République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère De L'enseignement Supérieur

Et de la Recherche Scientifique

Université Dr .Yahia Farés De Médéa

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNIQUES

Département Génie Electrique et de l'Informatique

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme

Master en Génie Électrique

Option : commande et électronique industrielle

Thème

Etude et réalisation d'une plate-forme du véhicule électrique

Proposé et dirigé par:

Dr. BENMANSOUR Khelifa

Pr. ABDELLLAH EL HAJDJ Abdellah

Etudié par :

Mr. BELHOUT Ali

Mr. AMRANI Ameur

Promotion (2012)

Remerciements

Nous remercions en premier lieu notre dieu qui nous a donné

la santé et la patience

pour avoir terminer ce travail.

Nous remercions Messieurs K.BENMANSSOUR et AB.ABDELLAH ELHAJ, qui a suivi de très près ce travail, pour leur aide, leurs orientations pédagogiques dans l'élaboration de ce mémoire, et tous les conseils qu'ils nous ont prodigués pendant toute la durée de ce travail.

Nous adressons nos plus vifs remerciements aux membres du jury qui nous avons honoré pour le jugement de notre travail.

Nos remerciements vont également à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Nous exprimons nos sincères remerciements à toute l'équipe de laboratoire de recherche LMP2M ,R.REBHI et A.LAOUCINE .

Enfin, nous ne pourrons terminer ces remerciements sans remercier nos familles pour leurs aides, compréhensions, encouragements et soutiens, qu'elles nous ont apportés tout -au -long de nos études et à tous nos amis.

DEDICAES

D'une joie éclatante et d'un bonheur alarmant que je dédie cet humble travail, fruit de peines et de gloire :

A ma chère mère qui ne cesse de prier pour moi, qui, a éclairé mon chemin par son amour que dieu me la protège.

A mon très cher père qui a semé en moi la bonne volonté et l'objectivité, pour ces conseils et sa sérénité envers moi.

A mes très chers frères et sœurs : Mouhamed, Missoum, Amin, Amin, Rafik, Issmail, Fatma,Roko,Fatiha,Fadhila et a tout la famille ***BELHOUT.***

Sans oublier mon frère et binôme ***Amrani Ameur*** *et tout sa famille :*

et tout sa famille : Sofienne Hamza Abdelkader Yousef Okba Tayta Bouchnafa Ahmed Nacer Hattab Farid Nabil Ameur Nourdinne Moussa Moustafa .Mezati

A toute la promotion 2011-2012 électrotechnique sans exception

ALI

SOMMAIRE

I. introduction generale……...……...…….. 1

CHAPITRE I Généralité sur les Quades électrique

I .1. INTRODUCTION ……...…….…..3

I.1 Définition …….…...3

I.1.1 Historique ……4

I.1.2 Description générale de la chaîne de traction électrique …….…..4

I.1.2.1 Le moteur électrique …….…..4

I.1.2.2 Convertisseur statique ……5

I.1.2.3 Le bloc de commande et de contrôle …….....6

I.1.2.4 Source d'énergie …….….6

II.1.2.4.1 Batterie ……..…...6

II.1.2.4.2 Pile à combustible ……..6

I.1.2.5 Transmission mécanique ……...7

I.2 Eléments de base d'un quad ……...7

I.3 Présentation du marché du quad ……8

I.4 Constructeurs ……....9

I.5 Les différents types de quad …….……..10

I.5.1Le type de transmission ……..10

I.5.2 Le type de cylindrée …….....11

I.5.3 Le type de suspension ……....11

I.6 Les accidents de quad et leurs causes principales ……..…..12

I.7 Les différents types de renversements et leurs causes associées …….……....12

I.7.1 Les différents types de renversements ……..…12

I.7.2Le renversement latéral …….....13

I.7.3 Le renversement longitudinal ……...14

SOMMAIRE

I.7.4 Les conditions de renversement ……...15

I.8 Les paramètres qui mènent aux renversements…….....16

I.8.1 Les caractéristiques géométrique et dynamique intrinsèques à la conception

du véhicule …….....16

I.8.2 Le conducteur …….....17

I.8.3 Le terrain d'évolution …….....18

I.8.4 Les facteurs dynamiques qui influent sur le renversement …….....18

I.9Conclusion …….....19

CHAPITRE II Notions de base sur Le moteur à courant continu sans balais

II.1. Introduction…… …20

II.2. Constitution du moteur BLDC…….. 20

II.3. Principe de fonctionnement du BLDC.…….. 21

II.3.1. Principe de fonctionnement d'un moteur électrique ……...……. 21

II.3.2. Principe de fonctionnement du BLDC avec l'électronique de pilotage…….. 21

II.3.3. Caractéristiques du BLDC. ……..... 21

II.3.4. Autres modes de fonctionnement du BLDC ……..... 22

II.3.4.1. Fonctionnement forcé sans information de la position…..... 22

II.3.4.2. Fonctionnement forcé avec information de la position sans capteur. ……. 23

II.4. Technologies du moteur BLDC. ..……. 24

II.4.1. Le stator. ……. 24

II.4.2. Le rotor.……..… 25

II.4.3. Différents types du BLDC. ……..…….. 25

II.4.3.1. Moteur à rotor intérieur. ……..…… 26

II.4.3.2. Moteur à rotor extérieur. ……..... 27

II.4.3.3. Moteur à entrefer axial. ……... 27

SOMMAIRE

II.5. Alimentation du moteur BLDC. …… 28

II.5.1. Commutateur de puissance …… 29

II.5.1.1. Alimentation unidirectionnelle. …… 29

II.5.1.2. Alimentation bidirectionnelle. …… 30

II.5.2. Capteurs. …… 30

II.5.3. Logique de commande…. …… 32

II.5.4. Commande en tension ou en courant…… 34

II.5.4.1. Alimentation en tension.…… 34

II.5.4.2. Alimentation en courant…… 35

II.6. Quelques circuits spécialisés pour la commande du moteur BLDC…… 35

II.6.1. Le circuit L6235. …… 35

II.6.2. Le circuit 34929. …… 37

II.7.1 Hypothèses simplificatrices. …… 37

II.7.2 L'analyse dans le système de référence a, b,c…… 37

II.7.3 La force électromotrice induite. …… 41

II.7.4 L'équation mécanique du mouvement.…… 42

II.7.4.1 Vitesse du moteur. …… 42

II.7.4.2Couple électromagnétique. …… 42

II.8. Conclusion…… 43

CHAPITREIII Association MCC hacheur et réglage de vitesse en boucle fermée

III. 1 INTRODUCTION ……44

III.2 Commande par boucles imbriquées ……44

III.2.1 Principe de commande ……44

III.2.2 Les caractéristiques de régulation à boucle multiple ……45

SOMMAIRE

III.3 Simulation du modèle de la Mcc en boucle ouverte …….....46

III.5.2 Excitation séparé …….....50

III.5.2 Excitation série …….....50

III.3.1 Simulation de l'association de la Mcc avec l'hacheur ……..50

III.3.2 Simulation de l'association de la Mcc avec l'hacheur quatre quadrants ….....52

. III.4 Réglage en cascade de la Mcc …….....55

III.4.1 Synthèse de régulateur PI ……..55

III.5 Résultats de simulations en boucle fermé ……...….....57

III.6 Conclusion ……...60

CHAPITRE IV Réalisation

IV.1 Introduction…….....61

IV.1.1 Description détaillée du banc d'essai……..61

IV.2 Adaptation du moteur de traction…….....61

IV.3 La transmission mécanique…….....63

IV.3.1 La poulie de l'arbre moteur…….....63

IV.3.2 Définitions et calculs…….....62

IV.4 Approvisionnement en énergie……64

IV.4.1 Spécification des batteries utilisée……..64

IV.4.2 L'alimentation de Moteur…….....65

IV.2. 2eme Proposition avec trois roues……66

IV.2.1 Le moteur roue ……66

IV.2.1.3 Constitution du moteur Brushless……..67

IV.2.1.4 Moteur Brushless à rotor extérieur……68

IV.2.2 L'alimentation électronique du moteur bruschless……69

SOMMAIRE

IV.2.4 Contrôleur ……69

IV.2.4.1 Connecteur /Définition de fil ……70

IV.2.4.1 Connecteur /Définition de fil ……70

IV.5 Conclusion…….....71

Conclusion générale……...……...….72

INTRODUCTION GENERALE

L'idée d'utiliser l'énergie électrique pour mouvoir des véhicules n'est pas nouvelle, elle est née dès l'apparition des premiers moteurs électriques, les piles ayant été découvertes auparavant. Dès les années 1840, des prototypes de véhicules ferroviaires (Edinburgh, 1842) et de bateaux (Le Saint-Pétersbourg, 1834) furent propulsés par des moteurs électromagnétiques alimentés par des piles . A la fin du siècle dernier, plusieurs automobiles électriques, alimentées cette fois par des accumulateurs électrochimiques, furent réalisées. A cette époque où les moteurs thermiques étaient loin du stade actuel, il semblait que la propulsion électrique avait ses chances, on connaît la suite. Le véhicule électrique, connu dès 1890, a été utilisé jusqu'aux années trente, période à partir de laquelle le véhicule à moteur thermique le supplanta grâce à son autonomie.

Depuis 1980, le nombre de véhicules thermiques polluants, augmente de façon importante ; des solutions de substitution sont envisagées pour les grandes villes.

La solution électrique répond doublement aux exigences de la circulation urbaine, par son absence de pollution gazeuse et de nuisance sonore.

Le bon rendement est un avantage de second ordre quand l'électricité est produite par des centrales thermiques, et encore moins, nucléaires. Remarquons que, dans ce dernier cas, l'utilisation de l'électricité permet de réduire aussi la consommation d'hydrocarbures, ressource non renouvelable et particulièrement polluante. C'est la recherche d'une meilleure qualité de vie qui a relancé les études.

Actuellement, trois configurations de véhicules électriques sont utilisées ; ils se différencient par leur chaîne de traction.

1. Traction électrique classique

C'est la solution la plus répandue. Elle est constituée d'un groupe de batteries, d'un moteur électrique et d'une gestion électronique du courant. Le montage se fait sur véhicules légers de série, poids lourds, chariots élévateurs, tracteurs d'aérogares, tracteurs de bagages et deux-roues.

2. La traction bi-mode

La traction thermique classique est utilisée hors des villes ; la traction électrique classique s'utilise en ville.

3. La traction hybride

Il s'agit d'un groupe électrogène, entraîné par un moteur thermique ou par une turbine à gaz. Celui-ci produit du courant, qui recharge en permanence un groupe de batteries. Celles-ci débitent dans un moteur électrique de traction. En site urbain, le groupe est à l'arrêt et on a recours au moteur électrique.

Notre travail consiste à étude la motorisation d'une de quad électrique par une machine à courant continu associée à un hacheur quatre quadrant pour commandée la tension de l'alimentation de moteur électrique, et on applique cette étude sur un véhicule type quad .

Pour présenter notre travail, nous avons organisé notre mémoire en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présenterons des généralités sur la chaine de traction et le quad électrique et ses différentes configurations de motorisation.

Le deuxième chapitre, présenterons la modélisation de la moteur a courant continu , et aussi la modélisation de l'alimentation de moteur .

Le troisième chapitre, constitue une étude la commande de moteur a courant continu, par logicielle MATLAB.

Le quatrième chapitre, traite le passage de la version thermique du quad vers la version électrique, dans lequel nous allons discuter l'adaptation de moteur.

Enfin, nous terminerons par une conclusion qui débouchera sur les perspectives de développement de notre travail .

I Introduction

Ce chapitre a pour objectif de donner quelques généralités et définitions utilisées par la communauté scientifique travaillant sur ce vaste domaine qui est la quad électrique. Il commence par une définition et présentation de l'état de l'art de la traction électrique. Nous parlons aussi Sur différents types de quad électrique par rapport les éléments mécaniques, et les différents types de renversements et leurs causes associées.

I.1 Définition

Tout d'abord, le terme « quad » désigne les véhicules relevant de la catégorie des quadricycles à moteur. Ils ressemblent à la fois à l'automobile de par les quatre roues qui les constituent mais aussi à la moto de part la position et la conduite du pilote. Les quads sont des engins que l'on peut classer dans la catégorie des Véhicules Tout-Terrain (VTT) qui est le terme utilisé dans le domaine agricole) ou All Terrain Véhicules (ATVs) en anglais. A ce titre les types d'accidents qui peuvent survenir sur ce genre de véhicules dépendent abondamment du milieu dans lequel ils évoluent, que ce soit dans le milieu agricole, forestier ou même urbain. [1]

Le **quad** électrique, est un véhicule électrique, dont l'architecture est représentée par la figure I.1, est assurée par une machine électrique et une batterie utilisée comme la seul source d'énergie.

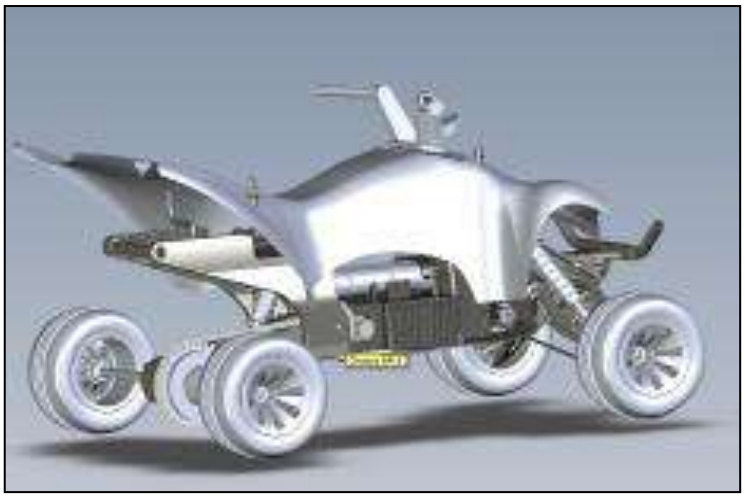


Figure I.1. l'architecture du quad

I.1.1 Historique

Le quad est apparu en premier lieu dans les pays nord-américains dans les années 1980 où il a connu un grand succès et historiquement il est apparu en France en 1986. A cette époque les demandeurs étaient principalement des agriculteurs et la fonction principale des quads était alors l'épandage d'engrais. Mais le marché du quad depuis 1990 est en progression constante, le parc français était constitué de 140 000 quads en 2005.

I.1.2 description générale de la chaîne de traction électrique

La chaîne de traction type d'un quad électrique peut être décomposée en plusieurs éléments essentiels : la batterie et son chargeur, le convertisseur statique, le moteur électrique de traction et sa commande, et la transmission mécanique dont la fonction est d'adapter la caractéristique mécanique de la charge à celle du moteur. Sans oublier les auxiliaires comme le système de refroidissement (air ou eau) du moteur et de son convertisseur d'énergie.

La figure **I.2.** suivante présente le schéma fonctionnel de la chaîne de conversion d'énergie d'un quad tout électrique.

