

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF-M'SILA

FACULTE: Technologie
DEPARTEMENT: Electronique
N°:.....



DOMAINE: Sciences et Technologies
FILIERE: Automatique
OPTION: Robotique

Mémoire présenté pour l'obtention Du Diplôme de Master Académique

Par:

Roubi Youssouf Yacine belhout

Intitulé :

**Réalisation d'une carte de commande pour une
trottinette électrique**

Setenu devant le jury :

Pr. GHADHBANE Ismail

Dr. BOUZIDI Riad

Dr. ZORIG Assam

Président

Encadreur

Examineur

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Année universitaire 2024/2025

Dédicace :

Ce mémoire est dédié à nos parents ainsi qu'à nos frères et sœurs, en témoignage de notre gratitude.

Remerciements

Avant tout, nous adressons notre gratitude à **ALLAH** pour nous avoir guidés sur la voie juste, nous ayant accordé la force et le courage nécessaires à la réalisation de ce projet de fin d'études. Ce travail a été mené au sein du **Laboratoire de Génie Électrique**, rattaché au **Département de Génie Électrique** de l'**Université Mohamed Boudiaf de M'sila**.

Nous exprimons notre sincère reconnaissance à notre encadrant, **Dr. BOUZIDI Riad**, pour son accompagnement, ses conseils éclairés et sa disponibilité tout au long de ce projet. Nos remerciements s'adressent également à nos amis et collègues, en particulier à ceux qui nous ont apporté un soutien moral précieux et une amitié sincère, que nous n'oublierons jamais.

Nous tenons également à remercier les **membres du jury** pour avoir accepté d'évaluer ce travail, ainsi que pour leurs remarques constructives qui contribueront sans doute à notre amélioration.

Enfin, une pensée toute particulière à nos familles, pour leur soutien indéfectible, leur encouragement constant, et à toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à ce mémoire.

ملخص:

تهدف هذه المذكرة إلى تصميم وإنجاز بطاقة تحكم إلكترونية لسكوتر كهربائي يعمل بمحرك تيار مستمر بدون فرش . تم أولاً تقديم لمحة عامة حول السكوتر الكهربائي ومكوناته الأساسية. ثم تناولنا نظام القيادة الكهربائية وتحليل العناصر المكونة له مثل البطارية، المحرك، والإفيرتر. تم اختيار متحكم STM32F407 لتنفيذ خوارزمية التحكم . تُعد هذه الدراسة خطوة أولية نحو تطوير نظام قيادة مدمج وفعال.

Résumé :

Ce mémoire a pour objectif la conception et la réalisation d'une carte de commande pour une trottinette électrique équipée d'un moteur BLDC. Une première partie est consacrée à la présentation générale de la trottinette et de ses composants de base. Le système d'entraînement électrique, incluant la batterie, le moteur et l'onduleur, est ensuite étudié. Le microcontrôleur STM32F407 a été choisi pour implémenter l'algorithme de commande. Ce travail constitue une première étape vers le développement d'un système de traction intégré et performant.

Abstract:

This thesis aims to design and develop a control board for an electric scooter powered by a BLDC motor. The first part presents an overview of the scooter and its main components. The electric drive system, including the battery, motor, and inverter, is then analyzed. The STM32F407 microcontroller was selected to implement the control algorithm. This project represents an initial step toward developing a compact and efficient traction system.

Sommaire

Introduction Générale	1
Chapitre I : Généralités sur la trottinette électrique	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Historique de la trottinette.....	5
I.3 Principe de fonctionnement de la trottinette électrique	5
I.4 Composants de base d'une trottinette électrique	6
I.4.1 Moteur BLDC.....	7
I.4.2 Carte de commande.....	7
I.4.3 Batterie électrique.....	8
I.5 Avantages et inconvénients de la trottinette électrique.....	9
I.5.1 Avantages.....	10
I.5.2 Inconvénients.....	10
I.6 Conclusion	11
Chapitre II : Modélisation et commande du moteur BLDC	
II.1 Introduction	12
II.2 Modélisation du Moteur BLDC	12
II.2.1 Les Équations Électrique.....	13
II.2.2 L'Équation Mécanique du Mouvement.....	14
II.2.2.1 Vitesse du Moteur.....	15
II.2.2.2 Couple Électromagnétique.....	16
II.3 Commande de vitesse d'un moteur BLDC.....	17
II.3.1 Principe et architecture de commande en boucle ouverte.....	17
II.3.2 Source de tension.....	18
II.4 Commande de vitesse d'un moteur BLDC en boucle fermé.....	19



II.4.1 Contrôle du courant.....20

II.5 Techniques de modulation de largeur d'impulsion PWM.....21

II.6 Conclusion.....22

Chapitre III : Conception et réalisation de la carte de commande :

1. Introduction.....23

2. Test d'algorithme de commande sur un banc d'essai.....23

2.1. Banc d'essai.....24

2.2. Principaux éléments du banc d'essai.....25

2.2.1. La carte Dspace Micro Lab Box 1102 et l'onduleur triphasé SEMEKRON.....26

2.2.2. Le moteur BLDC, l'encodeur et l'autotransformateur.....27

3. Algorithme de commande.....28

4. Résultats expérimentaux.....29

5. Interprétation des résultats.....30

6. Conception de la carte de commande.....31

6.1. Schéma électrique de la carte.....32

6.2. Schéma PCB de la carte sur Proteus.....33

6.3. Carte de commande réalisée.....34

6.3.1. Principaux éléments de la carte de commande34

a) Le microcontrôleur STM32F40735

b) Le driver TLP 250 et le MOSFET IRFP460.....36

7. Résultats expérimentaux.....36

8. Interprétation des résultats.....36

9. Conclusion.....37



liste de figures

Figure I-1 : "Course de trottinettes dans les rues d'antan : l'enfance en mouvement".....	5
Figure I-2 : fonctionnement de la trottinette électrique.....	6
Figure I-3 : Moteur d'une trottinette électrique.....	8
Figure I-4 : Carte de commande du moteur BLDC.....	8
Figure I-5 : Batterie d'une trottinette électrique.....	9
Figure (II-1) : Enroulements d'un moteur BLDC triphasé à deux pôles.....	12
Figure (II-2) : Modèle linéaire mécanique.....	14
Figure (II-3): Schéma fonctionnel de la commande en boucle ouverte	16
Figure (II-4): Système de contrôle de vitesse d'un moteur BLDC.....	17
Figure (II-5): Système de contrôle de vitesse basé sur le courant du moteur.....	17
Figure (II-6) : Système de contrôle de vitesse utilisant la régulation du courant	19
Figure (II-7) : Techniques PWM : (A) commutation bipolaire et (B) commutation unipolaire.....	21
Figure III-1 : Le banc d'essai à base de Dspace Micro Lab Box.....	23
Figure III-2 : Micro Lab Box 1102.....	23
Figure III-3 : L'onduleur triphasé SEMEKRONE.....	24
Figure III-4 : Le moteur BLDC et l'autotransformateur de l'alimentation.....	25
Figure III-5 : Schéma Simulink de génération logique des signaux de commande.....	26
Figure III-6 : Résultats de simulation pour deux tensions successives.....	26
Figure III-7 : Résultats de simulation pour plusieurs tensions successives.....	27
Figure III-08: Étage de conversion hacheur-onduleur pour la commande d'un moteur BLDC.....	29
Figure III-09 :PCB de la carte de commande.....	30

liste de figures

Figure III-10 :la carte de commande réalisée.....	31
Figure III-11 : kit de développement STM32F407.....	31
Figure III-12 : L'onduleur triphasé STGIB15CH60TS-L.....	31
Figure III-13 :TLP 250.....	32
Figure III-14 : IRFP460.....	32
Figure III-15 : a) La vitesse, b) La tension , c) Le courant du BLDC.....	33
Figure III-16 :Signaux des capteurs à effet d'Hall.....	34

Introduction Générale :

Dans un contexte mondial marqué par la transition énergétique et la recherche de solutions de mobilité plus propres, les véhicules électriques connaissent une évolution rapide et un intérêt croissant. Parmi eux, la trottinette électrique s'impose aujourd'hui comme une alternative efficace, écologique et économique aux moyens de transport traditionnels, en particulier dans les zones urbaines denses. Elle combine simplicité d'utilisation, faible encombrement, et autonomie suffisante pour les déplacements quotidiens. Derrière cette apparente simplicité se cache un système électromécanique complexe faisant intervenir plusieurs technologies avancées : moteurs brushless (BLDC), commandes embarquées en temps réel, modules de puissance, capteurs, et batteries haute densité. [1]

La maîtrise du contrôle de ces systèmes est un enjeu fondamental pour assurer performance, sécurité et rendement énergétique. C'est dans cette optique que notre projet s'inscrit, avec pour objectif principal la conception et la réalisation d'une carte électronique de commande dédiée à une trottinette électrique. Ce travail englobe l'étude du moteur BLDC et de ses principes de commande, le dimensionnement de l'électronique de puissance (hacheur, onduleur, driver), l'intégration d'un microcontrôleur pour le pilotage intelligent, ainsi que la simulation et la mise en œuvre pratique du système. [2]

La démarche adoptée repose sur une approche à la fois théorique et expérimentale, en s'appuyant sur des outils de développement comme STM32, Proteus, Simulink et des composants industriels tels que les MOSFETs, drivers TLP250 et modules SEMIKRON. Ce mémoire se veut donc une contribution modeste mais concrète à la compréhension et à la mise en œuvre d'un système embarqué moderne, au service d'une mobilité durable, intelligente et accessible [3]

Notre mémoire est organisé en trois chapitres. Le premier chapitre présente des généralités sur la trottinette électrique, notamment son historique, son principe de fonctionnement ainsi que ses différents composants de base. Le deuxième chapitre est consacré au système d'entraînement électrique de la trottinette (batterie, moteur BLDC, onduleur triphasé et carte de commande). Nous y avons exposé le modèle mathématique du moteur BLDC ainsi que son système d'alimentation (le commutateur). Ensuite, nous avons illustré les différentes techniques de commande, qu'elles soient en boucle ouverte ou en boucle fermée. La conception et la réalisation de la carte de

Introduction Générale

commande constituent l'objet du troisième chapitre, dans lequel nous avons mis en œuvre l'algorithme de commande sur un banc d'essai basé sur la carte **DSPACE MicroLabBox**.

Chapitre I : Généralités sur la trottinette électrique

I.1. Introduction

Une **trottinette électrique** est un type de véhicule électrique de la forme d'une trottinette, équipé d'une batterie et d'un moteur électriques. D'un encombrement faible et permettant une intermodalité aisée, son usage se développe dans les grandes villes depuis la fin des années 2010. Ce développement s'accompagne de l'adoption de réglementations variant selon les pays : l'usage de la trottinette électrique dans l'espace public peut notamment être soumis à la réglementation des engins de déplacement personnel motorisés (EDPm), à celle des bicyclettes, être interdit ou à l'inverse non réglementé.

À partir de 2018, plusieurs marques de services de location de trottinettes électriques sans station ont fait leur apparition sur les trottoirs des grandes villes européennes, avec un certain succès auprès des utilisateurs mais sans aucun cadre légal. À la différence des systèmes de vélos en libre service, ces trottinettes ne sont pas liées à une station de stockage et sont mises en place et récupérées quotidiennement par l'entreprise gérant la flotte pour procéder aux rechargements des batteries. L'absence de station de stockage cause de nombreux problèmes (encombrement des trottoirs, dégradations...) et les villes réfléchissent à un moyen de réglementer leur utilisation^[10]. En effet, ce système entraîne des nuisances importantes et surtout un vandalisme considérable, avec des milliers de trottinettes (et leurs dangereuses batteries au lithium) noyées dans les rivières, ou les ports, et de nombreuses épaves disloquées jonchant les trottoirs, écrasées par les voitures ou encombrant la voie publique.

