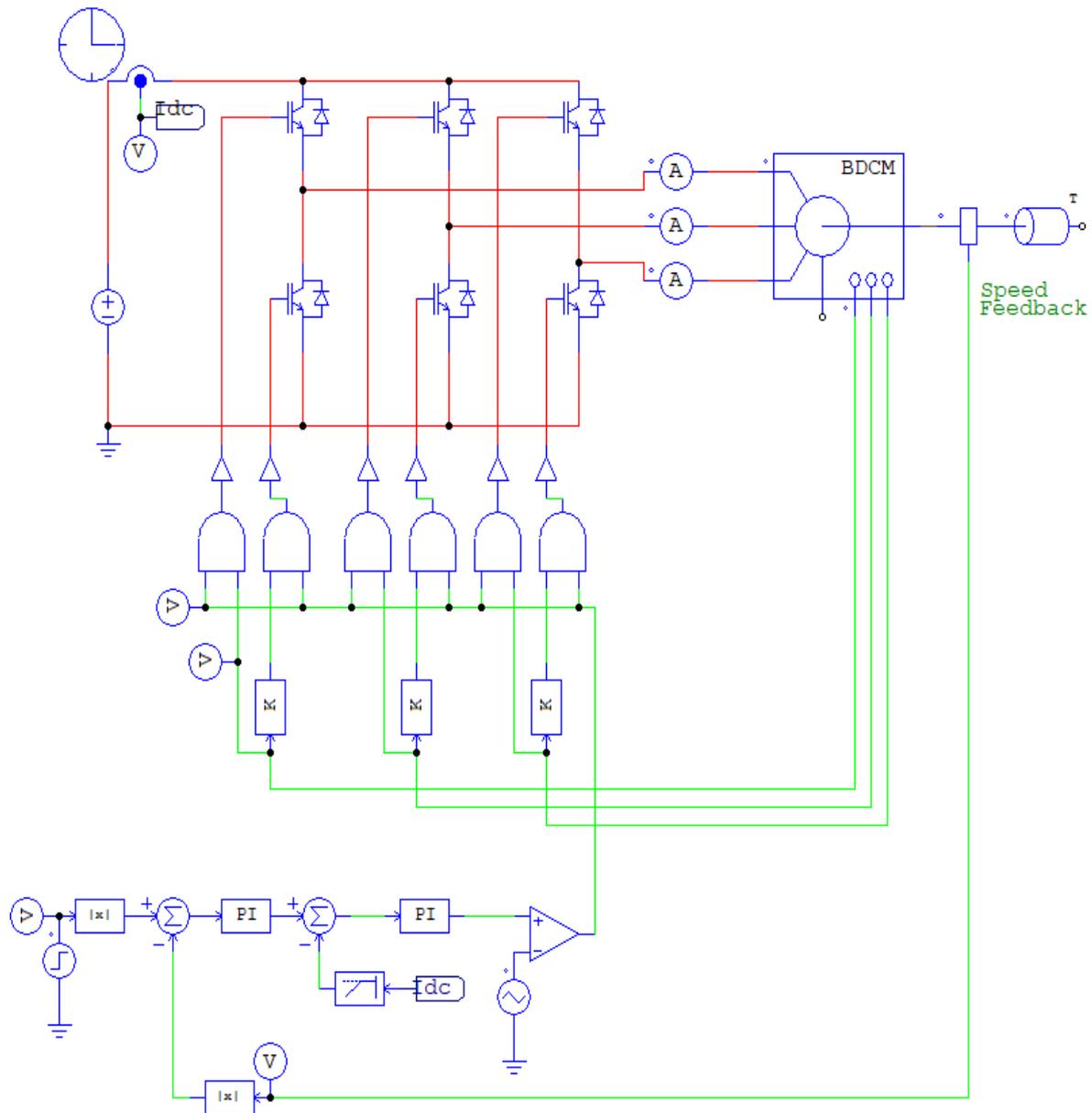


Figure IV.3. Schéma de la simulation contrôle vitesse BLDC avec la charge.