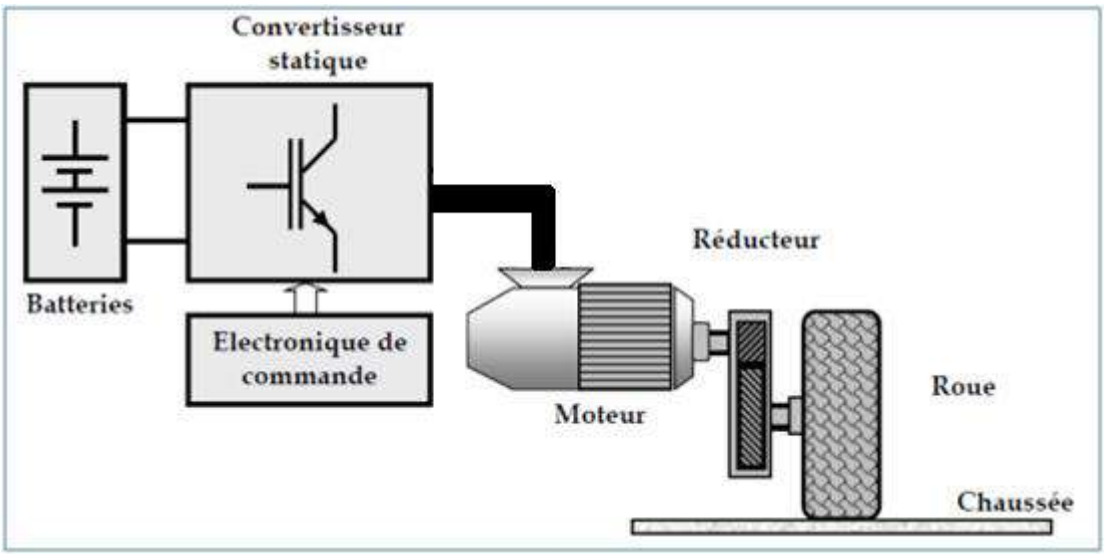


Figure I.2 .la chaîne de traction

I.1.2.1 Le moteur électrique

Le choix du moteur électrique d'un quad n'est généralement pas évident. Il faut dans un premier temps déterminer avec suffisamment de précision le travail qui sera

accompli par chacun des moteurs, s'il y en a plusieurs. Evidemment, pour pouvoir valider un type de moteur, il faut connaître les spécifications et les performances que nous désirons atteindre. Le problème est toutefois beaucoup plus simple lorsque nous connaissons les caractéristiques du moteur ainsi que le travail qu'il doit accomplir.

Le tableau ci-dessous résume les avantages et les inconvénients des moteurs électriques susceptibles d'être utilisés pour la motorisation d'une plates-forme mobile **[2, 3]**

Tableau I.1. Avantages et inconvénients des moteurs électriques.

	AVANTAGES	**INCONVENIENTS**
Moteur à courant continu	- Commande simple - Hautes performances dynamiques - Défluxage automatique	- Prix du moteur élevé. - Entretien périodique. - Puissance massique relativement faible
Moteurs asynchrones	- Faible prix du moteur - Moteur robuste - Puissance massique élevée - Rendement acceptable	-Electronique de commande relativement complexe et coûteuse - Tension d'alimentation élevée
Moteurs synchrones à aimants permanents	- Puissance massique élevée (avec aimants terres rares) - Rendement élevé - Freinage dynamique relativement facile	- Prix du moteur relativement élevé -Défluxage difficile
Moteur à réluctance variable	Couple massique élevé	- Mauvais facteur de puissance - Prix de l'électronique de puissance élevé

Dans notre cas, un moteur de type à courant continu. Car ce moteur il est simple Pour La commande

I.1.2.2 Convertisseur statique

Pour optimiser le rendement mais aussi pour obtenir un bon contrôle des Caractéristiques, l'utilisation d'un convertisseur statique à semi-conducteur semble incontournable.

Dans notre cas l'hacheur quatre quadrant permettra de faire la conversion continu/ continu pour le moteur à courant continu.

I.1.2.3 Le Bloc de Commande et de Contrôle

Le bloc de commande et de contrôle ″Contrôleur″ est le cerveau du système de propulsion, son rôle est de capter les informations d'état du système (vitesse de rotation, courants, etc.) de les traiter et d'agir en conséquence pour la génération des signaux de commande, appliquées au moteur électrique afin de gérer au mieux la consommation d'énergie.

I.1.2.4 Source d'énergie

Un des problèmes majeurs du véhicule électrique est la source d'énergie. Dans cette partie, nous présenterons de manière succincte deux voies technologiques possibles :

- Les batteries ;
- Les piles à combustible.

II.1.2.4.1 Batteries

Pour les véhicules électriques, la technologie utilisée actuellement est celle des batteries. Ces éléments permettant de stocker de l'énergie doivent remplir les conditions suivantes [4 ,5]

- Une bonne puissance massique (rapport puissance/poids en W/Kg) permettant de bonnes accélérations ;
- Une bonne énergie massique (en Wh/Kg) étant synonyme d'une bonne autonomie ;
- Une tension stable engendrant des performances régulières ;
- Une durée de vie élevée, calculée en nombre de cycles chargement/ déchargement, Conduisant à une diminution du coût pour l'utilisateur ;
- Disposer d'un faible entretien et constituer d'éléments facilement recyclables

II.1.2.4.2 Pile à combustible

La pile à combustible peut être une autre source d'énergie pour le véhicule électrique ainsi que pour d'autres applications. Système peu polluant, cela permettrait de passer à une autonomie supérieure à 400 Km [5]. Néanmoins, beaucoup de progrès restent à faire en

manière de fiabilité, longévité, et sécurité. Il faudra évaluer le coût des infrastructures et le bénéfice pour l'environnement. En effet, certains matériaux constitutifs tels que le platine restent coûteux.

I.1.2.5 Transmission mécanique

L'objet de la transmission de puissance mécanique est de relier la source d'énergie, le(s) moteur(s) électrique(s), aux roues motrices du véhicule ; il s'agit d'adapter la vitesse et le couple du moteur aux exigences fonctionnelles du véhicule. Un moteur électrique à un volume et une masse fonctions de son couple, aussi pour réduire la masse embarquée et le coût de la motorisation, on préfère généralement associer le moteur à un réducteur mécanique. Ceci permet de réduire le couple que doit fournir le moteur en augmentant sa vitesse de rotation. Et il y a aussi un autre système de transmission appelé la chaine .

Les avantages de la transmission mécanique sont nombreux [6 **] :**

- Elle évite un surdimensionnement du moteur et permet donc de limiter les coûts du convertisseur statique et les batteries. En effet, le réducteur permet de réduire le couple que doit fournir le moteur et donc la masse et le coût de celui-ci ;
- Elle autorise également des puissances massiques plus élevées.

I.2 Eléments de base d'un Quad

Un quad est constitué des sous-systèmes suivants[18] :

- Structure mécanique (cadre tubulaire) .
- Système de suspension (double triangle, bras oscillant*).*
- Système d'actionnement (moteur,résevoire , accélérateur, système d'allumage, …).
- Système de direction (guidon, …).
- Système de transmission de mouvement (chaine, différentiel, …).
- Pneus .

Ils sont illustrés sur la figure I.3 suivantes :

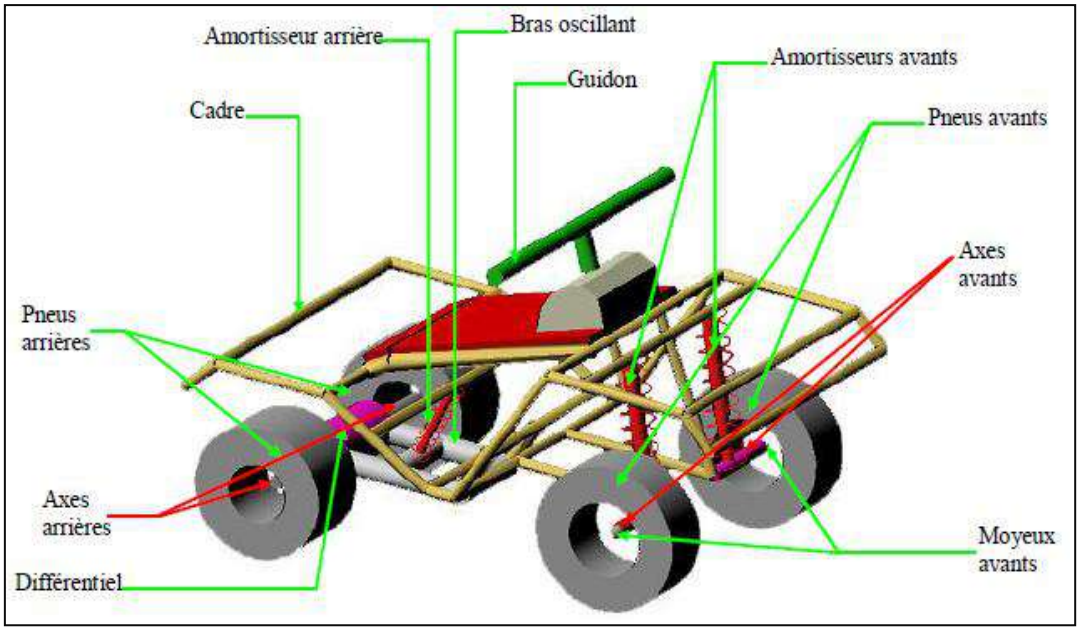


Figure I.3. Eléments de base d'un quad.

I.3 Présentation du marché du quad

En ce qui concerne le marché du quad en France, on peut dire que celui-ci a complètement explosé depuis Août 2003 qui correspond à la date d'homologation routière des quads. En effet près de 70 000 quads se sont vendus en 2 ans (2003 et 2004) avec près de 52 000 quads vendus en 2004 dont 40 000 quads homologués et donc susceptibles de rouler sur route. La France est l'un des pays où le quad connaît un essor considérable avec près de 1 quad pour 1 213 habitants en 2003 contrairement à l'Allemagne où l'on trouvait 1 quad pour 3 535 habitants soit trois fois moins qu'en France[1].

Voici Figure I.4. Une courbe d'évolution du parc français depuis 2000:

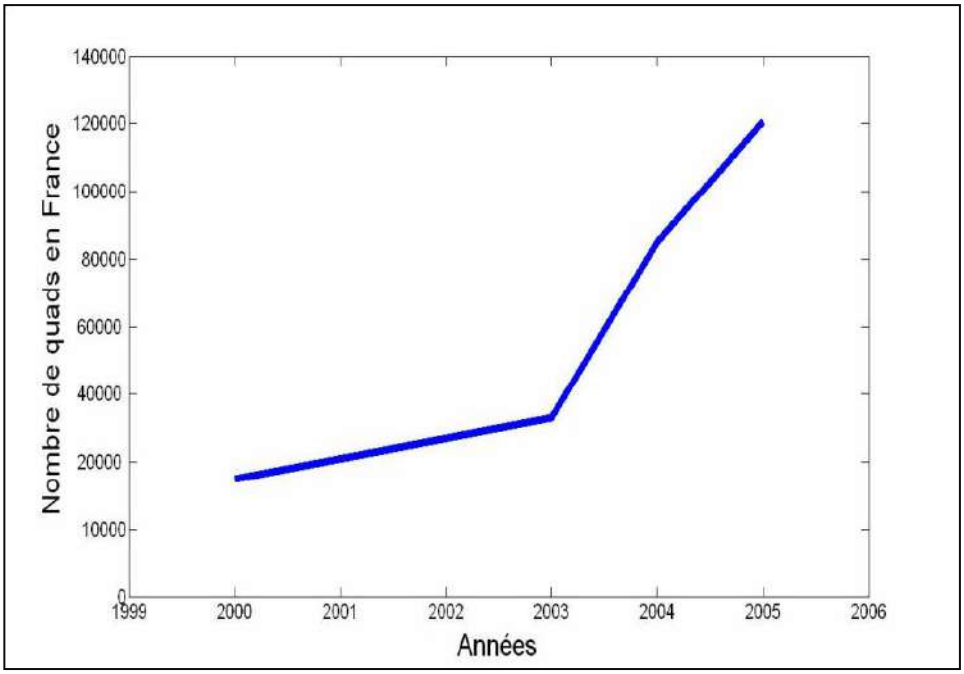


Figure I.4. Evolution du parc français de quad.

I.4 Constructeurs

Voici quelques constructeurs des quads :

- Arctic CAT
- Bombardier Produits récréatifs
- Gas Gas
- Honda
- Yamaha
- Kawasaki
- Kymco
- Polaris
- KTM
- Can Am
- Suzuki
- SMC
- TGB
- AXR
- SYM
- Hytrack
- Dinly.
- etc.

Aujourd'hui, les quads se sont séparés en familles :

- les quads de loisirs, allant de 150 à 300 cm^3, qui remportent un succès considérable auprès des familles ;
- les quads sportifs, souvent des quads 2x4.
- les quads utilitaires, bénéficiant souvent d'une transmission 4x4 et d'une boîte automatique ou à variateur, franchissent aisément toutes sortes de terrains. Les quads démunis de différentiel sont peu adaptés à la route.

- les quads enfant,
- les quads agricoles.

I.5 Les différents types de quad

Les quads peuvent être également classés en fonction des éléments mécaniques qui les composent, on distingue généralement les caractéristiques et éléments mécaniques suivants : le type de transmission, le type de cylindrée le type de suspension.

I.5.1 Le type de transmission

Les quads peuvent être de deux types soit à quatre roues motrices (4*4) soit à deux roues motrices (4*2). Dans le cas des deux roues motrices, ce sont les roues arrières qui sont reliées au moteur pour transmettre le couple, voire Figure I .5.a , Figure I.5.b, donc il s'agit de véhicule à propulsion (d'où le risque de cabrage).

Le dernier élément de la transmission qui permet de différencier les types de quad est la présence ou non d'un différentiel. Un différentiel est un dispositif mécanique qui permet aux roues de ne pas tourner à la même vitesse, ce qui est un avantage certain en virage où la roue intérieure est censée tourner moins vite que la roue extérieure au virage.

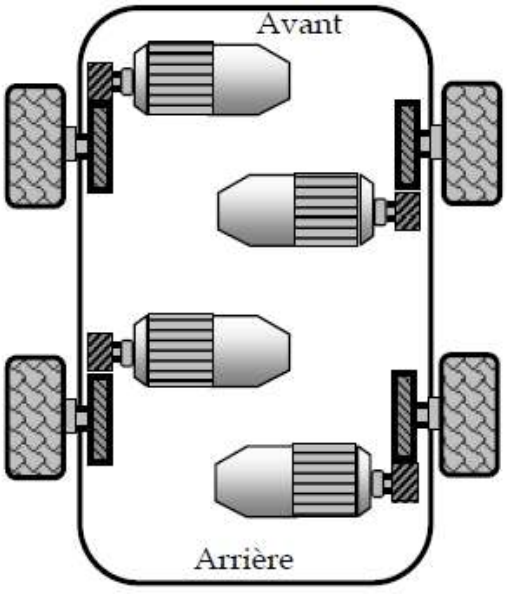


Figure I .5.a. quatre roues motrices (4*4).