Le marché des trottinettes électriques est en pleine expansion. En 2022, on prévoit plus d'un million de ventes en France seulement, une augmentation impressionnante comparée aux 100 000 unités vendues en 2017. Cette popularité montre l'intérêt grandissant pour les solutions de mobilité urbaine et les véhicules électriques. Que ce soit pour les trajets quotidiens, pour éviter le trafic ou simplement pour profiter d'un moyen de locomotion pratique et rapide, les trottinettes séduisent de plus en plus d'utilisateurs, piétons comme cyclistes.

Le modèle économique de ces entreprises repose sur une bulle financière : les différents services de location opèrent en effet des prix attractifs, au prix d'énormes pertes financières (la durée de vie d'une trottinette électrique est estimée à moins de trois mois, alors qu'il en faudrait plus de quatre pour pouvoir commencer à envisager une rentabilité). En conséquence, les différents services

fonctionnent actuellement à perte grâce à des investisseurs puissants (Lime est détenu par Google, Ufo par Seat, Hive par BMW et Daimler, Jump par Uber, BlaBla Ride par BlaBlaCar), et chacune de ces marques attend que les autres abandonnent le marché pour empêcher le monopole et pouvoir ensuite augmenter les prix. Au total, ce sont près de 1,5 milliard de dollars qui furent investis par toutes ces start-ups. Il est estimé que le marché mondial de la location de trottinettes électriques représentera 40 à 50 milliards de dollars d'ici l'horizon 2025 [4].

Pour cela, nous commencerons ce premier chapitre par une présentation générale de la trottinette électrique, en abordant son principe de fonctionnement ainsi que ses composants de base.

I.2 Historique de la trottinette :

L'étymologie du terme « trottinette » se réfère au verbe « trotter », qui décrit une démarche caractérisée par de petits pas rapides. Autrefois, les jeunes commis de ville, dont la tâche consistait à effectuer des courses, étaient nommés « trotteurs », en raison de leur allure vive. C'est de cette appellation que dériverait le nom « trottinette ».

Les premiers exemplaires de trottinettes ont vu le jour il y a plus d'un siècle, principalement à l'attention des enfants. Faits en bois, et souvent sources de bruit, ils ont peu à peu disparu, notamment en raison de la faible résistance du bois aux conditions météorologiques. Leur popularité a décliné avec l'apparition d'autres modes de déplacement, tels que le vélo ou le skateboard.

C'est dans les années 1930 que la trottinette s'est modernisée, avec des modèles plus robustes. Cependant, c'est véritablement dans les années 1990 qu'elle a connu un succès mondial, grâce à l'ingénieur suisse Wim Ouboter. Il a conçu une micro-trottinette pour sa sœur, qui éprouvait des difficultés avec le vélo. En 1996, il met au point un modèle pliable en aluminium, muni de roues de patins en ligne. Ce modèle, commercialisé sous le nom de Razor, a connu un essor considérable, d'abord au Japon, puis dans le monde entier.[4]



Figure I-1 : "Course de trottinettes dans les rues d'antan : l'enfance en mouvement"

Dans les années 2000, la trottinette transcende son rôle de simple jouet pour enfants. Elle devient un véritable outil de mobilité urbaine, et également une discipline sportive avec le développement du freestyle, reconnu par la Fédération française de roller sports. De nouvelles déclinaisons, telles que la trottinette tout-terrain, ont également émergé, séduisant les passionnés de randonnée et d'aventure.

Au niveau réglementaire, l'essor des trottinettes électriques en milieu urbain a conduit à des ajustements du code de la route. Depuis 2019, leur utilisation est encadrée : en ville, elles doivent circuler sur les pistes cyclables ou sur la chaussée, tandis que les modèles non motorisés sont tolérés sur les trottoirs.

Concernant la trottinette motorisée, ses origines remontent à la fin du XIXe siècle. En 1895, l'américain Ogden Bolton Jr dépose un brevet pour un vélo électrique, jetant ainsi les bases des futurs engins motorisés. En 1915, l'Autopède voit le jour, grâce à Arthur Hugo Cecil Gibson. Ce modèle, décliné en versions essence et électrique, pouvait atteindre 35 km/h, était pliable et équipé d'un éclairage ainsi que d'un klaxon. Il connut une brève popularité à New York avant de disparaître en 1922.

La trottinette électrique moderne fait son apparition en 1967, grâce à Roland PUISSET, qui conçoit les premiers modèles motorisés. Depuis, les technologies ont évolué rapidement, intégrant des suspensions, des pneus, des freins à disque, des accélérateurs électroniques et des guidons réglables.

Dans cette dynamique, la marque française ZOSH, développée par l'entreprise Cochet, propose des modèles tout-terrain haut de gamme. Conçues pour un usage urbain et rural, les trottinettes ZOSH sont équipées de moteurs brushless, de freins à disque 4 pistons, de suspensions performantes et de grandes roues de 20 pouces. Elles sont conçues pour se conformer aux normes de sécurité et aux réglementations en vigueur, avec une vitesse limitée à 25 km/h. Adaptées aux adolescents comme aux adultes, elles s'inscrivent pleinement dans les solutions modernes de mobilité durable. .[4]

I.3 Principe de fonctionnement de la trottinette électrique :



Figure I-2 : fonctionnement de la trottinette électrique

Aujourd'hui, la trottinette électrique fait partie intégrante du paysage urbain. Compacte, silencieuse et facile à manier, elle s'impose comme une alternative crédible aux moyens de transport classiques, notamment pour les trajets courts. Derrière son apparence simple se cache un mécanisme bien pensé, mêlant technologie et praticité.

Le cœur de la trottinette est son moteur électrique, souvent logé dans l'une des deux roues. C'est lui qui assure la propulsion, en utilisant l'énergie que lui fournit la batterie. Cette dernière est généralement une batterie lithium-ion, légère et capable de stocker assez d'électricité pour parcourir plusieurs kilomètres. Elle alimente non seulement le moteur, mais aussi d'autres éléments comme les lumières ou l'écran d'affichage, lorsqu'il y en a un.

Le système est coordonné par un contrôleur électronique. Ce petit boîtier discret joue un rôle fondamental : il reçoit les instructions envoyées par l'utilisateur via l'accélérateur, puis régule l'énergie transmise au moteur. Il veille aussi à équilibrer la distribution d'énergie entre les différents composants de la trottinette.

Côté sécurité, les trottinettes électriques intègrent généralement deux types de freins. Le frein électrique permet de ralentir en utilisant le moteur pour créer une résistance, ce qui a parfois l'avantage de récupérer un peu d'énergie. À cela s'ajoute un frein mécanique, souvent à disque ou à tambour, similaire à ceux qu'on retrouve sur les vélos.

Les roues, quant à elles, jouent un rôle non négligeable dans le confort de conduite. Certaines sont remplies d'air, d'autres sont pleines et donc insensibles aux crevaisons. Lorsqu'elles sont gonflables, elles absorbent mieux les chocs, en particulier sur les surfaces irrégulières. Certains modèles vont même plus loin en ajoutant des suspensions pour adoucir les trajets.

Une fois la trottinette allumée à l'aide du bouton d'alimentation, l'utilisateur peut vérifier l'état de la batterie et la vitesse grâce à un petit écran. En actionnant la gâchette ou la poignée d'accélération, il envoie un signal au contrôleur qui met le moteur en marche. En roulant, la trottinette adapte la puissance fournie au moteur en fonction de l'intensité de l'accélération. Certains modèles permettent même de maintenir une vitesse constante sans avoir à garder le doigt sur l'accélérateur.

L'autonomie, c'est-à-dire la distance qu'on peut parcourir avec une charge complète, dépend de plusieurs éléments : la capacité de la batterie, le poids transporté, le relief du parcours, mais aussi le style de conduite. En moyenne, une trottinette de ville peut parcourir entre 15 et 40 kilomètres, avec une vitesse maximale avoisinant les 25 km/h.

En somme, la trottinette électrique est un petit bijou de simplicité technique. Elle réunit, dans un format compact, une motorisation électrique efficace, une gestion intelligente de l'énergie et un confort de conduite de plus en plus soigné. C'est une réponse moderne aux défis de la mobilité urbaine.

I.4 Composants de base d'une trottinette électrique :

I.4.1 Moteur BLDC :

Sur certains modèles, il se trouve dans la roue avant ou arrière ou situé sous le plateau. Il permet à l'ensemble de rouler sans assistance extérieure. La plupart du temps, il s'agit de moteurs « sans balais », encore appelés « brushless ». Ceux-ci fonctionnent en courant alternatif et ne nécessitent aucun entretien. Il existe aussi des trottinettes électriques équipées d'un moteur de type « brushless »

(courant continu). Par conséquent, ils sont moins puissants. Toutefois, ils sont plus simples à mettre en œuvre. Ils sont souvent épaulés par un système à courroie, qui permet à la trottinette électrique d'être plus rapide dans les montées. [3]



Figure I-3 : Moteur d'un trottinette électrique

I.4.2 Carte de commande :

La carte de commande est un élément central dans le fonctionnement d'une trottinette électrique équipée d'un moteur BLDC (Brushless DC). Son rôle est de gérer l'alimentation et le pilotage du moteur en fonction des actions de l'utilisateur. Lorsque l'on appuie sur l'accélérateur, c'est la carte de commande qui interprète ce signal, ajuste la tension envoyée au moteur, et contrôle la vitesse ainsi que le couple produit. Elle permet aussi de réguler le freinage (régénératif ou classique), de surveiller l'état de la batterie, et d'assurer la sécurité du système en coupant l'alimentation en cas de surcharge ou de surchauffe. Grâce à l'utilisation de composants électroniques comme les microcontrôleurs, les capteurs Hall, et les transistors de puissance (MOSFETs), cette carte garantit un fonctionnement fluide, silencieux et économe en énergie du moteur BLDC

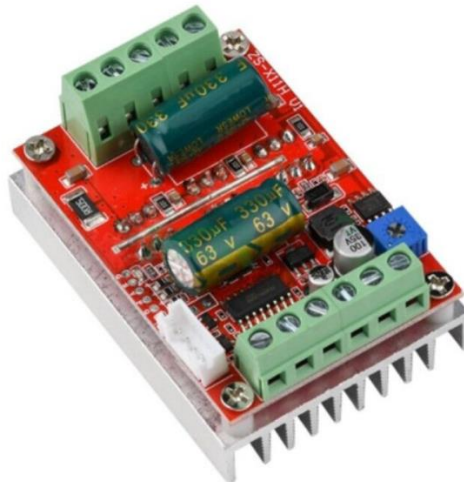


Figure I-4 : Carte de commande du moteur BLDC

I.4.3 Batterie électrique :

Pour bien fonctionner, le moteur d'une trottinette électrique a besoin d'être alimenté. C'est le rôle que joue la batterie. On en distingue deux types : les batteries au plomb et les batteries au lithium. Ces dernières sont les plus utilisées du fait de leur légèreté et de leur grande autonomie. Elles peuvent fournir jusqu'à 30 km d'autonomie. Certaines sont même capables d'atteindre les 50 voire 60 kilomètres. Les batteries les plus tenaces sont faites en Lithium. Elles sont d'une technologie plus avancée et se rechargent plus vite (jusqu'à 5 h pour une charge complète). Les batteries en plomb sont plus lourdes, avec moins d'autonomie et une durée de vie assez faible. [4]



Figure I-5 : Batterie d'une trottinette électrique

I.5 Avantages et inconvénients de la trottinette électrique :

I.5.1 Avantages :

La trottinette électrique s'impose aujourd'hui comme une solution de mobilité moderne, à la fois rapide et respectueuse de l'environnement. Elle offre une vitesse supérieure à celle d'un vélo classique tout en demeurant un mode de transport écologique, sans émissions polluantes. Bien que son coût initial puisse paraître élevé, son usage reste très économique sur le long terme, notamment grâce à l'absence de dépenses liées au carburant et aux frais d'entretien. Conçue pour s'adapter parfaitement aux exigences de la mobilité urbaine, elle est généralement pliable, ce qui facilite son transport dans les bus, les trains, les taxis ou même lors de trajets en covoiturage. De plus, elle ne

nécessite ni stationnement particulier ni infrastructure lourde, ce qui la rend particulièrement pratique dans les environnements urbains denses.