III.4 Résultat de simulation démarrage avec la charge :

La figure suivante représente le résultat de simulation au démarrage du moteur avec la présence de la charge de **0.7 N/M**.

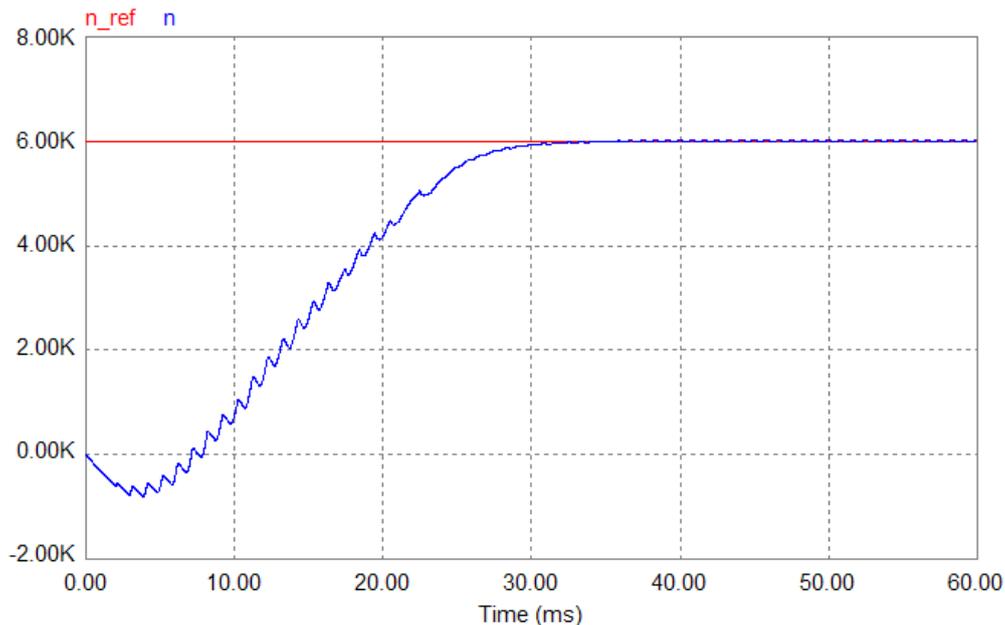


Figure IV.4. Résultat de la simulation contrôle vitesse BLDC avec la charge.

- Interprétation :

La **Figure IV.4** représente la courbe de vitesse avec la présence de la charge au démarrage du moteur et malgré cette charge appliquée on remarque que la vitesse suit la référence avec un temps de 30 ms. Et on remarque une stabilité au niveau de la vitesse avec le temps.

III.5 Simulation démarrage avec la charge et changement de vitesse de référence:

Le schéma suivant **Figure IV.3** représente la simulation de vitesse du moteur Brushless par commande MLI au niveau du l'onduleur triphasé et la régulation PI avec la présence de la charge avec le changement de vitesse durant l'expérience.