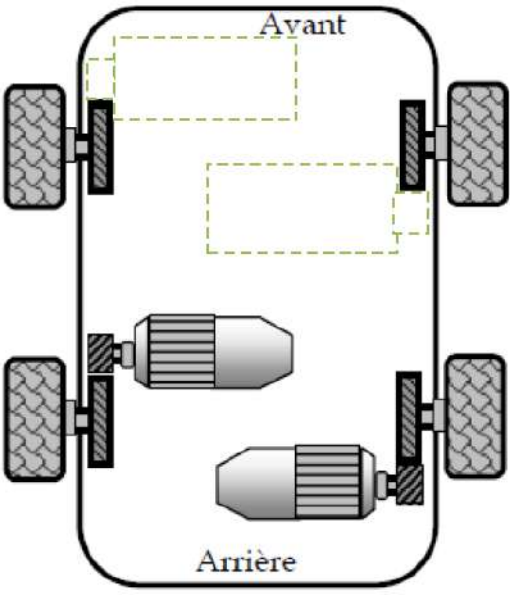


Figure I.5.b. deux roues motrices (4*2).

I.5.2 Le type de cylindrée

La cylindrée des moteurs peut varier entre 50 cm^3 pour la plupart des quads pour enfant et 650 cm^3 pour les quads utilisés dans le domaine forestier ou agricole pour la traction. La vitesse peut atteindre 130 km/h et le poids à vide varie entre 200 et 400 kg. On peut aussi distinguer plusieurs types de quads en fonction des éléments mécaniques qui les composent.

Ainsi, on peut distinguer les grosses cylindrées étant utilisées soit pour le sport, soit dans le secteur agricole et les petites cylindrées pour les quads enfant.

I.5.3 Le type de suspension

La suspension des quads est constituée de la combinaison entre le bloc de suspension arrière et le bloc de suspension avant.Ces deux blocs peuvent être des deux types suivants :

- **Le type « bras oscillant »**

Il s'agit du type de suspension qui équipe la plupart des motos. Le système est constitué d'un bras relié au cadre par une liaison pivot et un amortisseur placé entre les deux comme le montre le Figure I.6 :

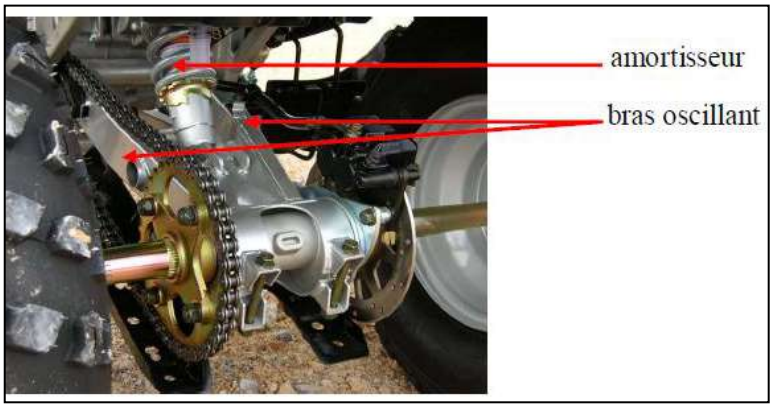


Figure I.6. Suspension de type bras oscillant.

Remarquons que ce type de suspension est uniquement placé à l'arrière du quad, il impose le fait que l'arbre de transmission de l'essieu arrière travaille en flexion, ce qui peut présenter des problèmes de fatigue mécanique.

- **Le type « double triangle »**

Ce type de suspension est aussi utilisé sur les automobiles. Il a l'avantage de découpler la suspension de chacune des roues qui composent l'essieu. Pratiquement tous les quads

sportifs ont ce type de montage à l'avant et à l'arrière, au même titre qu'ils ont généralement une transmission de type 4*4 avec un différentiel à l'avant et à l'arrière. Voici **Figure I.7**

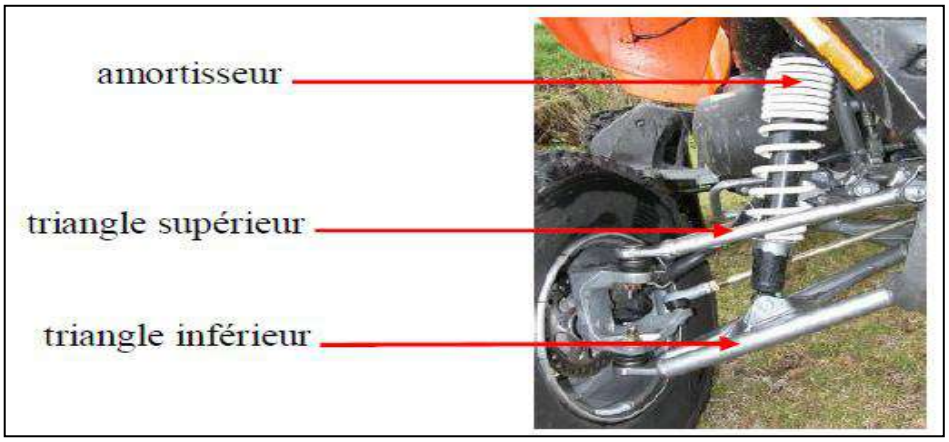


Figure I.7. description du montage "double triangle".

I.6 Les accidents de quad et leurs causes principales

Une étude a été menée par la le HSE (Health and Safety Exécutive, ministère de la santé britannique) a notamment publié une étude [7] sur les risques liés à l'utilisation des quads électriques en Angleterre. On apprend alors qu'en moyenne deux personnes meurent chaque année dans des accidents de VTT et qu'environ mille personnes sont blessées dans ce type d'accidents. Les causes principales de ces accidents sont :

- un manque de formation et d'expérience des conducteurs,
- le manque de protection du conducteur et de l'engin,
- une vitesse excessive,
- le transport d'un deuxième passager ou d'une charge déséquilibrée,
- les chocs avec des obstacles de types fossé, racine, bosse, …,
- le remorquage de charge excessive sans équipement de freinage,
- une forte pente combinée avec d'autres facteurs comme la nature du sol, le chargement.

Par conséquent, il paraît indispensable de s'intéresser aux renversements de ce type de véhicule qui peuvent être de plusieurs formes.

I.7 Les différents types de renversement et leurs causes associéés

I.7.1 Les différents types de renversements

Les types de renversements peuvent être classés dans différentes catégories, ainsi R. Eger dans ses travaux [8] distingue deux catégories de renversement :

- la première catégorie correspond aux risques dus aux impacts entre l'engin et un obstacle comme une pierre ou une racine,
- la deuxième catégorie correspond quant à elle aux renversements qui sont dus aux mauvaises manœuvres telles que les virages en dérapage, les fortes accélérations dans des terrains très pentus, …

D'autres catégories de renversements ont néanmoins été recensées, ainsi T. Grift [9]. décompose les renversements en deux nouvelles catégories :

- les renversements imprévisibles qui correspondent aux renversements du véhicule rapide dans lesquels le conducteur ne peut pas intervenir pour modifier la dynamique de son véhicule car son temps de réaction est trop long,
- les renversements prévisibles qui correspondent aux renversements du véhicule assez lents pendant lesquels le conducteur pourrait intervenir afin d'éviter l'accident.

D'après ces différents classements, on constate la nécessité d'employer des moyens technologiques ou automatiques et donc mécatroniques pour contrer les renversements des VTT surtout s'il s'agit de renversements imprévisibles. Il est alors nécessaire de présenter les renversements (au sens physique) qui peuvent avoir lieu sur un quad.

I.7.2 Le renversement latéral

Voici tout d'abord **Figure I.8.** d'un quad dans une position propice au renversement latéral (décollement de deux roues) :



Figure I.8. Position à risque de renversement latéral d'un quad.

Ce type de renversement a été étudié par plusieurs équipes de chercheurs mais pour la plupart dans le cas de véhicules urbains. On peut notamment citer A. Hac [10] et B. Johansson [11] pour leurs travaux sur les SUVs (Sport Utility Vehicles) ou encore les travaux de D. Odenthal [12] sur les renversements de véhicules routiers. Ce type de renversement est principalement dû à la forte accélération latérale que peut subir l'engin dans différentes situations : virage, dérapage, … Pour étudier le comportement du véhicule, la modélisation consiste en général à se placer dans le plan de roulis du véhicule pour déterminer les conditions qui peuvent mener au renversement. Ainsi le plan de roulis est l'un des trois plans utilisés pour caractériser la dynamique du véhicule. Le schéma suivant présente le repère caractéristique du quad :

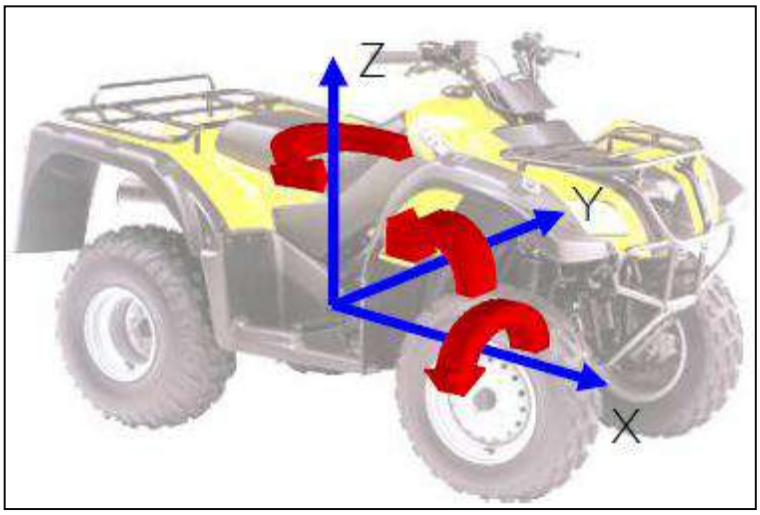


Figure I.9. repère caractéristique du quad.

L'axe de roulis correspond à l'axe X, l'axe de tangage correspond à l'axe Y et l'axe de lacet correspond à l'axe Z. Cependant, pour l'étude des renversements, on se place généralement dans les plans suivants :

- le plan de tangage qui correspond au plan (X,Z),
- le plan de roulis qui correspond au plan (Y,Z),
- le plan de lacet qui correspond au plan (X,Y).

I.7.3 Le renversement longitudinal

De la même manière que précédemment voici **Figure I.10** d'un quad en position de cabrage (accélération trop grande et position du centre de gravité sur l'arrière du quad) :



Figure I.10. Le renversement longitudinal.

Ce type de renversement a moins été étudié ces derniers temps, seuls quelques travaux tels que ceux de B. Falah [13] sur le comportement dynamique et la stabilité des quads ou ceux de K. G. Baass [14] ont traité de la stabilité longitudinale des véhicules, sachant que pour la modélisation, l'étude s'effectue principalement dans le plan de tangage (voir Figure I.9, page 10). Remarquons aussi que le renversement longitudinal ne se limite pas uniquement au cabrage mais englobe aussi le renversement du véhicule en descente lors de freinage par exemple (renversement avant).

Une remarque doit être faite sur le fait que ces deux types de renversement ne sont pas les seuls à survenir en quad, d'autres types de renversement peuvent être identifiés comme le renversement de véhicule lorsqu'une roue reste bloquée dans une ornière. Cependant les deux renversements présentés représentent une grande majorité des accidents qui surviennent en quad, le renversement latéral étant privilégié dans notre étude.

I.7.4 Les conditions de renversement

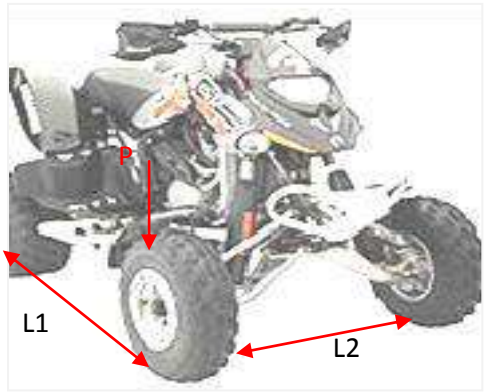
Les conditions pour le renversement, notamment le renversement latéral, ont été explicitées de plusieurs manières dans la littérature. Certains chercheurs posent la condition qu'au moins une roue doit être décollée du sol pour que le véhicule se renverse latéralement (voir [11], [8]) alors que d'autres considèrent que le véhicule se renverse latéralement si deux roues du même côté du véhicule ne sont plus en contact avec le sol (voir [12], [13]), c'est cette dernière condition que nous retiendrons dans la suite de notre exposé.

Après avoir présenté les différents types de renversements, une question se pose : quels sont les paramètres qui influent sur le renversement du véhicule ?

I.8 Les paramètres qui mènent aux renversements

I.8.1 Les caractéristiques géométrique et dynamique intrinsèques à la conception du véhicule

Avant de présenter les problèmes de conception liés aux quads, nous allons présenter un schéma récapitulatif des différentes longueurs caractéristiques du quad :



G : Centre de gravité

P : Poids du quad

L1 : Empattement

L2 : Voie

Figure I.11. Longueurs caractéristiques d'un quad .

Il convient de rappeler que les renversements des VTT et plus particulièrement des quads sont nécessairement dus à plusieurs types de paramètres qui viennent modifier la dynamique d'un véhicule pas très bien conçu. En effet les paramètres de conception des quads influent sur la facilité que possède celui-ci à se renverser. P. Wenzel [14] of Michigan. Berkeley : U.S.A. 2004] dans ses travaux menés sur les accidents de différents types de véhicules tels que voiture, camion, tracteur, …démontre que les risques d'accident sur un véhicule sont inversement proportionnels à la masse, à la

hauteur du centre de gravité du véhicule, ainsi qu'à l'empattement du véhicule. Or si l'on s'appuie sur la base de données des quads conçue par N. Trouillet [15].

Lors de son stage de fin d'études, la masse moyenne d'un quad à sec est d'environ 270 kg, l'empattement d'environ 1 250 mm, la voie moyenne de 950 mm et la hauteur du centre de gravité d'environ 1 m, il est alors logique de considérer que le nombre d'accidents sera important pour les quads à la vue de ses dimensions caractéristiques par rapport à celles des autres véhicules tels que les automobiles.

De plus K. G. Baass [16] distingue à son tour les problèmes de conception des quads qui les rendent instables, ces problèmes de conception sont :

- l'absence de différentiel sur certains quads,
- la hauteur du centre de gravité,
- le court empattement et la faible voie.

Par contre, même si ces problèmes de conception peuvent être à l'origine du renversement du véhicule, ils sont à l'origine d'une grande maniabilité que recherchent les conducteurs sur ce genre d'engins.