I.5.2 Inconvénients :

Malgré ses nombreux avantages, la trottinette électrique présente certaines limites qu'il convient de prendre en compte. Elle n'est pas toujours adaptée à tous les types de routes, notamment celles en mauvais état ou non aménagées pour ce genre de véhicule. L'aspect sécuritaire reste également essentiel : le port du casque est fortement recommandé, tout comme l'usage de feux et de vêtements ou d'accessoires rétro réfléchissants pour être bien visible des automobilistes, surtout la nuit. Par ailleurs, dans les zones piétonnes, il faut faire preuve d'une grande prudence afin d'éviter tout risque de collision avec les passants, particulièrement dans les espaces très fréquentés.

I.6 Conclusion :

La trottinette électrique s'est imposée ces dernières années comme un mode de déplacement moderne, écologique et adapté aux enjeux de la mobilité urbaine. Née d'une longue évolution technique et sociale, elle combine aujourd'hui compacité, performance et simplicité d'utilisation. Grâce à des composants électroniques tels que le moteur BLDC, la batterie lithium-ion et la carte de commande, elle offre une conduite fluide, silencieuse et économique.

En plus de sa facilité de transport et de son autonomie satisfaisante, elle présente un véritable intérêt pour les trajets courts et multimodaux. Toutefois, son utilisation n'est pas exempte de contraintes : infrastructures parfois inadaptées, risques d'accident, et nécessité de respecter certaines règles de sécurité. Malgré cela, la trottinette électrique demeure une solution de mobilité prometteuse et durable, en parfaite adéquation avec les objectifs de transition énergétique et de désengorgement des villes.

Chapitre II : Modélisation et commande du moteur BLDC

II.1 Introduction

Le secteur industriel a connu un développement considérable dans l'utilisation des systèmes d'entraînement électriques reposant sur différents types de moteurs, tels que le moteur asynchrone, le moteur synchrone, le moteur synchrone à aimants permanents, ou encore le moteur à courant continu. Cependant, les caractéristiques avantageuses du moteur à courant continu sans balais (BLDC) ont conduit à une adoption croissante de ce dernier dans les systèmes d'entraînement électriques.

Afin de garantir que le système d'entraînement basé sur un moteur BLDC soit **robuste**, **réactif** et offre d'excellentes performances, il est essentiel de mettre en œuvre des lois de commande adaptées. Ces lois doivent agir aussi bien sur les grandeurs électriques, telles que le courant et la tension, que sur les grandeurs mécaniques, telles que la vitesse et le couple.

Bien entendu, cette démarche suppose au préalable l'établissement d'un modèle mathématique précis du moteur BLDC. Ainsi, ce chapitre sera d'abord consacré à l'élaboration d'un modèle mathématique fidèle du moteur à courant continu sans balais. Par la suite, nous appliquerons des lois de commande sur l'une de ses grandeurs mécaniques les plus importantes : la vitesse.

Nous commencerons par les approches les plus simples, en explorant d'abord le contrôle de la vitesse en **boucle ouverte**, puis en **boucle fermée**, en utilisant soit un régulateur de vitesse unique, soit deux régulateurs : l'un pour le courant, l'autre pour la vitesse.

II.2 Modélisation du Moteur BLDC

II.2.1 Les équations électriques

La particularité du moteur BLDC provient de la forme trapézoïdale de la force électromotrice, ce qui signifie que l'inductance mutuelle entre le stator et le rotor est non sinusoïdale. Par conséquent de la Figure (II-1) représentant le modèle d'un moteur BLDC on a :

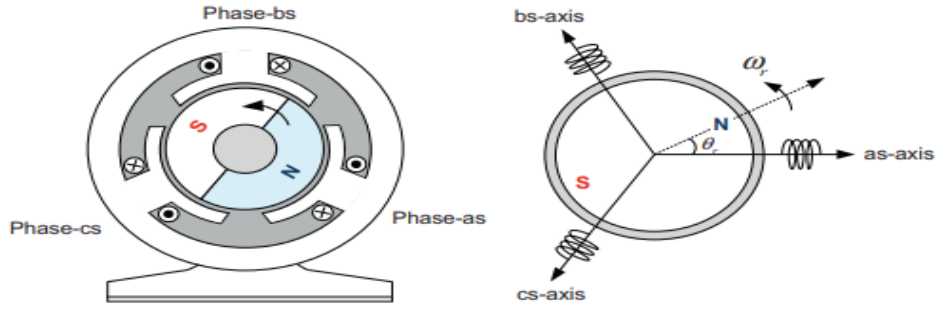


Figure (II-1) : Enroulements d'un moteur BLDC triphasé à deux pôles

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

Où le stator tension $v_{abcS} = [v_{as} v_{bs} v_{cs}]^T$ le courant du stator $i_{abcS} = [i_{as} i_{bs} i_{cs}]^T$ la liaison de flux du stator $\lambda_{abcS} = [\lambda_{as} \lambda_{bs} \lambda_{cs}]^T$ et la résistance du stator :

$$R = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

La liaison de flux λ_{abcS} des enroulements du stator se compose de $\lambda_{abcS(s)}$ en raison des courants du stator i_{abcS} et $\lambda_{abcS(f)}$ en raison de l'aimant permanent comme :

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

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

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

Où le Back-FEM dû au flux d'aimant est exprimé en $e_{abcS} = \frac{d\lambda_{abcS(f)}}{dt}$ et est également donné comme :

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

Où $\lambda_f (= N\phi_f)$ est la quantité de flux magnétique ϕ_f reliant N tours des enroulements du stator, $f(\theta_r)$ est une fonction unitaire représentant la forme d'onde du Back-FEM et θ_r la position du rotor.[6]

La fonction d'unité pour la forme d'onde trapézoïdale Back-FEM d'un moteur de BLDC peut être exprimée comme :

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

La liaison de flux du stator $\lambda_{abc(s)}$ due aux courants du stator est donnée par :

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

Pour les enroulements triphasés de symétrie, les auto-inductances sont toutes les mêmes et les inductances mutuelles sont toutes les mêmes que dans ce qui suit :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Équations de tension d'un moteur à courant continu sans balais :

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

$$v_{as} = R_s i_{as} + (L_s - M) \frac{di_{as}}{dt} + e_{as} \quad (\text{II-14})$$

$$v_{as} = R_s i_{as} + (L_s - M) \frac{di_{as}}{dt} + e_{as} \quad (\text{II-15})$$

II.2.2 Équation Mécanique du Mouvement

II.2.2.1 Vitesse du Moteur

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

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

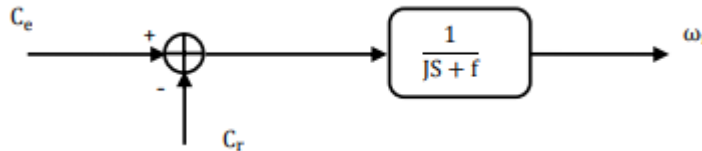


Figure (II-2) : Modèle linéaire mécanique.

Où :

ω_r : est la vitesse angulaire en rad/s.

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

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

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

II.2.2.2 Couple Électromagnétique

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

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

II.3 Commande de vitesse d'un moteur BLDC

II.3.1 Principe et architecture de commande en boucle ouverte

Le contrôle de la vitesse en boucle ouverte d'un moteur BLDC peut être réalisé de manière similaire à celui d'un moteur à courant continu conventionnel, en modifiant la position conceptuelle équivalente des balais et en ajustant la position du capteur par rapport au rotor. Ce type de commande est simple à mettre en œuvre, facile à concevoir et moins coûteux que le contrôle en boucle fermée. Toutefois, l'absence de rétroaction empêche toute surveillance directe de la sortie. La vitesse du moteur peut être augmentée ou réduite en agissant sur la tension d'alimentation, puisque celle-ci influence directement la vitesse de rotation. Le couple, quant à lui, est proportionnel au courant, lequel dépend de la charge appliquée. Ainsi, dans un système de commande en boucle ouverte, les performances dépendent principalement de la tension d'entrée et de l'état de la charge.[7]

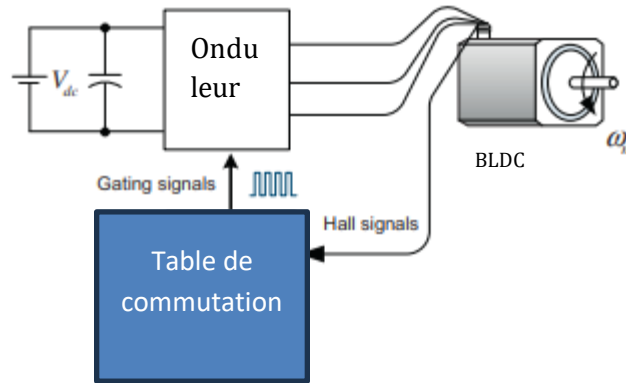


Figure (II-3): Schéma fonctionnel de la commande en boucle ouverte

II.3.2 Source de tension

La source de tension est utilisée pour alimenter la tension continue du moteur BLDC. La vitesse du moteur BLDC est augmentée avec l'augmentation de la tension. La source de tension est le contrôleur principal, aucun autre contrôleur n'est utilisé dans ce contrôle. La vitesse dépend entièrement de la tension d'alimentation puisque la tension d'alimentation est la fonction de la vitesse. La tension appliquée ne doit pas être supérieure à la puissance nominale du moteur ; par conséquent, la forme d'onde carrée ou sinusoïdale peut être appliquée comme tension d'entrée. [7]

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

La figure (II-4) montre le système de contrôle le plus simple pour contrôler la vitesse d'un moteur BLDC. Un régulateur proportionnel intégral (PI) est couramment utilisé pour le contrôle de vitesse. Ce régulateur de vitesse produit la tension de référence V^* du moteur (ou la fonction PWM) comme :

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

Où K_p et K_i sont les gains proportionnel et intégral du contrôleur de vitesse PI, respectivement. Cette tension de référence est générée par la technique PWM puis appliquée au moteur BLDC. Ce système de contrôle de vitesse est simple mais a un inconvénient important où dans cette méthode, le courant du moteur est difficile à contrôler dans une plage appropriée. En effet, lorsqu'une commande de vitesse est modifiée, la tension de référence peut être largement modifiée. On ne

peut donc pas s'attendre à obtenir une bonne réponse dynamique pour le contrôle de vitesse. De plus, cela peut entraîner un courant transitoire important supérieur au courant nominal, ce qui peut entraîner l'arrêt total du système d'entraînement. [8]