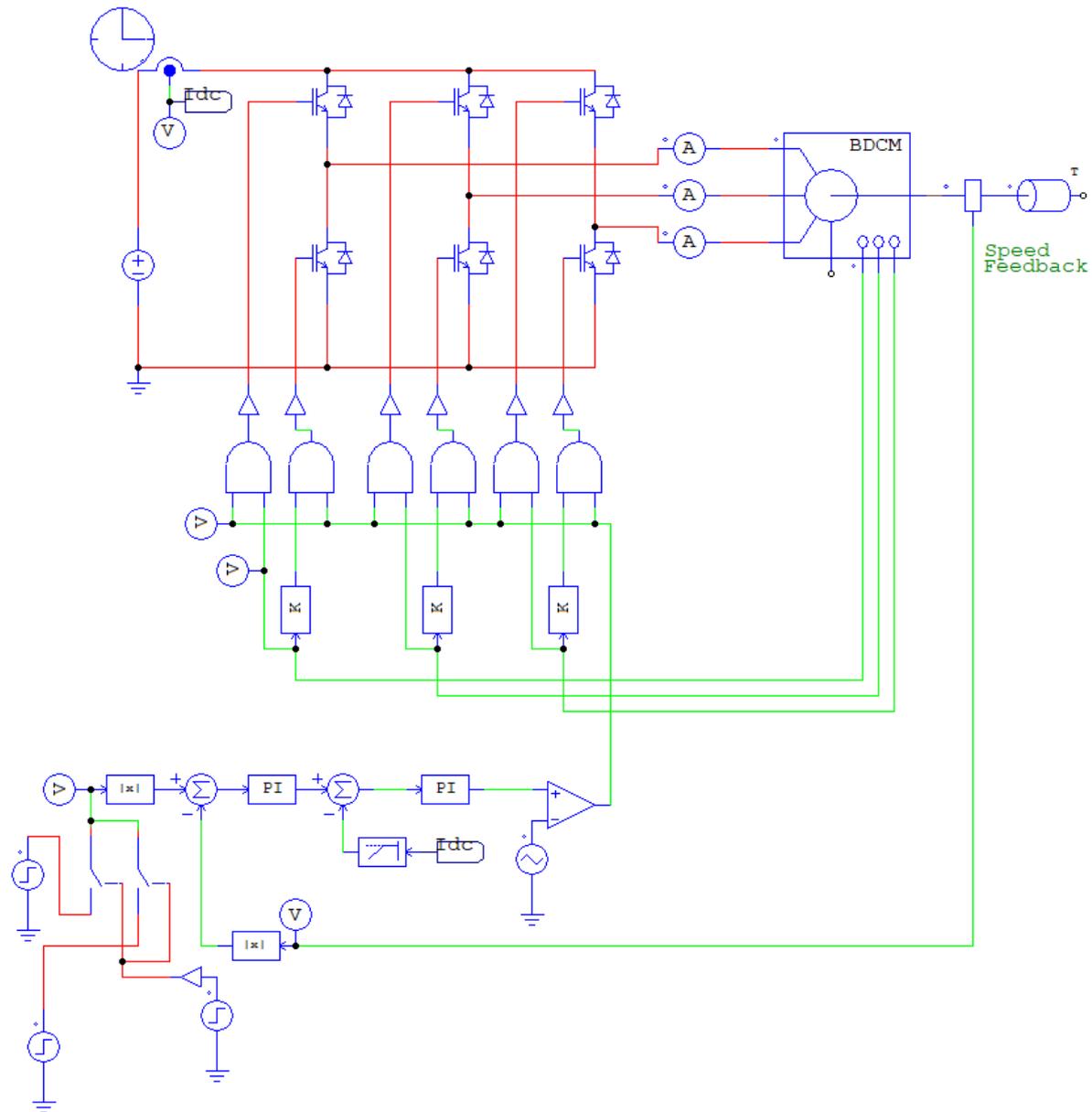


Figure IV.5. Schéma de la simulation contrôle vitesse BLDC avec la charge et changement de vitesse.

III.6 Résultat de simulation démarrage avec la charge et changement de vitesse:

Le résultat de simulation dans la figure suivante représente la performance de la régulation de vitesse au démarrage du moteur avec la présence de charge avec changement de vitesse de **3000 tr/min** au **5000 tr/min**.