I.8.2 Le conducteur

Une deuxième perturbation à l'origine du renversement du quad reste la présence du conducteur qui d'après K. G. Baass [16] peut représenter jusqu'à 30% du poids total du système « véhicule + conducteur ». Le conducteur, de par sa masse mais aussi sa position, influe directement sur le comportement dynamique du véhicule jusqu'à parfois le rendre instable. Cette situation peut être encore pire s'il y a un deuxième passager sur le quad comme le signale B. Falah [13] dans son rapport où il met en évidence que la stabilité du véhicule est très réduite en présence d'un deuxième passager. Ce dernier modifie largement le poids du véhicule mais aussi la position du centre de gravité du système « quad + passagers » puisqu'il y a un manque de contrôle sur le deuxième passager .

Par conséquent, le comportement du pilote va jouer un grand rôle sur la dynamique du véhicule et sur les accidents que peuvent subir les VTT, donc il sera nécessaire de prendre en compte ce facteur dans la modélisation de notre système. On pourra par exemple créer un mannequin numérique sous le logiciel Adams afin d'étudier le comportement du quad sous l'influence de l'inertie d'un conducteur.

I.8.3 Le terrain d'évolution

Un paramètre important qui influe sur le comportement du véhicule est l'état du terrain dans lequel évolue le quad, qui d'après A. Hac [10] est un élément prépondérant dans la stabilité du véhicule, que ce soit au niveau de son inclinaison, de sa texture (asphalte, gazon, terre, …), des obstacles qu'il peut présenter (racine, pierre, eau, …) ou encore de la trajectoire à suivre (virage, freinage, accélération, …).

L'état de la route sera un élément important pour l'étude du renversement des quads surtout dans le secteur agricole ou la liaison véhicule/sol reste très importante à la vue des utilisations qui sont faites de ces engins.

Il se pose alors le problème de la perception et de la caractérisation du terrain dans lequel évolue l'engin. Il est nécessaire de savoir quels types de capteurs extéroceptifs ou proprioceptifs pourront être utilisés pour renseigner le véhicule sur l'état du terrain ou de renseigner des effets de la route sur la dynamique du quad. Il faudra aussi réfléchir sur la nécessité d'utiliser des observateurs pour reconstruire des données relatives au type de terrain, bien que certaines caractéristiques de celui-ci ne puissent être connues.

I.8.4 Les facteurs dynamiques qui influent sur le renversement

Plusieurs facteurs dynamiques sont à l'origine du renversement du véhicule. R. Eger [8] ainsi que P.Gaspar [17] distinguent les différents paramètres dynamiques, qui influent sur le renversement suivant :

- L'accélération latérale qui crée une force d'inertie agissant sur le renversement latéral du véhicule et qui est engendrée par l'angle de braquage, la vitesse du véhicule, …

- L'accélération longitudinale qui peut être à l'origine du renversement longitudinal et donc du cabrage.

Après avoir présenté les différents facteurs qui influent sur le renversement, il convient de présenter les modèles qui permettent de décrire ces différents renversements.

I.9 Conclusion

Dans cette première partie, nous avons donné des généralités sur la traction électrique, puis nous avons présenté les quad électrique, L'accèdent a été mis sur le choix d'une configuration de plateforme à deux roues motrices en avant et à roues folles en arrière.

Dans le chapitre suivant, nous présentons le modèle de la machine à courant continu, et modélisation de l'alimentation de la machine utilisée.

II.1 Introduction

Récemment, des moteurs à c.c ont été graduellement remplacés par des moteurs BLDC puisque les applications industrielles exigent des actionneurs plus puissants ont de faible encombrement. La souplesse à la commande, la longue durée de vie due à l'absence de la commutation mécanique ainsi qu'il présente moins de bruit acoustique sont les principaux avantages de ce moteur .Leur principal inconvénient est la nécessité d'avoir une électronique de contrôle. Mais cet inconvénient est dépassé grâce au progrès réalisé dans les domaines de l'électronique de puissance et l'arrivé des nouveaux calculateurs numériques très sophistiqués ce qui permet de réaliser des variateurs performants. Dans ce présent partie on va étudier le principe de fonctionnement de ce moteur.

II.2 Constitution du moteur BLDC

Les moteurs Brushless sont constitués de 3 éléments principaux :

- Une partie fixe, le stator, muni de trois groupes de bobines, appelées les trois phases du moteur. Ces bobines fonctionnent comme des électro- aimants et permettent de générer diverses orientations du champ magnétique régulièrement réparties autour de l'axe central du moteur.
- Une partie tournante, le rotor, muni d'aimants permanents. Comme l'aiguille d'une boussole, ces aimants vont en permanence entraîner le rotor pour tenter de s'aligner sur le champ magnétique du stator. Pour une durée de vie optimale du moteur, le rotor est monté sur roulements à billes.
- Trois capteurs magnétiques à " effet Hall ". Ces capteurs permettent de connaître à chaque instant la position des aimants du rotor [21].

La machine à courant continu sans balais se présente généralement munie de ses capteurs de position. Ses connexions extérieures comprennent donc les bornes des enroulements et les bornes des capteurs.

Remarques :

Il existe quelques réalisations des moteurs BLDC dans lesquelles il est intégré l'électronique effectuant les commutations. La machine ne comporte alors que deux fils comme un moteur à courant continu classique.

On peut trouver également des moteurs BLDC qui ne possèdent pas de capteurs. C'est le cas des moteurs désigné pour la commande sans capteurs appelé aussi « Sensorless

Control », dans ce cas le contrôleur utilise la force contre électromotrice crée par la rotation du rotor au passage devant les bobines pour déterminer la position du rotor, ceci sera détaillé plus tard. La machine ne comporte alors que trois fils comme une machine synchrone à aimant permanent.

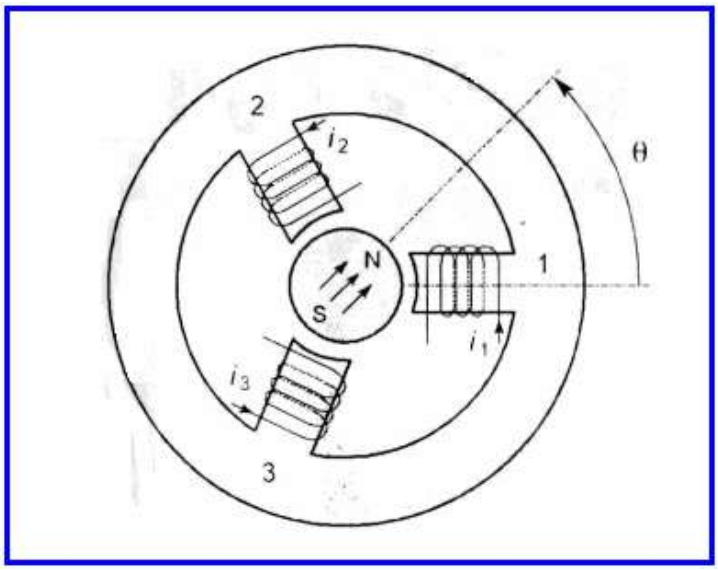


Figure II.1 Structure élémentaire d'un moteur a courant continu sans balais

II.3 Principe de fonctionnement du moteur BLDC

II.3.1 Principe de fonctionnement du BLDC avec l'électronique de pilotage

L'étude du moteur lui-même est indissociable de celle de l'électronique qui lui est associée. On a en fait une machine alternative qui est transformée en moteur à courant continu quand on y inclut les circuits électroniques assurant les commutations. L'électronique de pilotage détermine la position du rotor à partir des capteurs à effet Hall. Elle en déduit l'orientation à donner au champ magnétique du stator. Au cours de la rotation, elle commande les trois bobines pour ajuster régulièrement l'orientation du champ à la position du rotor, de façon à entraîner celui-ci dans le sens choisi par l'utilisateur .

II.3.2 Caractéristiques du BLDC

Considérons le cas le plus courant, la machine triphasée. Lorsque le rotor est en mouvement, les enroulements sont le siège de forces contre-électromotrices induites. Leur

variation dépend de la forme des aimants et de la répartition des conducteurs le long de l'entrefer ainsi que la position du rotor. Dans les moteurs à courant continu sans balais, on souhaite alimenter les enroulements par des courants en créneaux pour simplifier l'électronique correspondante. Alors, les constructeurs font en sorte qu'à vitesse fixe, la variation des forces contre-électromotrices en fonction de la position du rotor soit trapézoïdale afin d'obtenir un couple constant figure (**II**.2) [21].

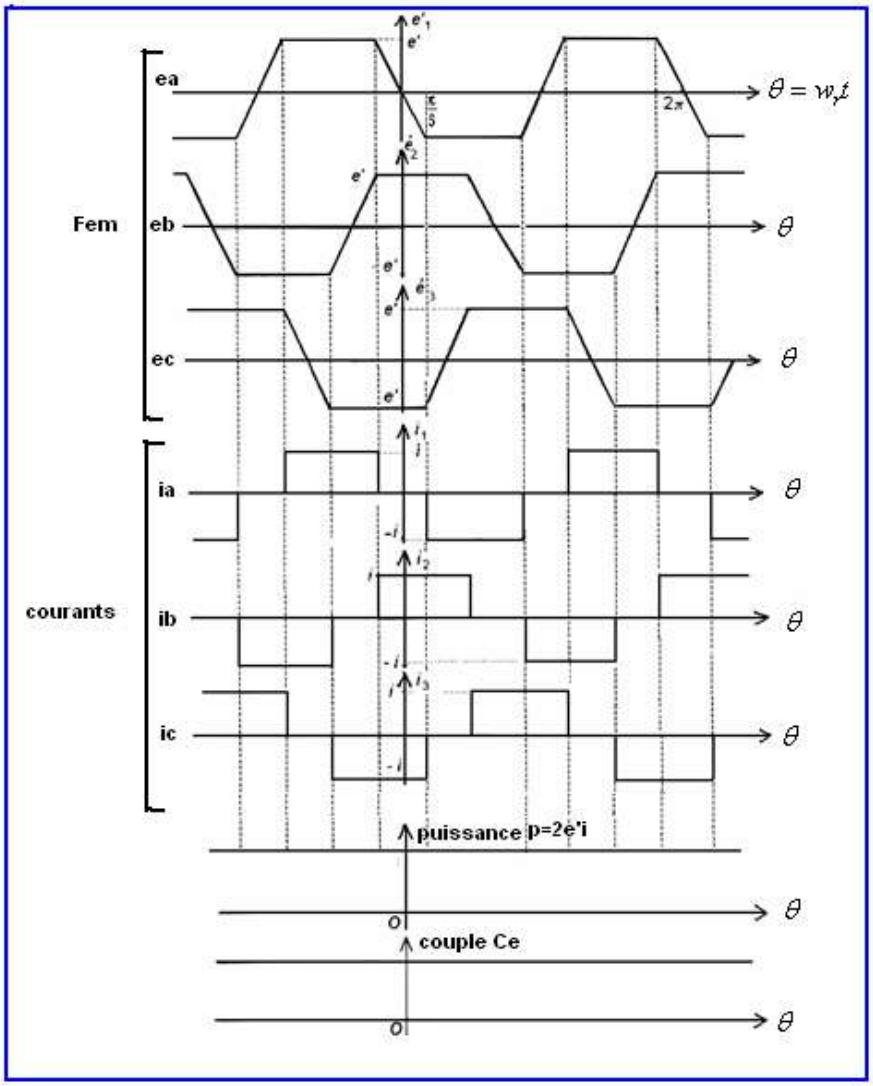


Figure II.2. Courbe des forces électromotrices et des courant dans une machine triphasée.

II.3.3 Autre modes de fonctionnement du BLDC

On peut distinguer d'autres modes de fonctionnement du moteur qui sont :

II.3.3.1 Fonctionnement Forcé

Sans réaction de position du rotor (pas à pas), le contrôleur fixe la cadence à partir d'une vitesse de consigne. Cette solution ne fonctionne que pour des vitesses lentes. En cas de variation de charge sur l'arbre de sortie, le moteur risque de décrocher (de ne pas suivre la cadence). Quand le moteur se désynchronise, le couple s'écroule ou se renverse brutalement .

II.3.3.2 Fonctionnement avec Informations de position sans capteurs

Certains moteurs BLDC sont équipés de capteurs de position (par exemple à effet Hall). Dans les applications aéronautiques, le poids est un facteur limitant ; ont donc été choisis des moteurs sans capteurs (BLDC sensorless). Ces moteurs peuvent cependant avoir des démarrages difficiles ou perdre la synchronisation lors du fonctionnement et donc décrocher. En réalité, il suffit, pour la commutation, de connaître le moment où le rotor passe par une position donnée, associée à un angle électrique fixé et connu, et ce pour chaque séquence. On verra que pour générer un champ magnétique tournant, il fallait un enchaînement de 6 séquences de 60° électriques chacune. Si on détecte le passage du rotor à 30° électriques, on sait qu'il faudra déclencher la commutation 30° électriques plus tard, en supposant que le rotor met le même temps pour les parcourir que les 30° précédents. Il existe un moyen autre que les capteurs pour détecter le passage à 30° du rotor : la mesure de la force contre électromotrice (Back EMF). Cette mesure se fait normalement en mesurant la tension entre le point central N des enroulements et la phase non utilisée de la séquence en cours (phase « en l'air »). Si on n'a pas accès physiquement à ce point (ce qui est le cas en général) on doit simuler ce point en créant un point au même potentiel à l'aide de trois résistances en étoile (figure **II**.3). [21]

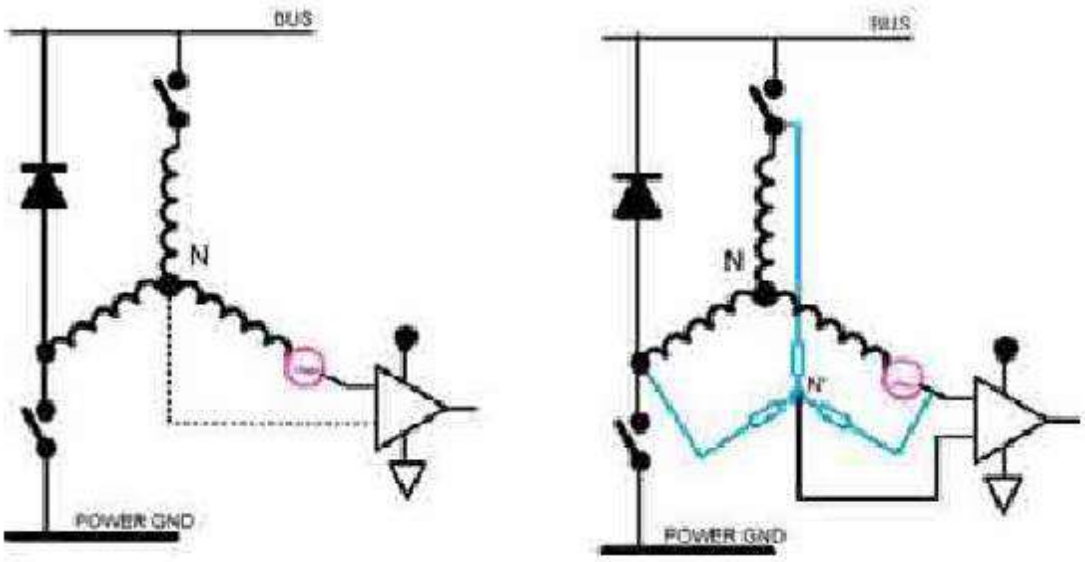


Figure II.3. Détection de la position par la mesure des fem's

II.4. Technologies du moteur BLDC

II.4.1 Le stator

Le stator porte les enroulements qui peuvent prendre plusieurs formes :

- bobines concentrées autour de pôles saillants. (figure **II**.4 a).
- enroulements repartis dans des encoches. (figure **II**.4 b).
- enroulements repartis le long de l'entrefer sans encoches. (figure **II**.4 c).