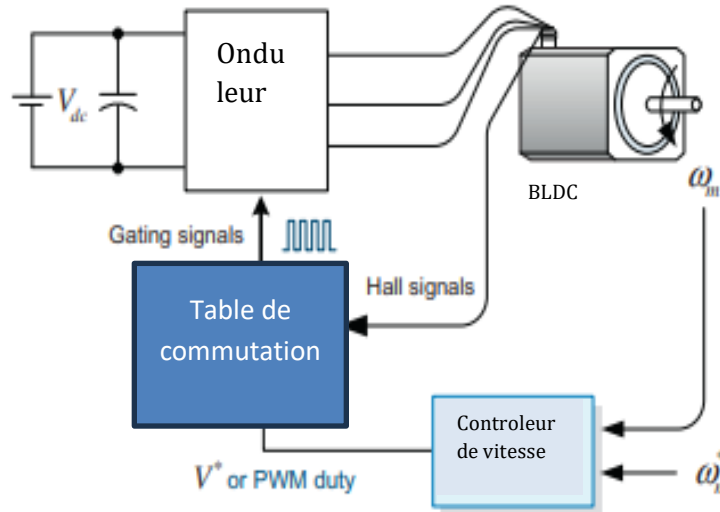


Figure (II-4): Système de contrôle de vitesse d'un moteur BLDC

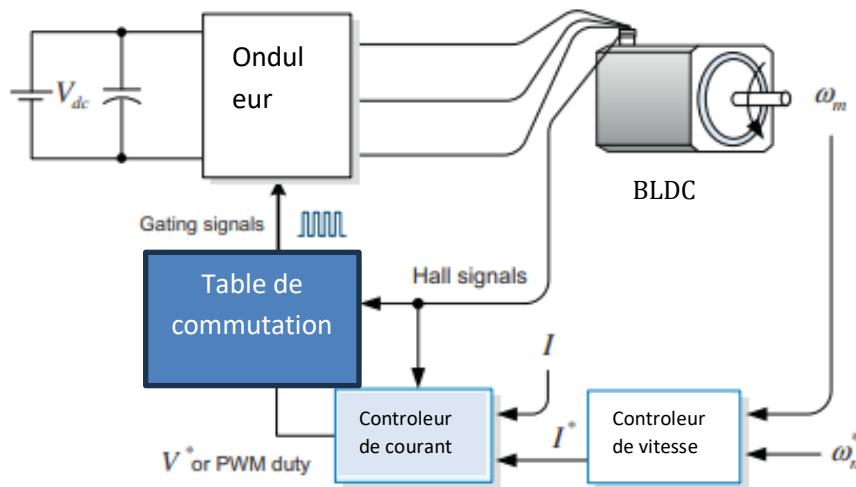


Figure (II-5): Système de contrôle de vitesse basé sur le courant du moteur

Pour obtenir une meilleure réponse dynamique du contrôle de vitesse, il est nécessaire de contrôler le couple ou le courant du moteur BLDC. Un système amélioré de commande de vitesse basé sur le contrôle du courant est montré dans Figure (II-3). Si l'on compare avec le système précédent de la Figure (II-2), ce système comprend un régulateur pour contrôler le courant (donc, le couple) afin de contrôler la vitesse du moteur BLDC. Dans ce cas, la sortie du régulateur de vitesse PI devient le courant de référence du moteur et un capteur de courant est nécessaire pour mesurer le courant réel du moteur pour la commande de courant.

Pour le contrôle du couple des moteurs à courant alternatif, l'amplitude et la phase des courants triphasés sont régulées instantanément. Cependant, pour l'entraînement du moteur BLDC, seule l'amplitude des courants d'alimentation doit être régulée. Comme nous pouvons le voir dans l'équation 10-18 le couple développé est proportionnel à l'amplitude du courant de phase. En outre, lors du contrôle d'amplitude du courant, nous pouvons les régler individuellement comme dans le contrôle de courant des moteurs à courant alternatif. Cependant, étant donné que l'amplitude du courant de phase d'un moteur BLDC est proportionnelle au courant DC-link côté I_{dc} , l'amplitude du courant de phase est généralement contrôlée en régulant I_{dc} . Dans ce cas, le système d'entraînement n'a besoin que d'un seul capteur de courant côté DC-link, et est donc plus rentable. La Figure (II-4) montre le système de contrôle de vitesse en utilisant la régulation du courant de liaison. Dans ce système, le contrôleur de vitesse produit le courant de référence de liaison continue comme :

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

Où, K_{ps} et K_{is} sont les gains proportionnel et intégral du régulateur de vitesse PI, respectivement. Ces valeurs peuvent être déterminées à partir de la procédure de sélection des gains d'un régulateur de vitesse PI. [8]

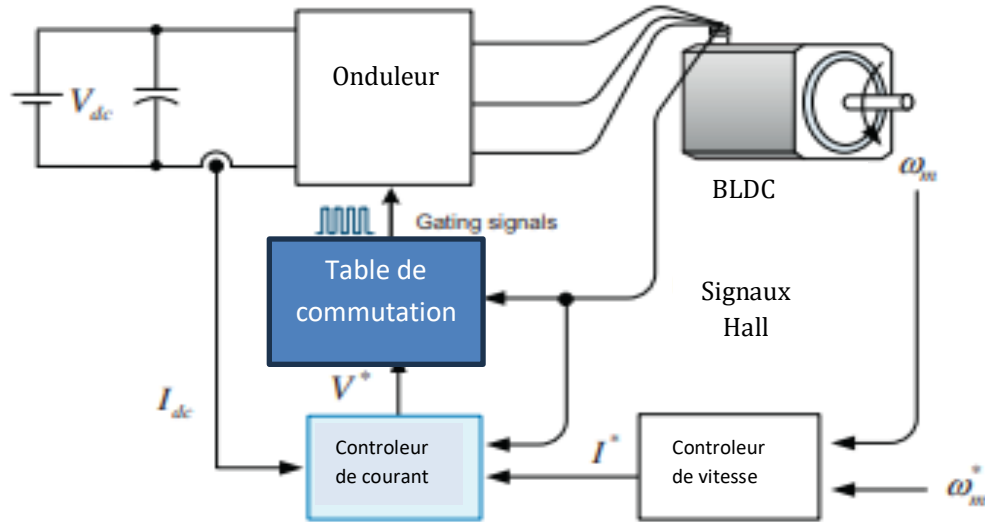


Figure (II-6) : Système de contrôle de vitesse utilisant la régulation du courant

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

II.4.1 Contrôle du courant

La technique de l'hystérésis est simple à mettre en œuvre et donne une excellente réponse au régime transitoire car elle détermine directement les états de commutation à partir de l'erreur du courant. Cependant, la technique d'hystérésis présente l'inconvénient majeur de faire varier la fréquence de commutation en fonction des conditions de fonctionnement telles que la force contre-électromotrice, les conditions de charge, etc. Ainsi, pour avoir une fréquence de commutation constante, une technique PWM est couramment utilisée, mais elle est moins performante que la technique d'hystérésis.[8]

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

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

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

Enfin, les commutateurs actifs réels sont déterminés en combinant les signaux de commutation PWM avec le signal de mode de fonctionnement décodé à l'aide des signaux de capteurs à effet Hall. [8]

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

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

La tension d'alimentation est coupée à une fréquence fixe avec un rapport cyclique en fonction de l'erreur de courant. Par conséquent, le courant et le taux de changement de courant peuvent être contrôlés. La durée d'alimentation en deux phases est limitée par les angles de commutation en deux phases. Le principal avantage de la stratégie PWM est que la fréquence de hachage est un paramètre fixe; par conséquent, les bruits acoustiques et électromagnétiques sont relativement faciles à filtrer. Il existe également deux façons de gérer la commutation du courant d'entraînement : le hachage dur et le hachage doux. Dans la technique de coupe dure, les deux transistors de phase sont entraînés par le même signal pulsé : les deux transistors sont allumés et éteints en même temps. L'approche soft permet non seulement un contrôle du courant et du taux de changement du courant, mais aussi une minimisation de l'ondulation du courant. [9]

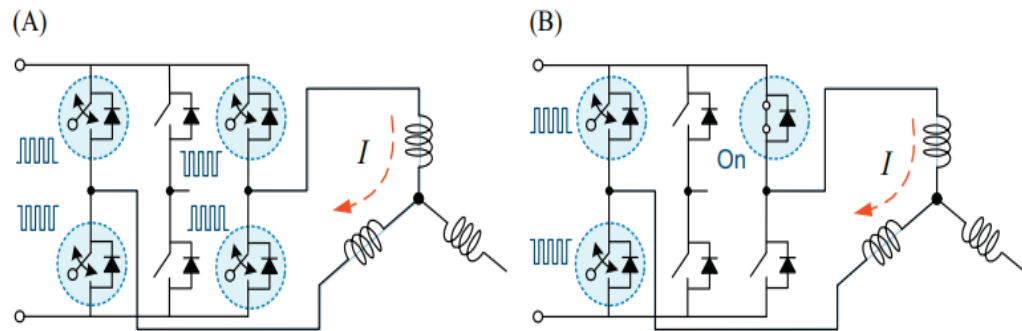


Figure (II-7) : Techniques PWM : (A) commutation bipolaire et (B) commutation unipolaire.

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

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

Une méthode bien connue est la méthode back-FEM. Il s'agit d'une méthode basée sur le courant des diodes libres de la phase de non commutation et d'une méthode basée sur un observateur de flux. Parmi ceux-ci, nous explorerons la méthode back-FEM, qui est la plus largement utilisée pour les applications à faible coût telles que les entraînements de ventilateur, de pompe et de compresseur en raison de son principe et de sa mise en œuvre faciles. [10]

II.7 Conclusion

Ce chapitre est consacré à la modélisation du moteur BLDC ainsi qu'à la présentation des différentes méthodes de contrôle de sa vitesse. Après avoir établi les équations différentielles du moteur — électriques, magnétiques et mécaniques. Nous avons formulé le modèle mathématique correspondant sous forme d'état. Par la suite, nous avons montré que la vitesse du moteur peut être contrôlée selon deux approches : en boucle ouverte et en boucle fermée.

Il est bien établi que le contrôle en boucle fermée offre une meilleure robustesse et de meilleures performances, notamment lorsqu'il repose sur deux régulateurs : l'un destiné à la régulation du courant, l'autre à celle de la vitesse.

Chapitre III : Conception et réalisation de la carte de commande

III.1. Introduction

La trottinette électrique repose sur un système de commande électronique compact et efficace permettant d'assurer le bon fonctionnement du moteur, la gestion de la batterie et l'interaction avec l'utilisateur. Ce système est physiquement réalisé sur un circuit imprimé (PCB), aussi appelé « carte électronique de commande ». Ce chapitre décrit le processus complet de réalisation de cette carte, de la conception à la phase de test.

Avant de mettre en œuvre l'algorithme de commande de vitesse du moteur BLDC, des essais préliminaires seront effectués sur un banc d'essai utilisant la carte Dspace Micro Lab Box.

III.2. Mise en œuvre d'algorithme de commande sur un banc d'essai

III.2.1. Banc d'essai

Cette figure (III-1) illustre le banc d'essai mis en place pour la validation expérimentale de l'algorithme de commande de vitesse d'un moteur BLDC. Le système est composé des éléments suivants :

Au centre : le moteur BLDC monté sur un support mécanique rigide, couplé à une charge (potentiellement un frein ou générateur à courant continu) pour simuler différentes conditions de fonctionnement.