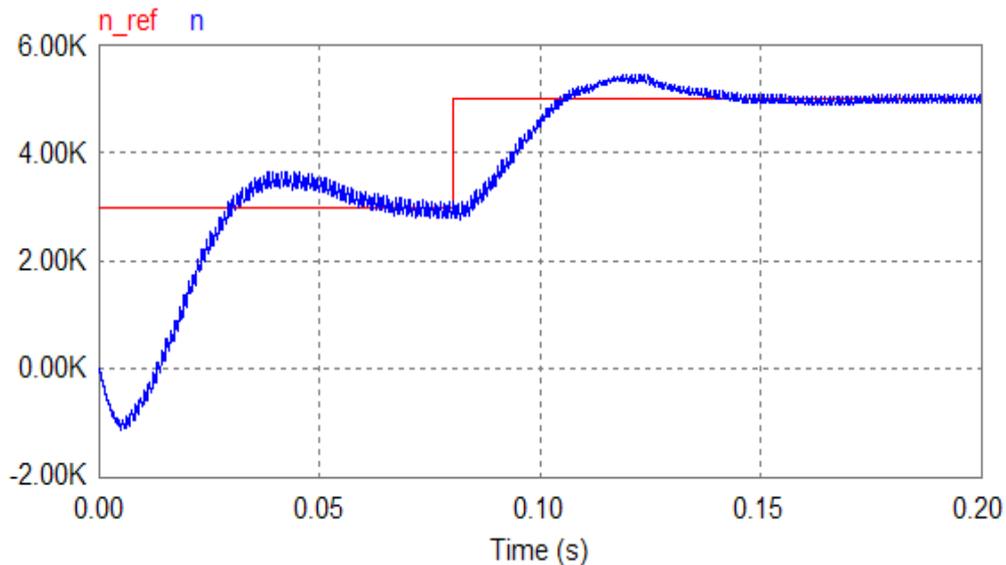


Figure IV.6. Résultat de la simulation contrôle et variation de vitesse BLDC avec la charge.

- Interprétation :

Cette **Figure IV.6** représente le changement de vitesse avec la présence de la charge au démarrage du moteur et la performance de la régulation. On remarque que la vitesse change et suit la référence avec un temps de **0.04 s** et de vitesse référence de **3000 tr/min** et après la commutation de vitesse de référence de **5000 tr/min** elle suit toujours cette vitesse de référence. Alor on déduit que notre régulation est efficace et performance.

IV. Conclusion :

On vu dans ce chapitre des différentes simulations de la vitesse du notre moteur Brushless alors ce qu'on peut déduit est la commande MLI avec la présence de la régulation PI est efficace et performance malgré la présence de la charge et le changement de vitesse au cour de l'expérience.

Conclusion Générale

Conclusion générale :

Les travaux présentés dans ce mémoire avaient pour but le contrôle et l'étude de réglage de vitesse d'un moteur Brushless DC sur la base de la simulation.

Pour atteindre cet objectif, nous avons présenté la solution de la commande MLI dû à ses avantages des convertisseurs de puissances à savoir L'onduleur. L'objectif principale travaux réalisés a été l'étude et la mise en œuvre de lois de commande dédiées aux convertisseurs onduleur avec ses deux modes de fonctionnement, afin de satisfaire d'une part les contraintes en tension appliquées sur les différents interrupteurs et d'autre part un contrôle robuste du courant de charge, le troisième objectif est d'assurer un THD le plus faible possible du courant de charge pendant le fonctionnement onduleur. Ces objectifs nous ont conduits à étudier diverses lois de commande Après avoir effectué différents tests de performances pour chacune des solutions envisagées. Les résultats obtenus sont fort, encourageants.

Pour clore notre travail, j'espère que cette étude fera l'objet d'une réalisation expérimentale avec des circuits et pour un futur travail de recherche, nous pouvons proposer toute autre topologie de convertisseur qui permet d'aboutir exploitable et robuste, en particulier nous pouvons citer :

- Logique floue.
- H_{∞} .
- Mode glissant...etc.

Bibliographie

Bibliographie :

[1]- NAIDJI Assia, «Commande Floue-Glissant d'un Moteur BLDC», Master en AUTOMATIQUE ET SYSTEME, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 2018.

[2]- AMANI Ahmed amine, «LE CONTROLE PID D'UN MOTEUR BRUSHLESS», Master en Automatique et Informatique Industrielle, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA 2019.

[3]- OKBA Salah et BEDDIAR Walid, « Etude et réalisation d'un onduleur de tension triphasé à MLI », Magister en électrotechnique, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 2019.

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

[5]- Dr Fritz Faulhaber GmbH &Co.KG, 'Information technique', 17^{ième} édition 2021.

[6]- Ing V. LELEUX Ir. N. GILLIEAUX-VETCOUR GRAMME – Liège, 'Circuit de commande d'un moteur Brushless DC par onduleur triphasé commandé en modulation de largeur d'impulsion par microcontrôleur', Revue Scientifique des ISILF n°19, 2005.