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

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

Dans le troisième cas, on élimine toute variation de couple due aux modifications de réluctance. Cependant, la construction est moins solide et le comportement thermique est moins bon. Cette solution est néanmoins intéressante pour les petits moteurs [21].

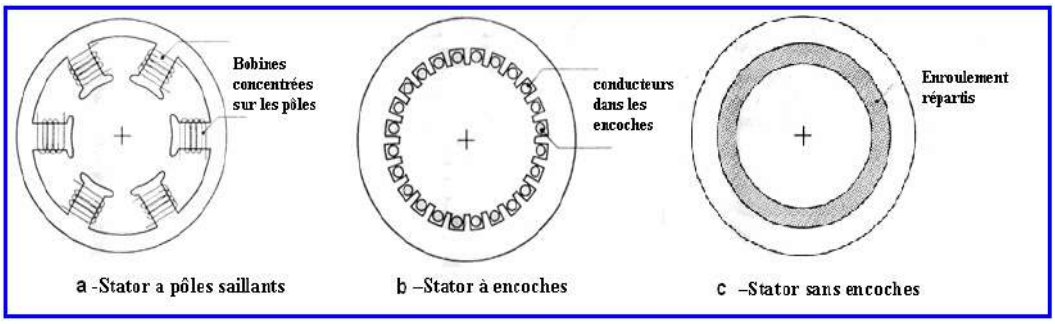


Figure II.4. Différents types des stators

II.4.2 Le rotor

Le rotor porte des aimants tel que en Samarium-Cobalt ou en Néodyme-Fer-Bore. Le nombre de pôles magnétiques est toujours pair. Les aimants peuvent se présenter de différentes manières :

- aimants en tuile sur un support ferromagnétique (figure **II**.5 a).
- aimants en anneau fabriqué dans un matériau isotrope (figure **II**.5 b).
- aimants munis de pièces polaires (figure **II**.5 c).

La première solution est la plus classique, la seconde peut être intéressante pour les petites machines. Le troisième cas peut permettre une concentration du flux si la surface de la pièce polaire en regard de l'entrefer est inférieure à la surface présentée par l'aimant. On obtient ainsi des champs magnétiques élevés qui conduisent à des machines de grandes performances [21].

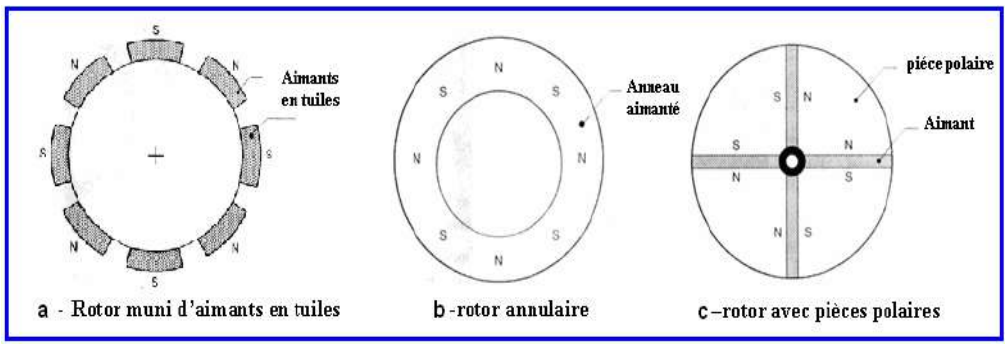


Figure A.5. Différents types des rotors

II.4.3 Différents types du BLDC

Il existe de nombreuses configurations de moteur Brushless. La raison principale de cette diversité est que les utilisateurs ont tous des besoins spécifiques. Par exemple, pour la conception d'un servomoteur, l'inertie devra être la plus faible possible, afin de permettre une accélération et une décélération, la plus rapide possible. Il sera donc préférable

d'utiliser un moteur à rotor intérieur avec des aimants à hautes énergies. Tandis que, pour une application ou la vitesse doit rester la plus constante possible, telle que la motorisation d'un disque magnétique, un moteur à rotor extérieur du fait de son inertie, est préférable. Le choix du type de moteur est donc la décision la plus fondamentale dans un travail de conception.

Trois grandes familles existent, les moteurs à rotor intérieur, à rotor extérieur ou à entrefer axial. Ces familles se décomposent elles- mêmes en deux parties: les machines à forme d'onde sinusoïdale ou trapézoïdale .

II.4.3.1 Moteur à rotor intérieur

Le moteur à rotor intérieur a une configuration classique. Le rotor est constitué d'aimants assemblés sur une douille magnétique. Le stator est similaire à celui des machines triphasées à induction. D'ailleurs, les stators des machines à induction sont parfois directement utilisés dans la fabrication des machines Brushless, pour des raisons d'économie.

La figure **II**.6 montre un exemple de moteur à rotor intérieur .

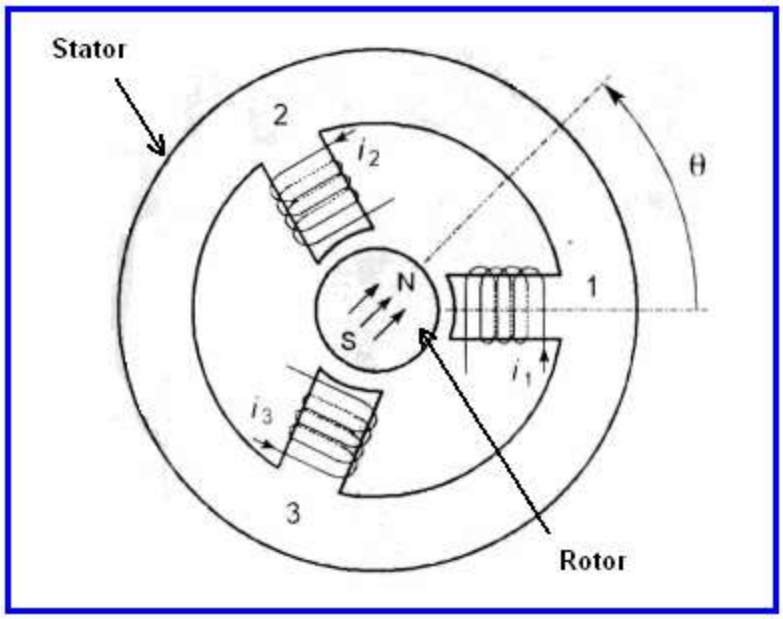


Figure II.6.a. Moteur à rotor interne

Cette structure présente l'avantage d'un ratio couple / vitesse élevé. Néanmoins une difficulté de construction existe, il faut maintenir les aimants, même à vitesse élevée. Le plus souvent, ils sont collés et frétés. La puissance volumique d'une machine Brushless à aimants ferrites est à peu près équivalente à un moteur à induction, mais son rendement et son facteur de puissance sont généralement bien meilleurs .

II.4.3.2 Moteur à rotor extérieur

La figure suivante présente le schéma d'un moteur à rotor extérieur :

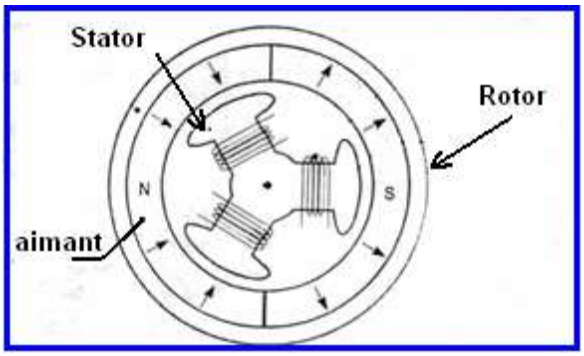


Figure II.6 b. Moteur à rotor externe

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

II.4.3.3 Moteur à entrefer axial

Dans certaines applications à encombrement réduit, des machines à entrefer axial ont fait leur apparition (moteur de disque dur d'ordinateur, tables tournantes, ventilateur) .Les aimants sont montés sur un disque magnétique mobile. Les bobines sont fixées en général sur le circuit imprimé avec les composants électroniques. Sous le circuit une plaque métallique permet au champ de se refermer. La figure **II**.6 c représente le schéma d'un moteur à entrefer axial.

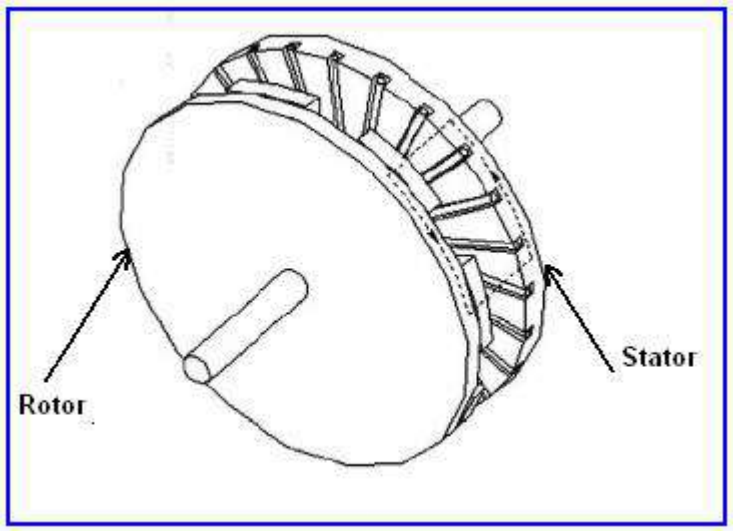


Figure II.6. c Moteur à entrefer axial

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

On peut également faire d'autre classement des moteurs BLDC en fonction du nombre des enroulements dans le stator. On trouve les moteurs biphasés, triphasés, et aussi à quatre phases... etc. .

II.5 L'alimentation électronique du BLDC

La structure globale d'un moteur à courant continu sans balais comprend :

- des capteur, munis éventuellement de circuits de mise en forme, qui permettent de connaître la position du rotor à tout instant en général des capteurs à effet hall. un circuit logique qui élabore les commutation à appliquer aux différents phases du moteur compte tenu des signaux issus des capteurs.
- un commutateur de puissance qui alimente les enroulements en fonction des informations reçues par la logique de commande.
- une commande de la tension ou du courant permettant d'agir sur la vitesse du moteur.

Les trois premières fonctions permettent d'effectuer les commutations assurées par le système balais-collecteur dans un moteur à courant continu classique tandis que la dernière est analogue à celle qui est utilisée pour la commande de ces mêmes moteurs [21].

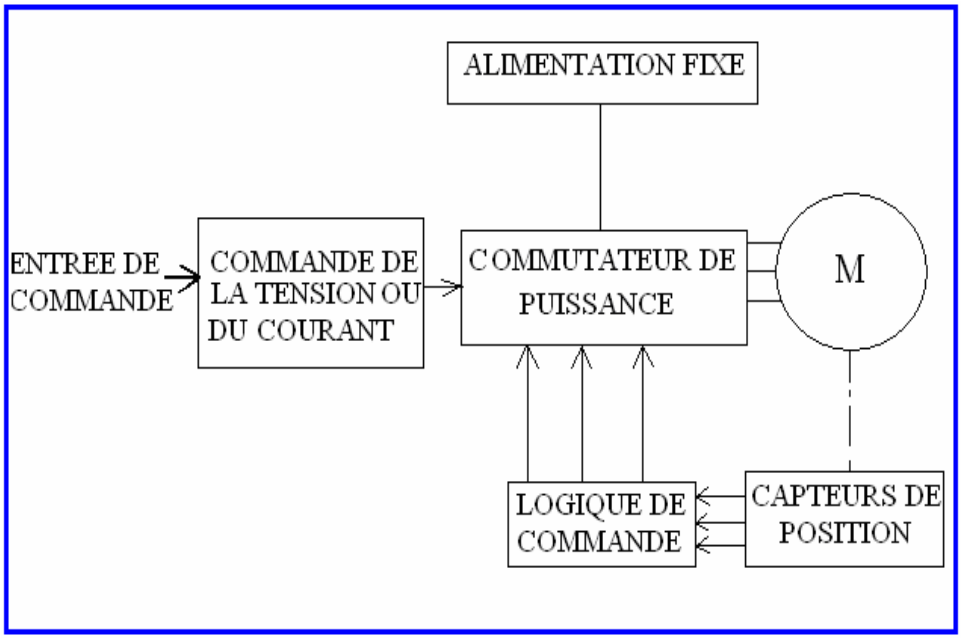


Figure II.7. Structure générale de l'alimentation d'un moteur BLDC

II.5.1 Commutateur de puissance

On prévoit en général l'inversion du sens du courant dans les phases (alimentation bidirectionnelle) car la machine est alors mieux utilisée. Les enroulements peuvent être couplés en étoile ou en triangle. On rencontre aussi parfois des alimentations unidirectionnelles, mais uniquement lorsque les phases sont couplées en étoile avec neutre sorti [21]

II.5.1.1 Alimentation unidirectionnelle

Dans ce cas, on a besoin d'un transistor et d'une diode par phase figure (**II**.8). Lorsqu'un transistor est saturé, la tension d'alimentation est appliquée aux bornes de la phase. Quand on bloque le transistor, la force électromotrice induite dans l'inductance du circuit impose la mise en conduction de la diode de roue libre qui court-circuite alors l'enroulement [21].

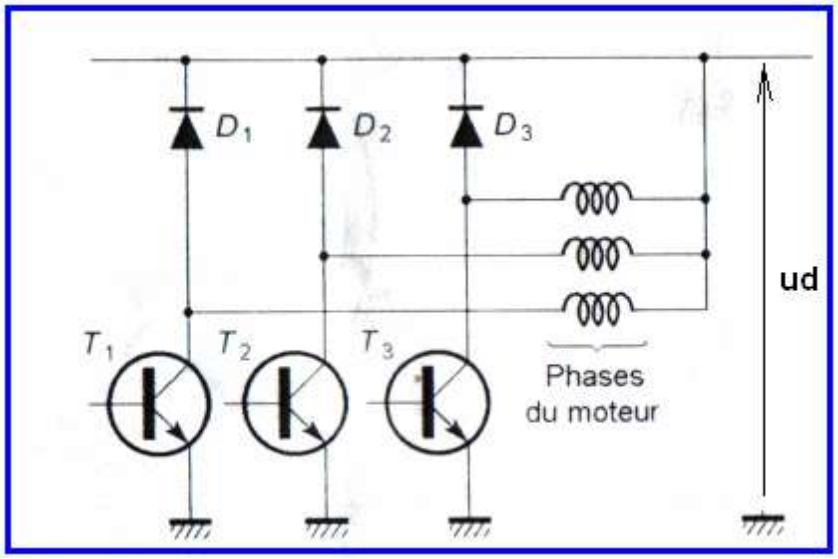


Figure II.8. Alimentation unidirectionnelle.