À gauche : la carte **Dspace MicroLabBox**, utilisée pour le prototypage rapide et la mise en œuvre en temps réel de l'algorithme de commande. Elle est connectée à l'ordinateur via un câble USB ou Ethernet pour l'interface avec Simulink/Control Desk.

À droite : une alimentation stabilisée et un variateur de puissance assurant la fourniture d'énergie au moteur et aux cartes de commande.

En avant-plan : le poste de commande composé d'un écran et d'un clavier, permettant de lancer les simulations, surveiller les signaux en temps réel et ajuster les paramètres de commande.

Ce banc permet d'effectuer des essais en boucle fermée ou ouverte, de valider la réponse dynamique du moteur, et de tester différentes lois de commande avant leur implémentation sur la carte finale destinée à la trottinette électrique.

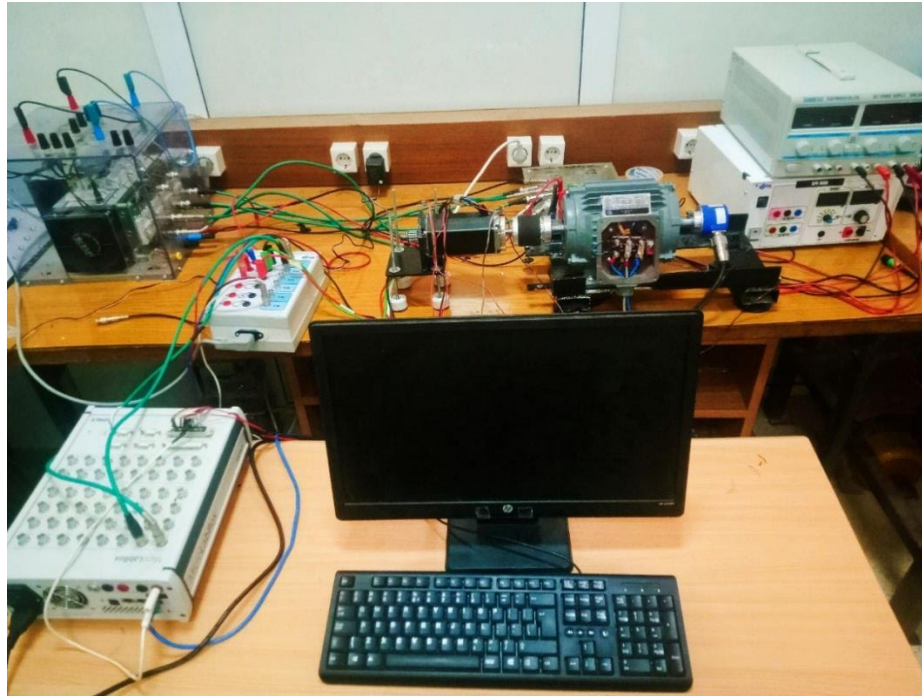


Figure III-1 : Le banc d'essai à base de Dspace Micro Lab Box

III.2.2. Principaux éléments du banc d'essai

III.2.2.1. La carte Dspace Micro Lab Box 1102

La figure montre la carte **MicroLabBox** de Dspace, un système de prototypage rapide très utilisé dans le domaine du contrôle embarqué et des systèmes mécatroniques. Cette plateforme est dotée d'un grand nombre d'entrées/sorties analogiques et numériques, configurables via l'environnement **Simulink**. Grâce à sa rapidité d'exécution et à sa compatibilité avec les modèles MATLAB/Simulink, la MicroLabBox facilite la validation des algorithmes de commande de vitesse et de couple en conditions quasi réelles.



Figure III-2 : Micro Lab Box 1102

III.2.2.2. Onduleur triphasé SEMEKRON

L'onduleur triphasé SEMIKRON est un convertisseur statique de puissance permettant de transformer une tension continue (DC), généralement issue d'une batterie ou d'une alimentation, en une tension alternative (AC) triphasée destinée à alimenter un moteur électrique, tel qu'un moteur BLDC ou asynchrone.

Les onduleurs triphasés de la marque SEMIKRON sont des modules de puissance compacts et robustes, intégrant souvent :

Des interrupteurs électroniques de type IGBT ou MOSFET disposés en pont triphasé (six transistors de puissance),

Des diodes de roue libre pour chaque interrupteur,

Des circuits de commande intégrés, parfois avec protections contre les surtensions, surintensités et surchauffes,

Des interfaces de commande compatibles avec des microcontrôleurs ou cartes de prototypage comme la MicroLabBox.

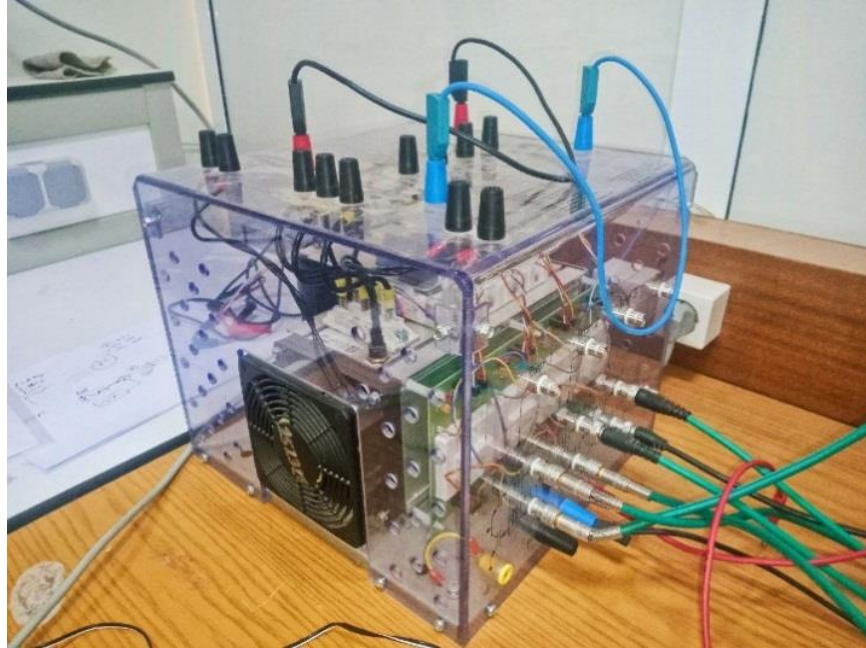


Figure III-3 : L'onduleur triphasé SEMÉKRONE

III.2.2.3. Le moteur BLDC et l'autotransformateur : cette figure III-4 présente le moteur bldc utilisé dans le banc d'essais avec l'autotransformateur qui permet de varier la tension Vdc.

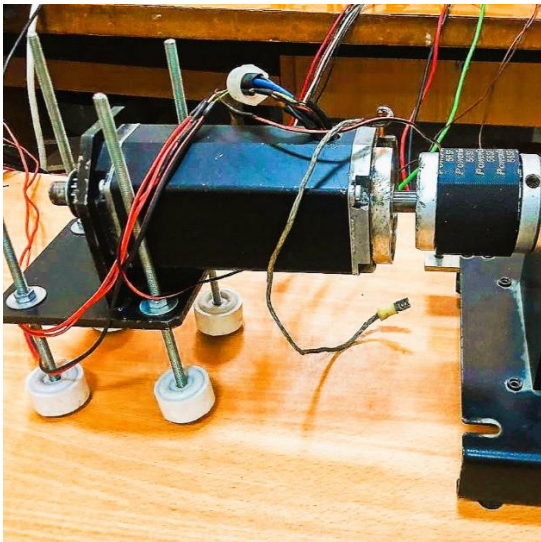


Figure III-4 : Le moteur BLDC et l'autotransformateur de l'alimentation

III.3. Algorithme de commande

Cette figure (III-5) montre un **modèle Simulink** utilisé pour générer les signaux logiques de commande nécessaires au pilotage d'un onduleur triphasé via une carte Dspace (MicroLabBox). Le modèle met en œuvre une logique combinatoire à partir des signaux de retour du système (capteurs et entrées numériques).

Les éléments clés du schéma :

Blocs verts (ADC et DIO IN) : représentent les entrées analogiques (courants ou tensions mesurées via ADC_CL1) et numériques (capteurs à effet Hall ou fin de course) provenant du système réel.

Blocs de conversion : les données entrantes sont converties en type booléen (boolean) pour être traitées logiquement.

Blocs logiques : des portes NOT et AND sont utilisées pour construire une logique conditionnelle combinée. Cela permet de générer des signaux précis pour l'activation ou la désactivation des interrupteurs de puissance de l'onduleur.

Blocs rouges (DIO OUT) : envoient les signaux de sortie logiques vers les ports numériques de la carte Dspace, qui les utilise pour commander les transistors (IGBT/MOSFET) de l'onduleur.

Ce type de structure est couramment utilisé dans les premiers essais d'algorithmes de commande **en boucle ouverte**, notamment pour tester la commutation des phases dans le cadre d'un moteur BLDC.