II.5.1.2 Alimentation bidirectionnelle

Il faut ici deux transistors et deux diodes par phase. Le montage est identique, que le moteur soit en étoile ou en triangle. On sature simultanément deux transistors, l'un du groupe T_1 , T_2 ,T_3 et l'autre du groupe T'_1 , T'_2 ,T'_3 . Dans le cas du moteur triphasé en étoile, la tension $_d$u est appliquée aux bornes de deux enroulements en série. Dans le cas du moteur triphasé en triangle, cette tension est appliquée à une phase en parallèle avec les deux autres phases en série. Les six diodes assurent le fonction de roue libre dans tous les cas de figure (**II**.9) [21].

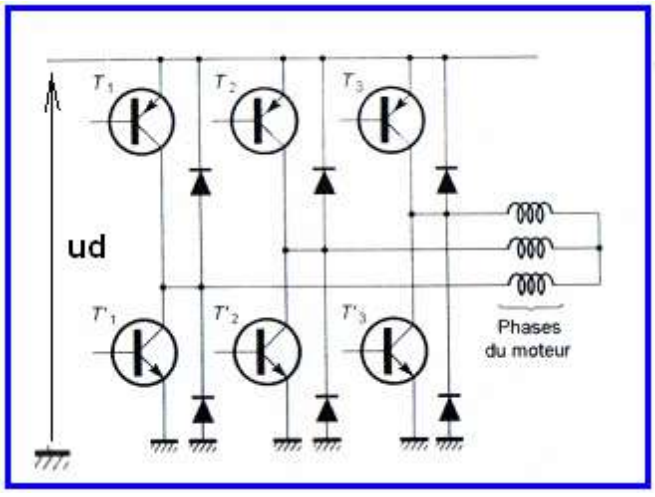


Figure II.9. Alimentation bidirectionnelle d'un moteur en étoile.

II.5.2 Capteurs

Pour connaître la position instantanée du rotor, il faut disposer sur le stator d'un certain nombre de capteurs. On utilise soit des capteurs magnétiques à effet hall, soit des

capteurs optiques. Pour une machine triphasée, il faut des capteurs régulièrement espacés figure (**II**.10).

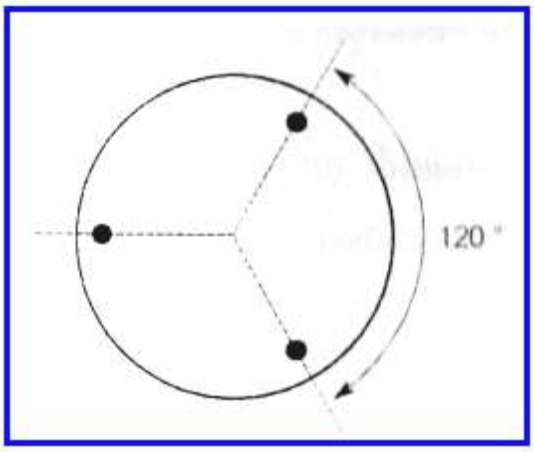


Figure II.10. Position des capteurs pour un moteur à trois phases.

Après mise en forme par un comparateur adapté, on obtient trois signaux logiques h1, h2 et h3 figure (**II**.11). Pour un moteur à quatre phases on se contente de deux capteurs décalés de 90° (deux capteurs supplémentaires donneraient des signaux inverses, ce qui ne sert à rien) [21].

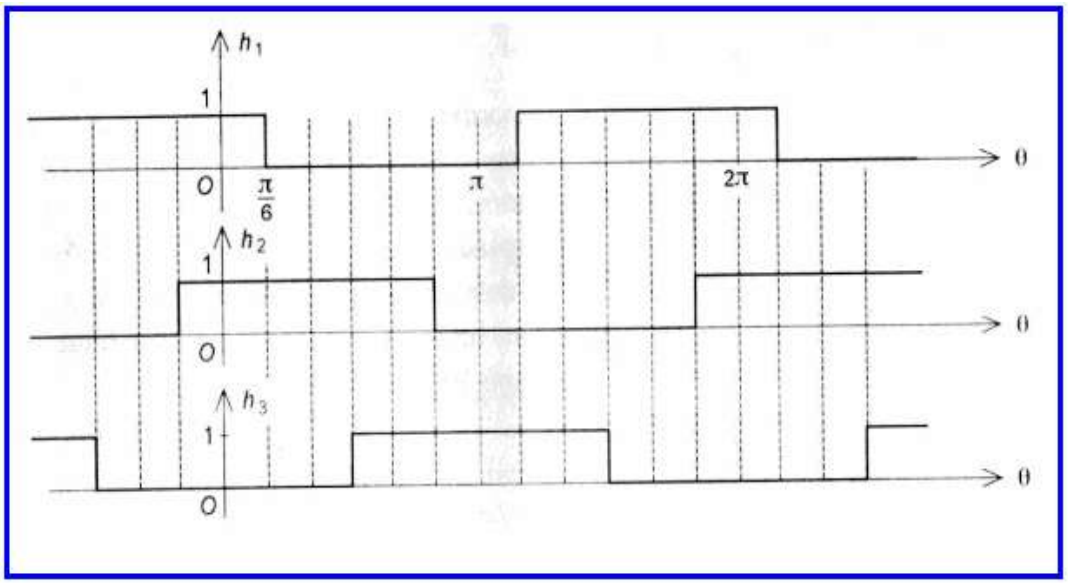


Figure II.11 Signaux logiques issus des capteurs pour une machine triphasée.

II.5.2.1 Capteur à effet Hall

Si un courant I_0 traverse un barreau en matériau conducteur ou semi-conducteur, et si

un champ magnétique d'induction B est appliqué perpendiculairement au sens de passage du courant, une tension V_h , proportionnelle au champ magnétique et au courant I_0 apparaît sur les faces latérales du barreau. C'est la tension de Hall (du nom de celui qui remarqua le phénomène en 1879).

$$V_h = K_h \cdot B \cdot I_0 \qquad (1)$$

Où

K_h est la constante de Hall, dépendant du matériau utilisé.

L'effet Hall est du à la déviation des électrons par le champ magnétique, créant une différence de potentiel appelée tension de Hall.

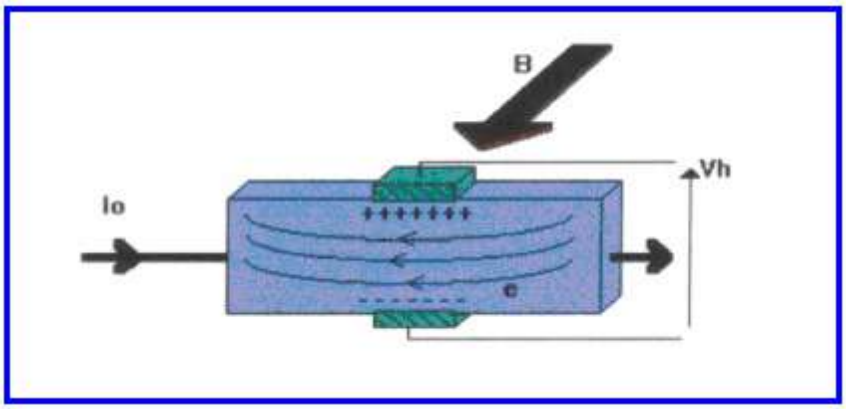


Figure II.12. Capteur à effet hall

II.5.3 Logique de commande

Ce circuit reçoit les informations logiques issues des capteurs et délivre les signaux de commande des interrupteurs nécessaires au fonctionnement du circuit de puissance. Par exemple, dans le cas du moteur triphasé à alimentation bidirectionnelle, on dispose de trois signaux h1, h2, et h3 et on veut élaborer six signaux logiques c1, c2, c3, c'1, c'2 et c'3 destinés à la commande des six transistors pour obtenir les courants souhaités dans les trois phases du moteur figure (**II**.13). On constate qu'il faut assurer les équations logiques suivantes :

$$C1=h1\,\overline{h2} \qquad C'1=\overline{h1}\,h2$$

$$C2=h2\,\overline{h3} \quad \text{et} \quad C'2=\overline{h2}\,h3$$

$$C3=h3\,\overline{h1} \qquad C'3=\overline{h3}\,h1$$

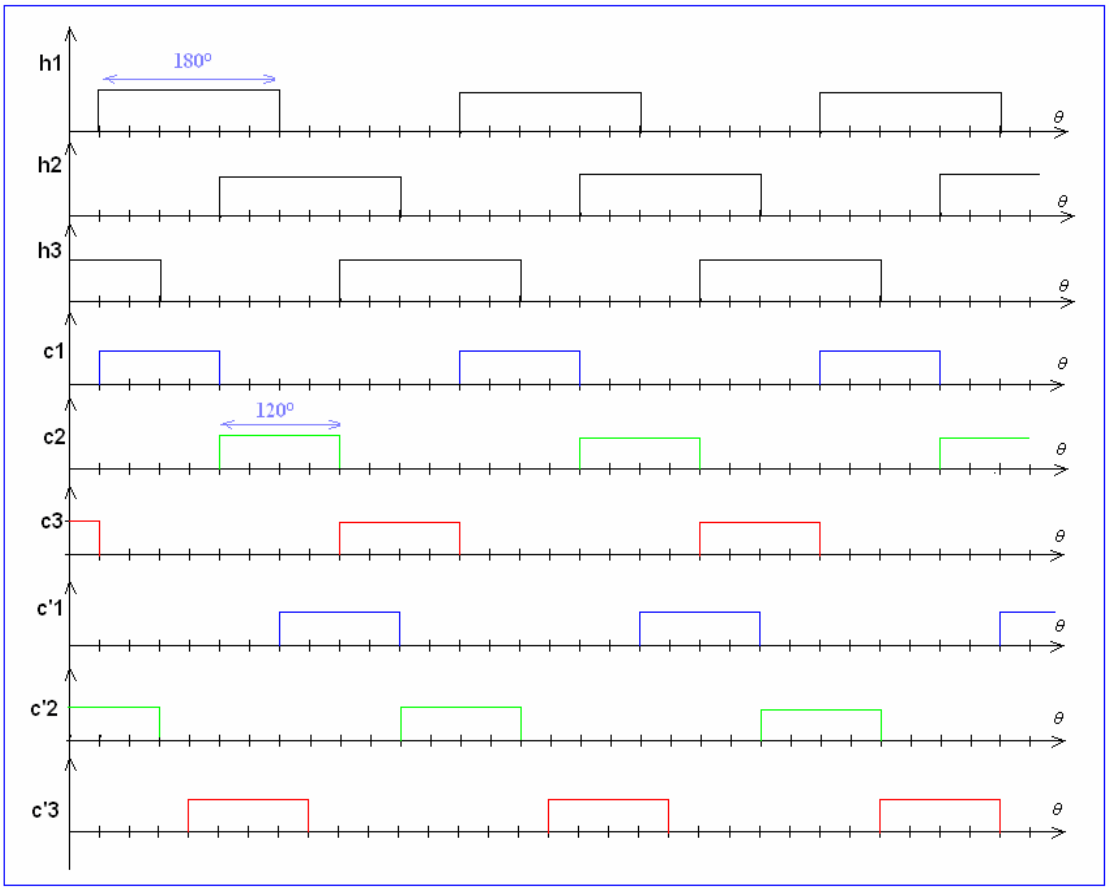


Figure II.13 Signaux de commande pour une alimentation bidirectionnelle triphasée.

Cette logique de commande peut être facilement réalisée avec des circuits élémentaires figure (**II**.14), elle est en général intégrée dans des circuits spécialisés pour moteurs à courant continu sans balais.

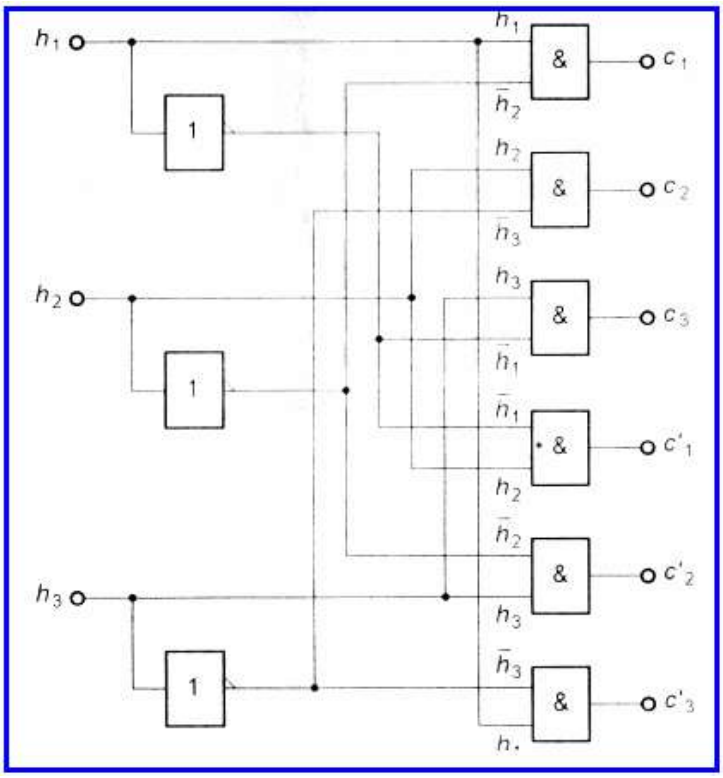


Figure II.14. Génération des impulsions pour une alimentation bidirectionnelle triphasée.

Noter que cette logique de commutation peut être réalisée avec un simple programme sur un microcontrôleur PIC qui ne coût pas cher.

II.5.4 Commande en tension ou en courant

On a supposé précédemment, que les variations des courants étaient rectangulaires. Dans la réalité, il n'en est pas tout à fait ainsi. Le caractère inductif du circuit empêche les discontinuités de courant. Si on applique une tension constante aux bornes des phases (alimentation en tension), les montées et les descentes sont progressives. Pour améliorer la rapidité de ces commutations, on utilise souvent une alimentation en courant. Dans ce cas, on régule l'intensité, en général par découpage. On obtient des temps de montée et de descente inférieurs, mais aussi une ondulation du courant autour de la valeur désirée [21].

II.5.4.1 Alimentation en tension

On a vu que le moteur associé à son commutateur de puissance avec sa logique de commande et ses capteurs a un comportement analogue à celui d'une machine à courant continu. On peut donc le commander en tension en faisant varier l'alimentation u_d (appliquée au commutateur. Pour avoir un rendement correct, on utilise en général un

hacheur pour cette opération. Son fonctionnement est identique à celui du moteur à courant continu .

II.5.4.2 Alimentation en courant

Il est possible, comme pour une machine classique, d'utiliser une source de courant plutôt qu'une source de tension. De plus, dans le cas du moteur sans balais, il y a deux possibilités de réglage de courant, on trouve le réglage du courant total à l'entrée du commutateur, ou encore on régule le courant dans les phases par découpage pour s'approcher de la forme idéale de ses variations lors des commutations [21].