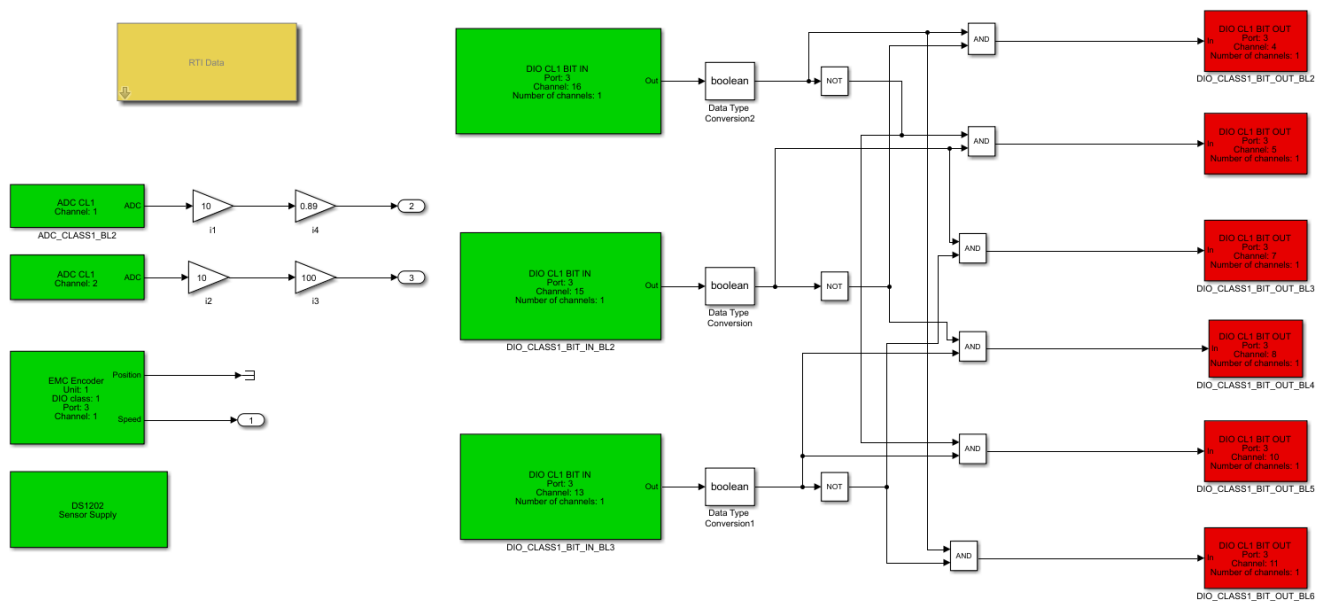


Figure III-5 : Schéma Simulink de génération logique des signaux de commande

III.4 Résultats expérimentaux

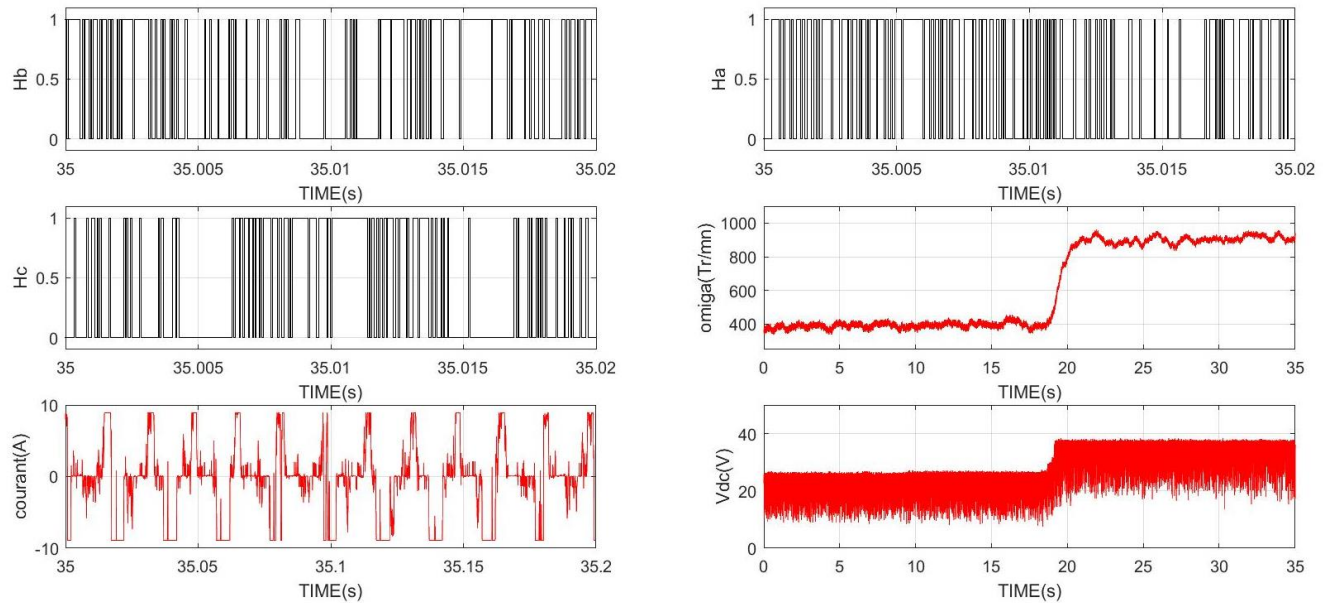


Figure III-6 : Résultats de simulation pour deux tensions successives

$V_{dc}=20\text{ V}$ et $V_{dc}=35\text{ V}$

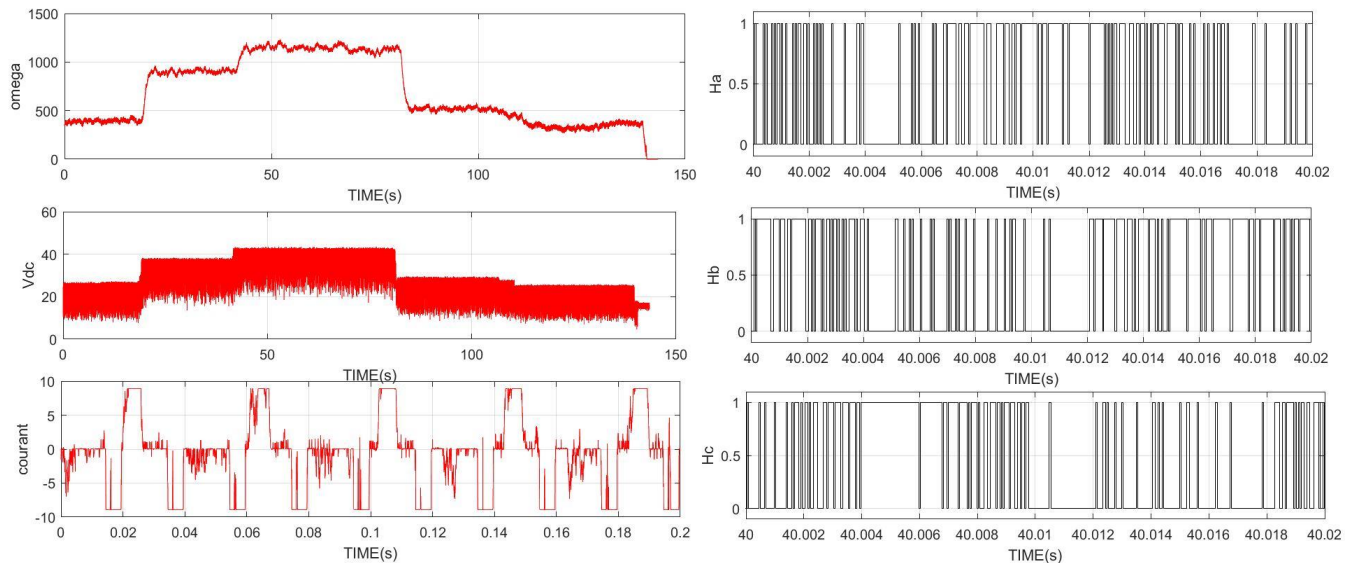


Figure III-7 : Résultats de simulation pour plusieurs tensions successives

$V_{dc}= 20\text{ V}$ $V_{dc}=40\text{ V}$, $V_{dc}=35\text{ V}$, $V_{dc}=38\text{ V}$, $V_{dc}=18\text{V}$

III.5 Interprétation des résultats

Les résultats obtenus à partir de la simulation Figur (III-6 et III-7) permettent de valider le fonctionnement du système de commande dans un environnement Dspace en temps réel. On peut en tirer les observations suivantes :

III.5 .1 Réponse de la vitesse :

Le moteur suit correctement la consigne de vitesse imposée à travers la variation de la tension d'alimentation. Une phase transitoire est observée au démarrage, suivie d'un régime permanent stable. Cela montre que l'algorithme de commande est correctement implémenté et que le moteur est capable de répondre aux variations de consigne.

III.5 .2 Commutation des phases :

L'analyse des signaux de commande logiques montre une séquence de commutation cohérente avec la topologie de l'onduleur triphasé. Cela confirme que les signaux issus de la carte Dspace ou du contrôleur logique sont synchronisés avec la position rotorique.

III.5 .3 Tension et courant des phases :

Les formes d'onde des tensions de phase présentent une commutation nette, typique d'une commande en six étapes. Les courants sont rectangulaires pour une commande trapézoïdale, ce qui est conforme au modèle de commande sélectionné.

III.6. Conception de la carte de commande

III.6.1 Schéma électrique de la carte

Le schéma de la figure (III-8) représente une **chaîne de conversion de puissance** combinant deux étages principaux : un **hacheur** (DC-DC) et un **onduleur triphasé** (DC-AC), utilisés pour alimenter et commander un **moteur brushless (BLDC)** dans une application telle qu'une trottinette électrique.

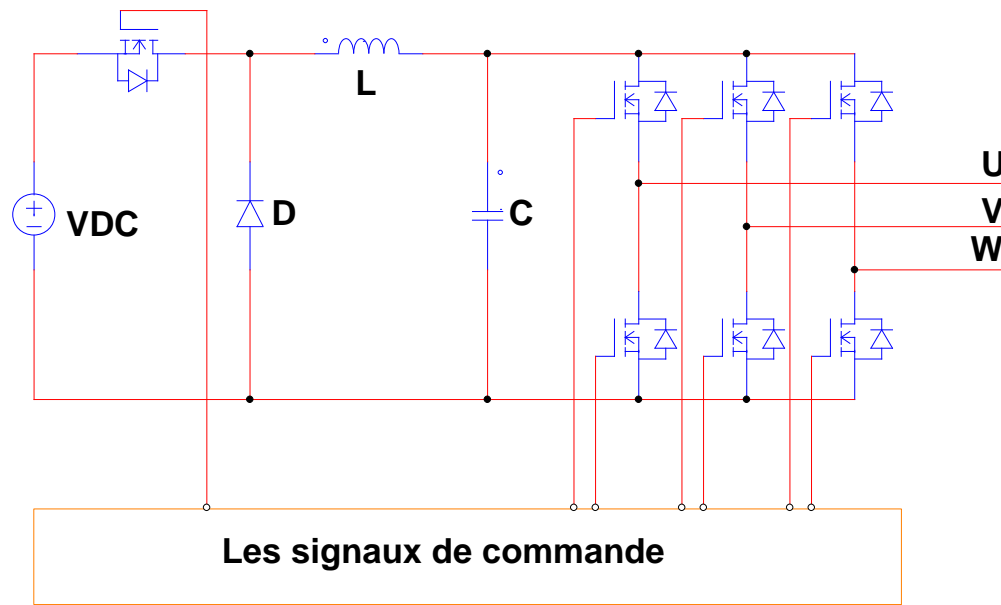


Figure III-08: Étage de conversion hacheur-onduleur pour la commande d'un moteur BLDC

III.6.1.1. Étape d'hacheur (DC-DC) :

- Le hacheur est responsable de la **régulation de la tension d'alimentation** du moteur.
- Il adapte la tension fournie par la batterie (généralement entre 24V et 48V) à une valeur requise pour le bon fonctionnement de l'onduleur.
- Cet hacheur peut être de type **abaisseur (buck)** ou **abaisseur-élevateur (buck-boost)** selon les besoins de la charge.

III.6.1.2. Étape d'onduleur triphasé (DC-AC) :

- Composé de **six interrupteurs électroniques** (souvent des MOSFETs ou IGBTs) disposés en **pont triphasé**, l'onduleur convertit la tension continue issue du hacheur en **tension alternative triphasée**.
- Cette tension est adaptée pour piloter un moteur BLDC via une commutation électronique.
- La **commande des interrupteurs** se fait via des signaux logiques générés en temps réel par une carte de commande (comme la **Dspace MicroLabBox**) en fonction de la position rotorique (capteurs Hall ou encodeur) et de la stratégie de commande (six-steps, FOC...).

III.6.1 .3. Objectif global du système :

- Garantir un **contrôle efficace de la vitesse et du couple** du moteur,
- Optimiser le **rendement énergétique** de l'ensemble,
- Assurer une **protection électrique** (contre les surtensions, surintensités, courts-circuits...).

III.7 Schéma PCB de la carte sur Proteus

Le schéma PCB présenté dans la figure (III-9) illustre une architecture de conversion de puissance typique dans les systèmes d'entraînement de moteurs BLDC. Il combine un **hacheur continu-continu (DC-DC)** en amont, utilisé pour ajuster dynamiquement la tension d'entrée selon les besoins de fonctionnement, et un **onduleur triphasé (DC-AC)** en aval, assurant la génération des tensions alternatives nécessaires à l'alimentation du moteur.

Cette double conversion permet d'**optimiser l'efficacité énergétique**, de **mieux contrôler la dynamique du moteur**, et d'**isoler les différentes étapes de la chaîne de puissance**. Les transistors de l'onduleur sont commandés à l'aide d'une stratégie de commutation numérique, en lien avec les retours capteurs (position). Cette solution est bien adaptée aux applications de mobilité électrique comme la trottinette, car elle offre **souplesse, réactivité et fiabilité** dans le contrôle moteur.