II.6 Quelques circuits spécialisés pour la commande du moteur BLDC

II.6.1 Le circuit L6235

La diversité des applications du moteur BLDC a conduit les constructeur à fabriquer des moteurs BLDC accompagnés par les circuits assurant la commutation et parfois même la régulation , parmi ces circuits on trouve le L6235 figure(**II**.15), qui a une grande intégrité, il contient six transistors de puissance MOS, un circuit centralisé pour le décodage des signaux qui vient des sondes à effet Hall et une technique PWM du control de courant à un t_{off} constant (mode synchrone) plus des autres fonctions assurant la sécurité.

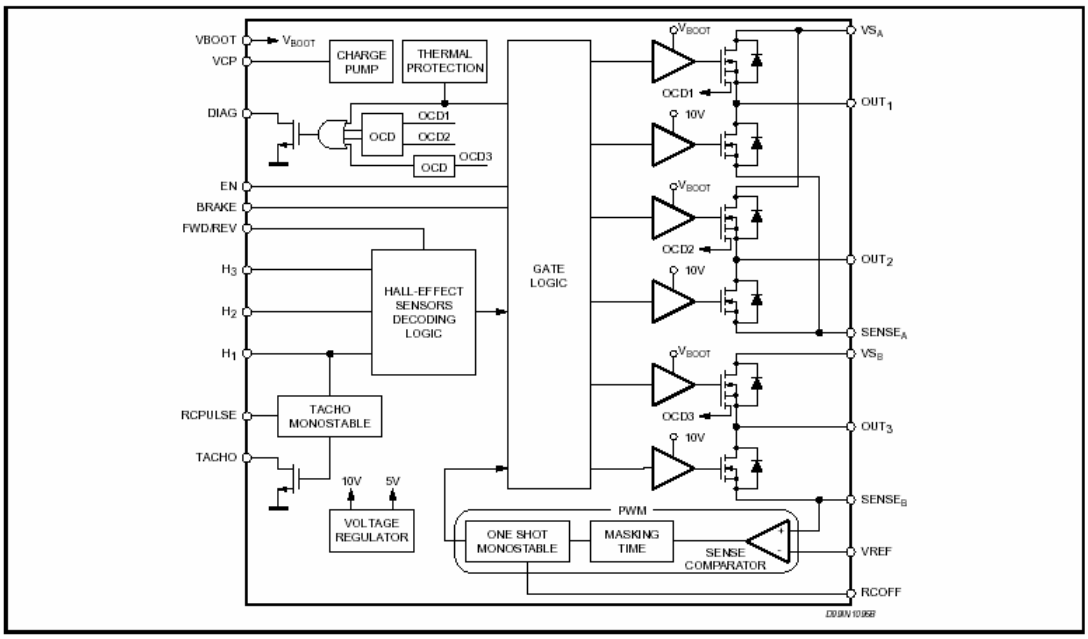


Figure II.16 . Diagramme simplifié du circuit 34929

Le contrôleur 34929 est un circuit complet conçu pour interfacer la commande des moteurs BLDC triphasé (1A, 28 V). Ce circuit joue le rôle d'interface entre le moteur et le calculateur (MCU) qui calcule la commande en boucle fermée. Ce circuit permet aux moteur de tourner dans les deux sens, de freiner, et de tourner avec une vitesse variable, il intègre aussi un limiteur de couple (courant limite max), et il dispose d'une entrée PWM, externe . Le schéma bloc interne est représenté par la figure (**II**.17).

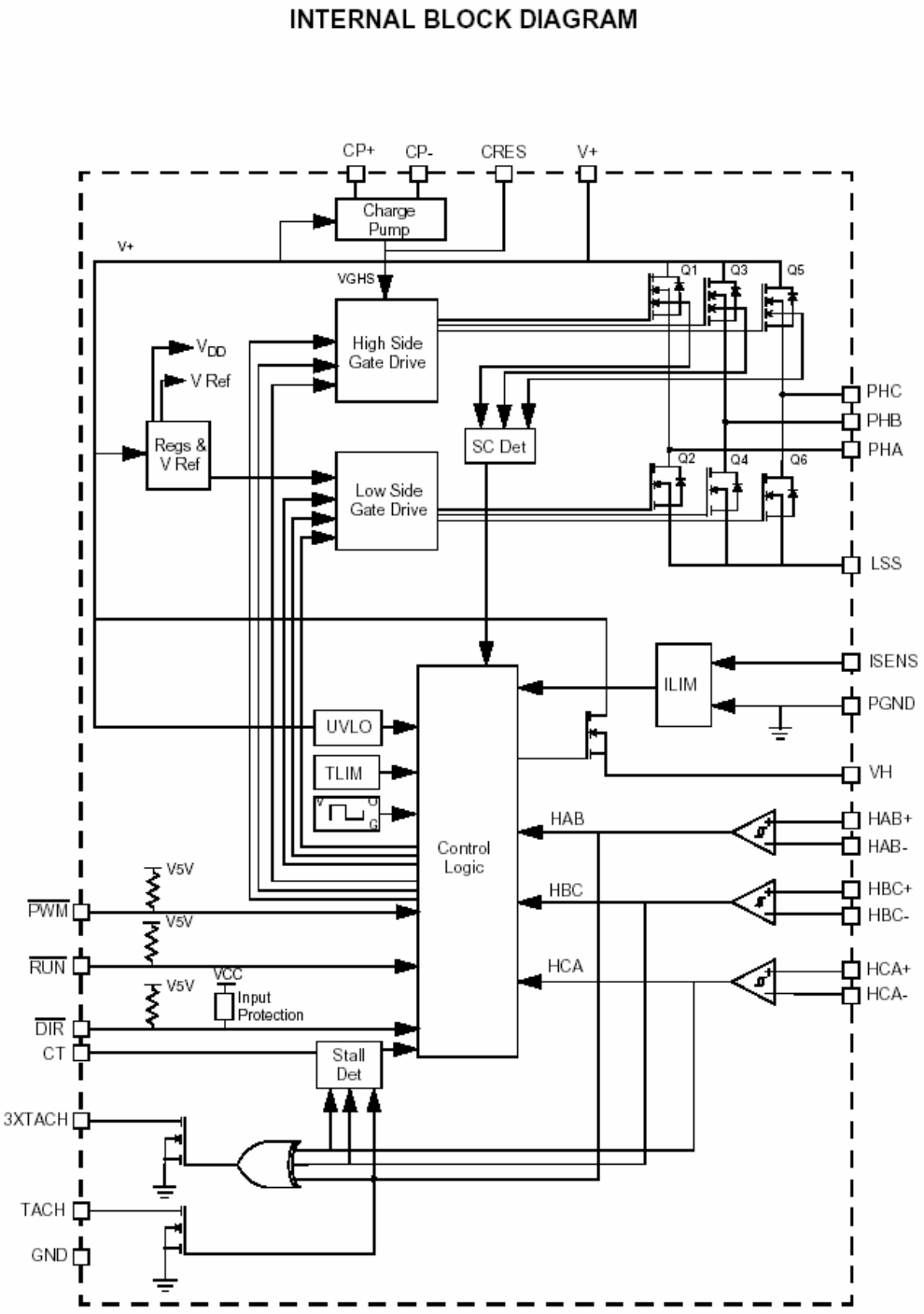


Figure II.17 . schéma bloc interne du 34929

II .7 Modélisation de la machine

II.7.1 Hypothèses simplificatrices

L'analyse est faite selon les hypothèses suivantes :

- Les six transistors T_1 , T_2 ,T_3 , T_1' , T_2' , T_3' ont des caractéristiques identiques, Dans l'état-**off** ils sont modélisés comme des impédances infinies et dans l'état**on** ils sont représentés comme des contacts fermés. Dans notre cas on néglige la chute de tension dans les transistors. Les mêmes suppositions sont valables pour les diodes de roue libre notées D_1 , D_2 ,D_3 , D_1' , D_2' , D_2'

- Les trois phases du moteur sont entièrement symétriques et produisent des Fem induites périodiques de formes trapézoïdales .
- Les paramètres du moteur sont constants.
- Le temps de commutation entre les phases est séparé avec 60° électrique .
- Le circuit magnétique est linéaire (absence de saturation).

Le circuit de base est illustré par la figure (**II**.1)

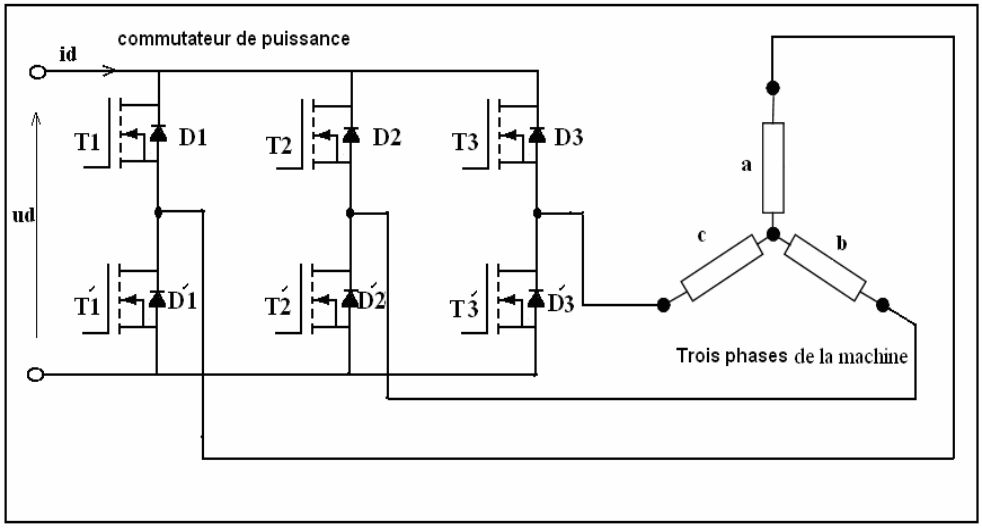


Figure II.1. circuit de base

II.7.2 . L'analyse dans le système de référence (abc)

Il existe trois systèmes de références qui peuvent être considérés dans un BLDCM, comme le montre la figure (**II**.2) .

- Le référentiel fixe lié aux phases (a, b, c);

- Le référentiel tournant lié au champ magnétique (d, q);
- Le référentiel fixe liée au stator (α ,β).

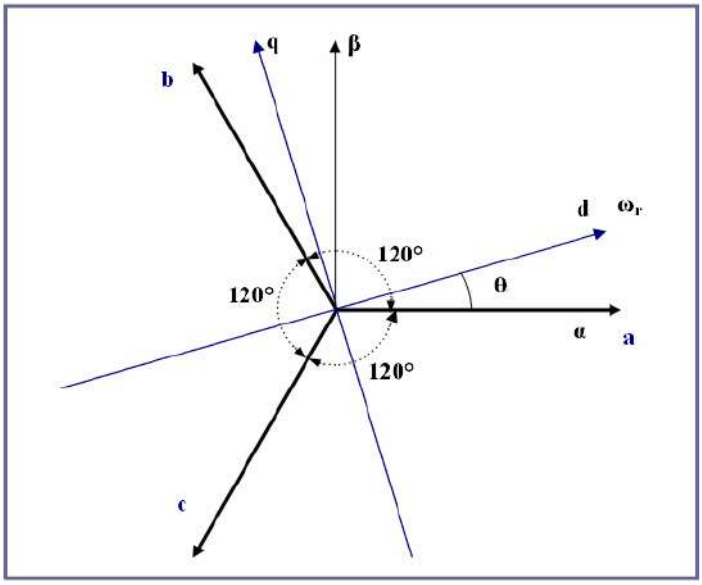


Figure II.2 . Système de Coordonnées d'un BLDC

La dynamique du système peut être représentée dans un système de référence relatif au stator, au champ et aux phases électriques. Le passage d'un système de référence à un autre peut être fait à l'aide des matrices de transformation. .

La caractéristique du BLDC est que la forme de la force électromotrice est trapézoïdale, ce qui signifie que l'inductance mutuelle entre le stator et le rotor est non sinusoïdale dans ce cas il est difficile de transformer le système d'équations de BLDC à un autre système de référence (d, q) . Le modèle dynamique général du BLDC montré dans la figure (B.3) peut être établi de la manière suivante dans le repère relatif aux phases (a, b, c) [4]. :

$$\vec{V} = R\vec{I} + \frac{d\vec{\varphi}}{dt} \qquad (2)$$

$$\vec{\varphi} = L\vec{I} + \vec{\varphi}_M$$

Où :

$\vec{V}$, $\vec{I}$et $\vec{\varphi}$ sont des vecteurs représentant respectivement la tension, le courant et le flux magnétique pour chaque phase, R et L représentent respectivement la résistance et l'inductance propre de chaque phase. $\vec{\varphi}_M$ est le vecteur de flux magnétique créé par l'aimant permanent .

Les composantes dans le repère (a, b, c) de chacun de ces vecteurs sont données cidessous :

$$\vec{V} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \vec{I} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \vec{\varphi} = \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix}, \vec{\varphi}_M = \begin{bmatrix} \varphi_{Ma} \\ \varphi_{Mb} \\ \varphi_{Mc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_0 \cos\theta \\ \varphi_0 \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \varphi_0 \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (3)$$

φ_0 l'amplitude du flux magnétique créé par l'aimant permanent et θ l'angle électrique

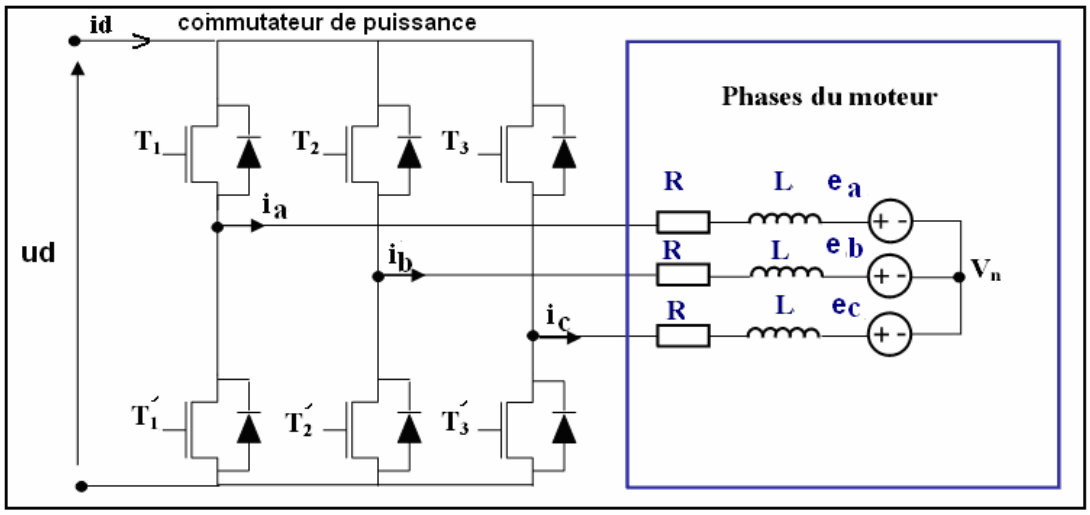


Figure II.3 . Structure d'un BLDC

$$\vec{V} = R\vec{I} + \frac{d}{dt}\left(L\vec{I} + \vec{\varphi}_M\right)$$

$$\vec{V} = R\vec{I} + L\frac{d\vec{I}}{dt} + \frac{d\vec{\varphi_M}}{dt} \quad (4)$$

$$\vec{E} = \frac{d\vec{\varphi_M}}{dt}$$

La grandeur E représente la force électromotrice induite par la variation du flux magnétique causée par l'aimant permanent dans le bobinage statorique selon la loi de Lenz qui stipule que « (…) le sens de la force électromotrice induite est telle que le courant qu'elle produit s'oppose à la variation du flux magnétique qui la produit. ». Ainsi, plus E est grand, plus la tension aux bornes de R diminue et plus le courant (et donc le couple) par phase diminue.