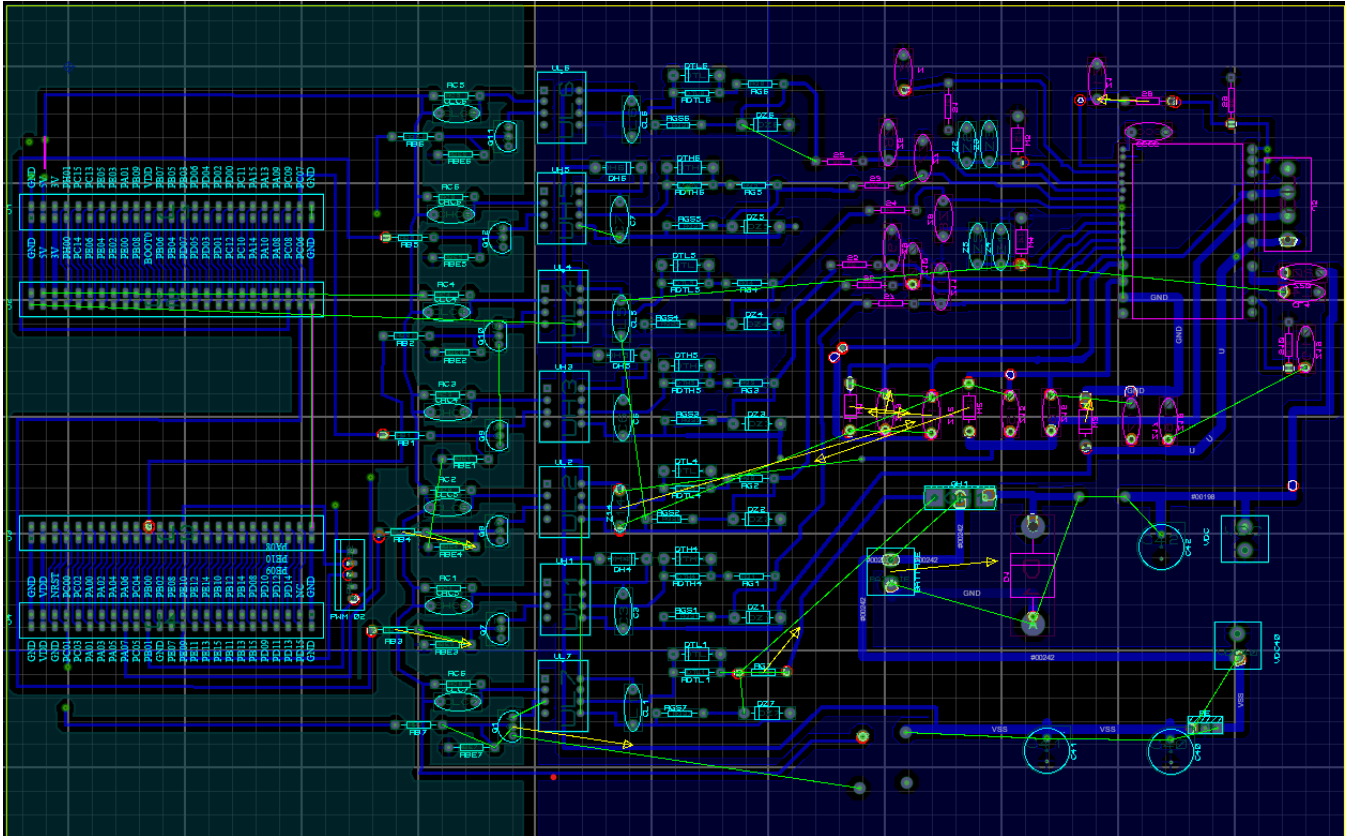


Figure III-09 :PCB de la carte de commande

III.7.1 Carte de commande réalisée

La carte de commande que nous avons réalisée figure (III-10) constitue le cœur du système de pilotage du moteur BLDC de la trottinette électrique.

Elle est conçue pour assurer la gestion dynamique du moteur en fonction des consignes de vitesse données par l'utilisateur, tout en garantissant la sécurité et la stabilité du système.

Cette carte intègre des composants essentiels comme le microcontrôleur STM32F407, des capteurs à effet Hall pour la détection de position rotorique, ainsi que des transistors de puissance MOSFET pour la commutation triphasée.

Elle permet non seulement de moduler la tension et le courant transmis au moteur, mais aussi d'appliquer des algorithmes de commande tels que la régulation de vitesse en boucle fermée.

Grâce à sa conception compacte, fiable et optimisée pour les faibles pertes énergétiques, cette carte offre un excellent compromis entre performance, coût et efficacité pour un système de traction embarqué.

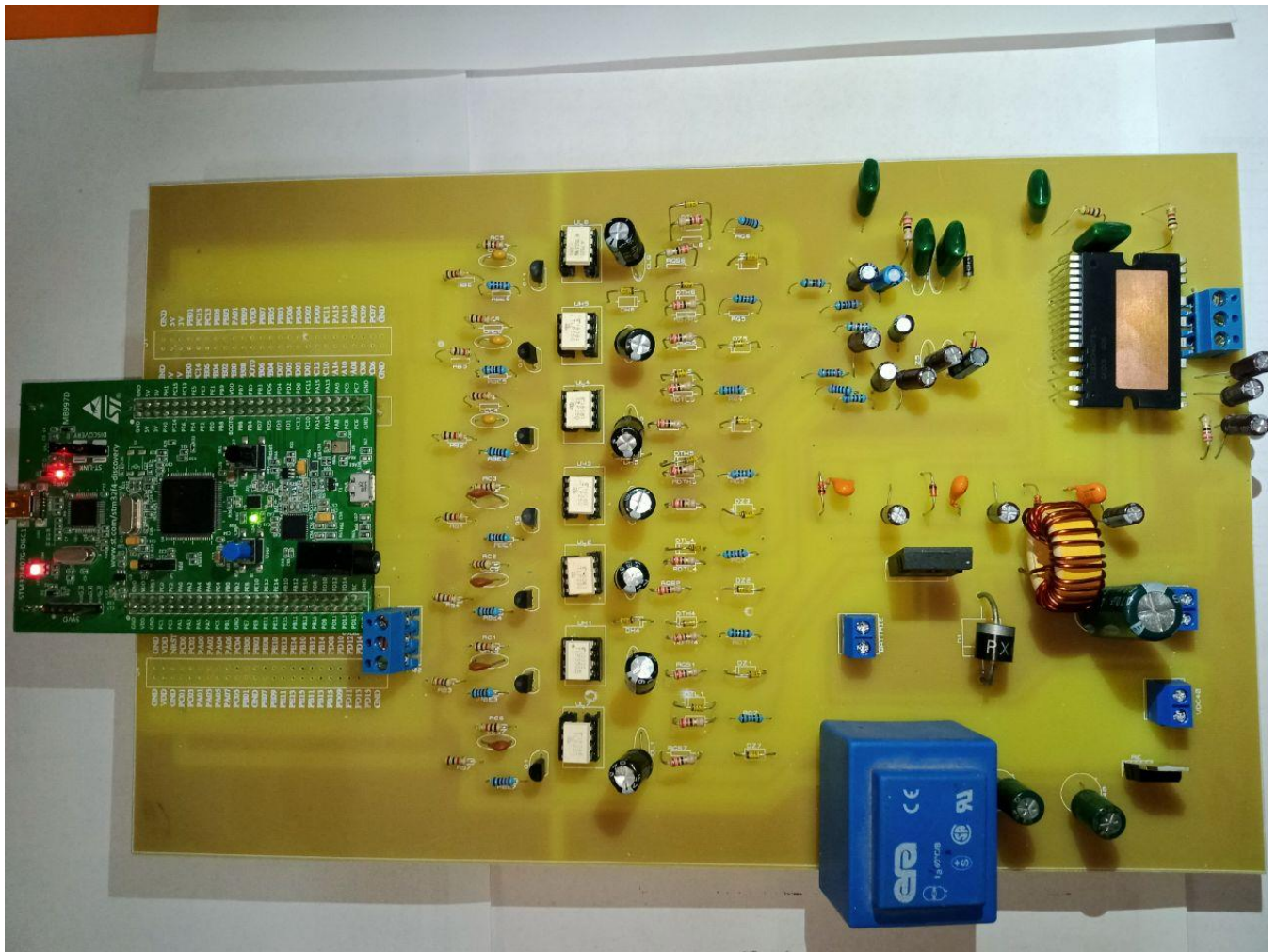


Figure III-10 :la carte de commande réalisée

III.7.1.1 Principaux éléments de la carte de commande

a) Le microcontrôleur STM32F407



Figure III-11 : kit de développement STM32F407

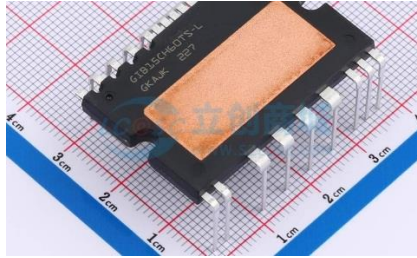
b) L'onduleur triphasé STGIB15CH60TS-L

Figure III-12 : L'onduleur triphasé STGIB15CH60TS-L

c) Le driver TLP 250

Figure III-13 : TLP 250

d) Le MOSFET IRFP460

Figure III-14 : IRFP460

III.8 Résultats expérimentaux

Cette figure (III-15) illustre un test de contrôle de la vitesse d'un moteur à courant continu sans balais BLDC à l'aide de la carte de commande électronique réalisée. Nous avons modifié la tension continue de l'entrée de l'onduleur triphasé à l'aide de l'hacheur série, de sorte que les tensions étaient successives. 20V, 35V, 38V, 22V, et 18V.

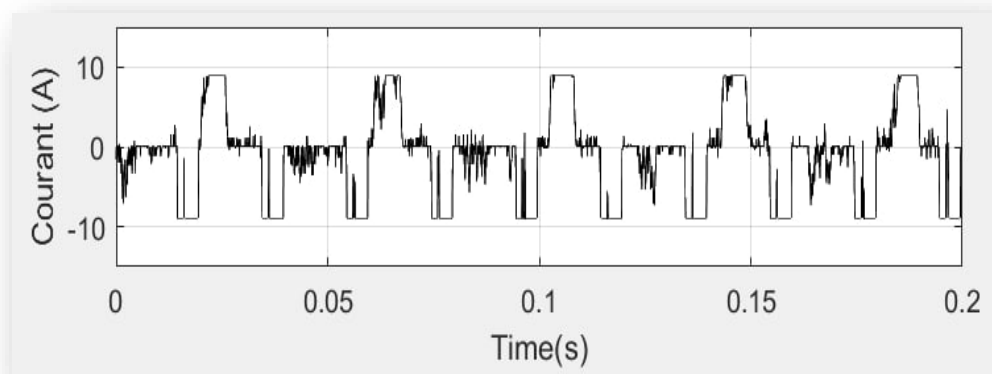
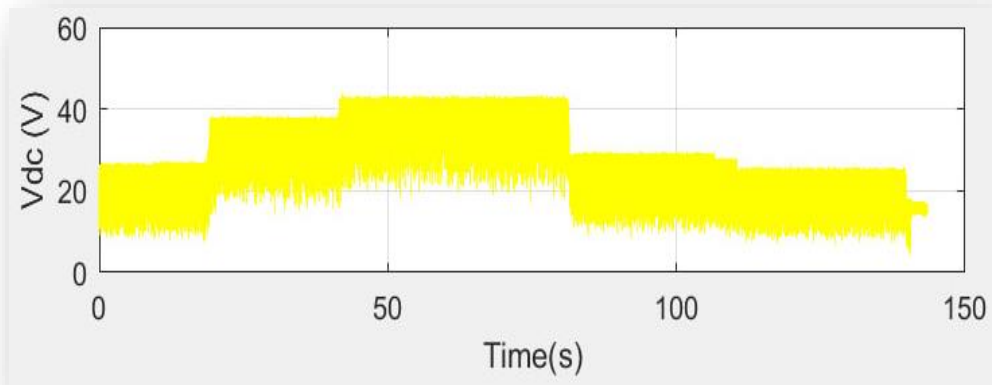
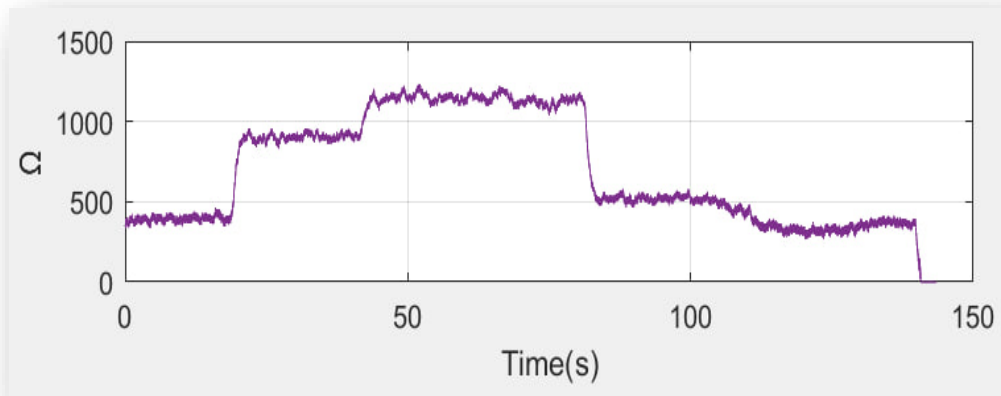


Figure III-15 : a) La vitesse, b) La tension , c) Le courant du BLDC

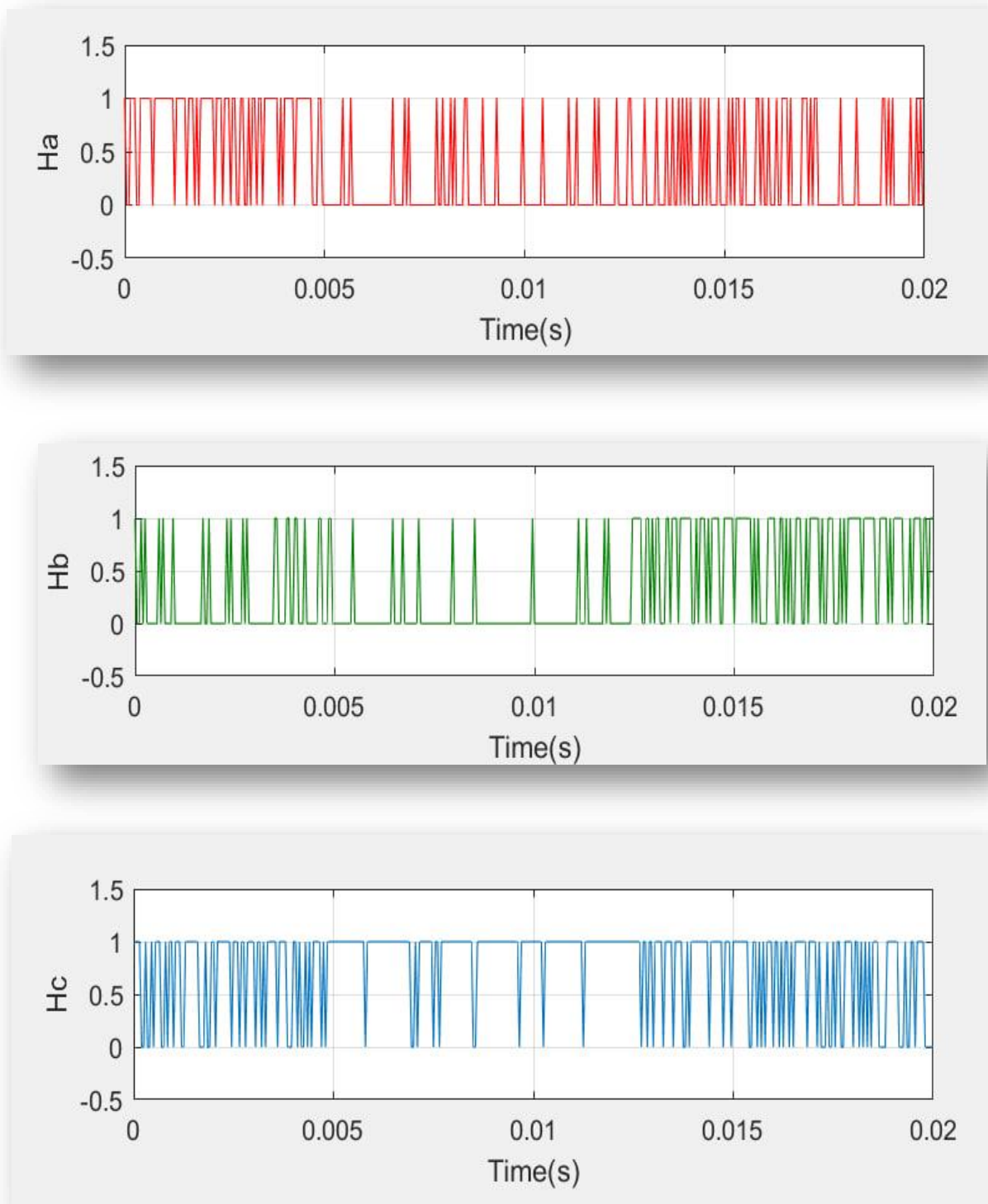


Figure III-16 :Signaux des capteurs à effet d’Hall

III.9 Interprétation des résultats

Nous avons observé que la vitesse du moteur figure (III-15) variait de manière très appropriée avec les tensions figure (III-15). L'effet de ce changement est également clairement visible dans les fréquences des signaux du capteur à effet Hall, illustrées dans la figure suivante figure (III-16).

Les capteurs à effet Hall jouent un rôle crucial dans la détection de la position angulaire du rotor. Dans un moteur BLDC, cette information est indispensable pour la commutation correcte des phases, car elle permet de synchroniser l'alimentation des enroulements du stator avec la position des aimants du rotor.

Lors de l'observation des résultats des capteurs à effet Hall du moteur BLDC, figures (III-16) trois signaux numériques (H1, H2, H3) apparaissent sous forme d'ondes carrées, chacune décalée de 120° électriques. Ces signaux indiquent la position instantanée du rotor et permettent de déterminer le moment exact où commuter les phases du moteur.

1. Forme des signaux :

- Les signaux sont carrés, alternant entre 0 V (état bas) et 5 V (état haut).
- Le déphasage entre chaque signal est d'environ 120° , ce qui est **caractéristique d'un moteur triphasé BLDC** correctement configuré.

2. Ordre de commutation :

- Si les transitions observées sont dans l'ordre : $H1 \rightarrow H2 \rightarrow H3 \rightarrow H1$ (et ainsi de suite), alors le moteur tourne dans le sens horaire.
- Si l'ordre est inverse ($H1 \rightarrow H3 \rightarrow H2$), alors le **moteur tourne dans le sens antihoraire**.

En analysant les signaux :

- Une **périodicité régulière** confirme une rotation stable du rotor.
- Une **fréquence élevée** des transitions indique une vitesse de rotation élevée.
- Des **signaux désynchronisés ou instables** peuvent révéler une erreur de câblage, un problème de capteur, ou une perte de synchronisme moteur.

III.10 Conclusion

Dans ce dernier chapitre pratique, la première partie a testé l'algorithme de contrôle de vitesse d'une trottinette électrique équipée d'un moteur BLDC en boucle ouverte sur un banc d'essai équipé d'une carte Dspace Micro Labox.

Les résultats ont été excellents, la vitesse de la trottinette étant contrôlée en faisant passer la tension d'alimentation continue de 0 à 40 volts. Dans la deuxième partie, nous avons développé une carte électronique pour contrôler la trottinette électrique équipée d'un moteur BLDC. Comme mentionné précédemment, elle comprend un microcontrôleur, un onduleur triphasé et un hacheur série.

Nous avons utilisé la carte électronique développée avec la trottinette électrique et les résultats ont été satisfaisants. La vitesse de la trottinette a été parfaitement modifiée en modifiant le rapport cyclique de l'hacheur série pour modifier la tension d'entrée de l'onduleur triphasé.

Conclusion Générale

Au terme de ce travail, nous avons abordé de manière structurée et cohérente les différentes étapes nécessaires à la conception d'une carte de commande dédiée à une trottinette électrique, en combinant les aspects théoriques, les choix techniques pertinents et les applications pratiques. Ce projet nous a permis d'approfondir notre compréhension du fonctionnement des moteurs sans balais (BLDC) ainsi que des défis liés à leur commande, tout en mobilisant des compétences dans des domaines variés tels que l'électronique de puissance, le contrôle embarqué et la modélisation de systèmes.

L'utilisation du microcontrôleur **STM32F407**, couplée à des outils logiciels comme **Simulink**, **Proteus** et la plateforme **DSPACE**, a permis de développer un système de commande fonctionnel, fiable et capable d'assurer la gestion efficace d'un moteur BLDC. Le projet a également inclus la conception du circuit imprimé, le choix judicieux des composants électroniques (puissance, isolation, commande), ainsi que la réalisation d'essais initiaux ayant permis de valider le bon comportement de l'ensemble.

Ce travail a renforcé notre conscience de l'importance des technologies embarquées dans le développement de solutions de mobilité durable, et nous a permis d'acquérir une expérience concrète dans la conception de systèmes réels. Il constitue ainsi une base solide pour de futures évolutions possibles, telles que l'ajout de nouvelles boucles de régulation ou l'optimisation énergétique du système.

Les références

Les références:

[1]: Corinna Baumgartner & Eckard Helmers (2024), “*Life cycle assessment of electric kick scooters: consolidating environmental impact quantification and concluding climate-friendly use options*”, *Environmental Sciences Europe* – étude LCA approfondie sur l’impact environnemental des trottinettes électriques urbaines

[2]: Article “Environmental Assessment of Electric Scooters” (2024), *Science Direct* – analyse comparative des émissions de gaz à effet de serre et facteurs de production liés aux trottinettes

[3]: Lucian Mihet-Popa (2022), “*A Review of BLDC Motor: State of Art, Advanced Control Techniques and Applications*”, ResearchGate – passe en revue l’état de l’art des moteurs BLDC, incluant leur structure, commandes avancées et défis techniques

[4]: Velobike – Comparing lithium-ion vs. lead-acid batteries in mobility scooters

[5]: Texas Instruments – “Trapezoidal Control of BLDC Motors Using Hall Effect Sensors”

[6]: IJEETC – “Mathematical Modelling of BLDC Motor for Automotive Applications”

[7]: ArXiv – “How to Model Brushless Electric Motors for the Design of Lightweight Robotic Systems” (Lee et al., 2023)

[8]: MathWorks – BLDC Motor (Three-phase)

[9]: Essam R. Al-Ammar et al. (2022) – “*Comparative Study of BLDC Motor Drives with Different Approaches*”, *World Electric Vehicle Journal*

[10]: Set Sciences (2019) – “*The Simulation of Mathematical Model of Outer Rotor BLDC*”