Pour un enroulement symétrique et un système équilibré figure (**II**.4)**,** la matrice des tensions aux bornes des trois phases sont donné par [12] :

$$\begin{pmatrix} v_a \\ v_a \\ v_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix} \quad (5)$$

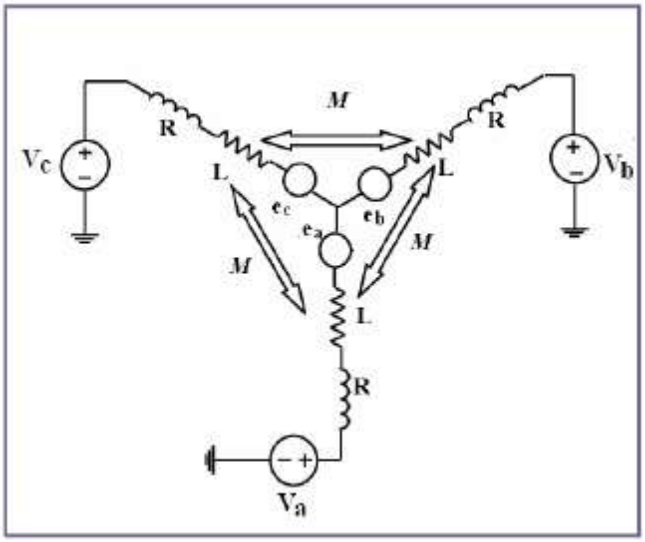


Figure II.4. Modèle électrique simplifié du BLDC

La position électrique θ du rotor se déduit directement de la position mécanique du rotor θ_r qui est mesurée à l'aide d'un capteur placé sur l'arbre du rotor . La relation entre les deux grandeurs est donnée par :

$$\theta = p.\theta_r \quad (6)$$

p est le nombre de paires de pôles du moteur, par conséquent, l'expression de la vitesse électrique est :

$$w = \frac{d\theta}{dt} = p.\frac{d\theta_r}{dt} = pw_r \quad (7)$$

Les inductances et les mutuelles sont constantes pour les aimants permanents montés sur la surface du rotor cylindrique, et lorsque les enroulements sont symétriques donc :

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L$$

$$L_{ab} = L_{ba} = L_{ac} = L_{ca} = L_{bc} = L_{cb} = M$$

$$\begin{pmatrix} v_a \\ v_a \\ v_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix} \quad (8)$$

Puisque les enroulements du stator sont couplés en étoile, la somme des trois courants de phase est nulle [4].

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

Alors

$$i_a + i_b = -i_c$$

Par conséquent, la tension prend la forme suivante:

$$\begin{pmatrix} v_a \\ v_a \\ v_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix} \quad (9)$$

$e_a = f_a(\theta).k_e .w_r$, force électromotrice de la phase **a**

$e_b = f_b(\theta)\, k_e .w_r$, force électromotrice de la phase **b**

$e_c = f_c(\theta)\, k_e .w_r$, force électromotrice de la phase **c**

Avec :

k_e est le coefficient de la force électromotrice, et $f_a(\theta)$, $f_b(\theta)$, $f_c(\theta)$ sont des fonctions dépendent de la position du rotor .

II.7.3 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 :

$$E_P = k_e . w_r \quad (10)$$

Les fonctions des forces électromotrices Fem sont supposées de formes trapézoïdales Et le courant de la phase a commence à 30° (angle électrique)

Les formes typiques des Fem induites et des courants dans les trois phases sont illustrées dans la figure (**II**.5) :

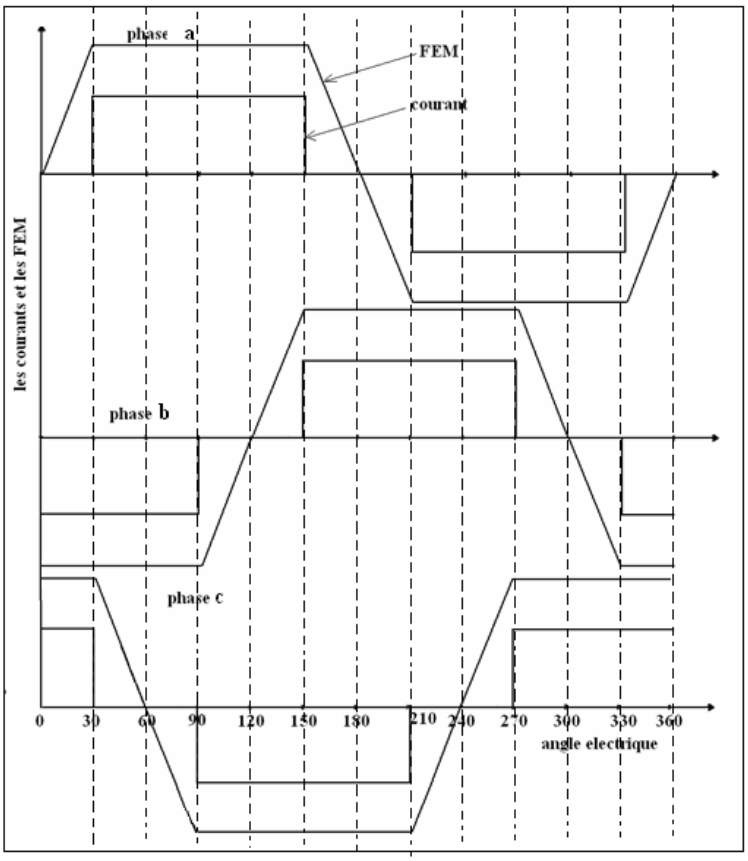


Figure II.5 . Les formes typiques des courants et des FEM

II.7.4 L'équation mécanique du mouvement

II.7.4.1 Vitesse du moteur

Le modèle mécanique du moteur BLDC est donné par l'équation (B.1) où la dynamique de position du rotor $\frac{d\theta_r}{dt}$ est déterminée par son inertie J , son accélération angulaire $\frac{dw_r}{dt}$,

le couple électromagnétique développé C_e et le couple du à la charge C_r . Alors l'équation mécanique est donnée par :

$$J\frac{dw_r}{dt} = C_e - fw_r - C_r \qquad (11)$$

w_r la vitesse angulaire [rad · s^{-1}].

C_e le couple électromagnétique développé [N.m].

C_r le couple de charge [N.m].

f le coefficient de frottement ([N.m]/[rad · s^{-1}]).

II.7.4.2 Couple électromagnétique

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

$$C_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{w_r} \qquad (12)$$

II.8 Conclusion

On a vu dans ce chapitre les différents types de moteur BLDC, ainsi on a donné l'information globale concernant sa logique de commutation. On a concentré l'étude sur le moteur triphasé puisque c'est le plus utilisé à cause de sa structure élémentaire et puisque l'étude qui va venir est consacrée à ce type de moteur. Dans ce chapitre, on a saisie bien le principe de fonctionnement de ce moteur, ce qui nous permet d'aiguiller l'étude vers la modélisation en vue de la commande.

III.1 Introduction

Ce chapitre aborde le réglage de la vitesse du moteur à courant continu alimenté par un convertisseur statique .l'induit de moteur est alimenté par un convertisseur de courant unidirectionnel dans les applications simple. Si la machine entrainée exige un freinage électrique ou une inversion de sens de rotation, on doit faire appel à un convertisseur de courant bidirectionnel. Dans ce chapitre on applique une commande en cascade du MCC, deux grandeur d'état sont régler, il s'agit de courant d'induit dans la boucle interne et de la vitesse de rotation dans la boucle externe

III.2 Commande par boucles imbriquées

Comme stratégie de commande on a choisi la commande par boucle imbriquée (la commande en cascade).

III.2.1 Principe de commande

La commande en cascade consiste à contrôler séparément le courant d'induit et la vitesse de rotation de la machine. On limite la sortis de régulateur externe de vitesse, on limite donc la référence de régulateur de courant.

La boucle extérieure est déterminée de façon à être deux fois moins rapide que la boucle que lui est immédiatement intérieure ce le conduit à une séparation dynamique de deux boucles.

Le Schémas de principe de ce régulateur est donné par la figure III.1

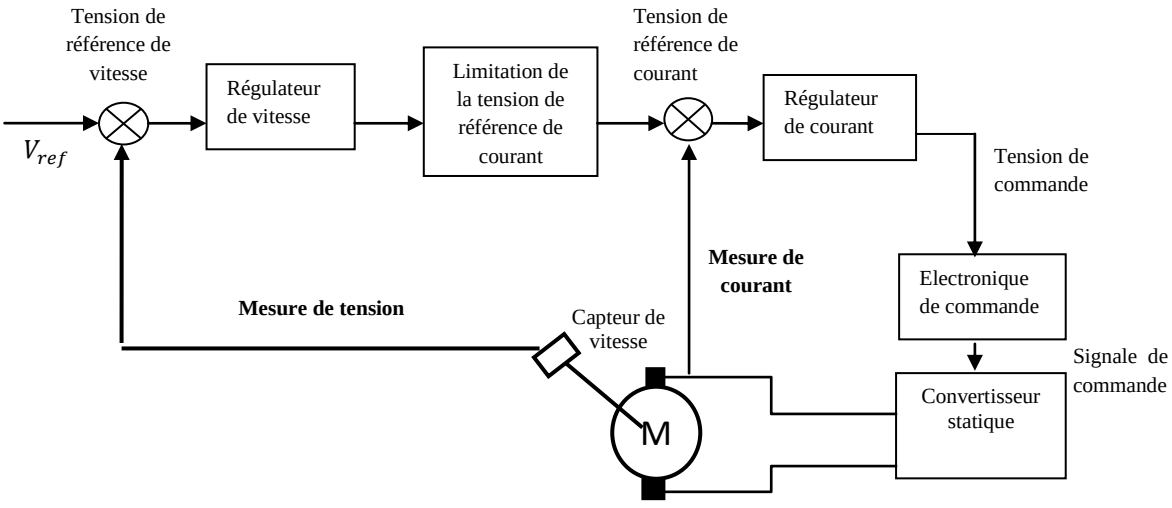


Figure.III.1. Réglage en cascade de Mcc

III.2.2 Les caractéristiques de régulation à boucle multiple

1. Il ya un régulateur séparé pour chacune des variables contrôlées.
2. On ajuste successivement les caractéristiques (statique est dynamique des différentes boucles) on part de plus interne
3. Le calcul est la mise en route sont simples
4. On peut avoir une réponse assez lente de la boucle la plus externe si elle enveloppe trop des boucles internes ou la séparation dynamique des boucles exige un rapport minimal de deux boucles adjacentes.

Modèle de la machine est représenté sur la figure III.2

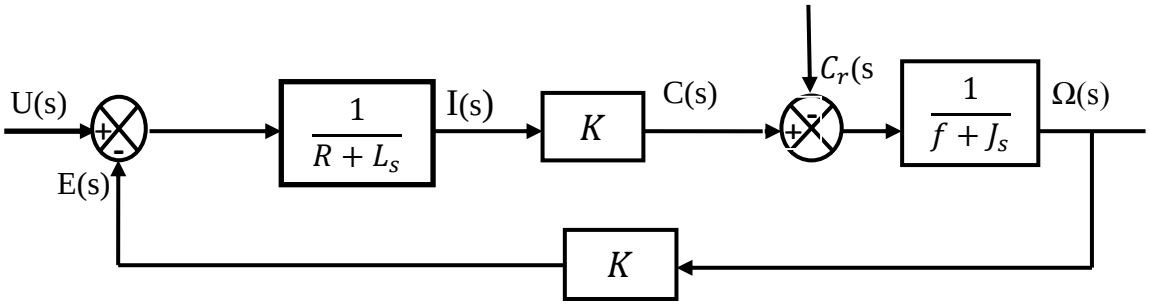


Figure.III.2. Modèle de la Mcc

III.3 Simulation du modèle de la Mcc en boucle ouverte

a vide

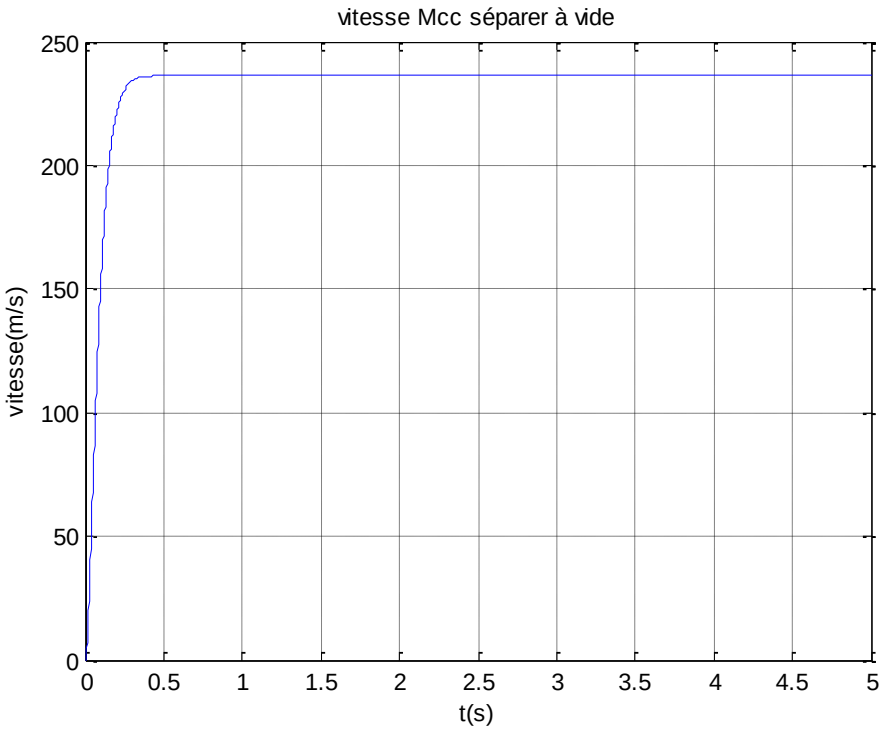


Figure.III.3. Vitesse a vide Mcc séparé

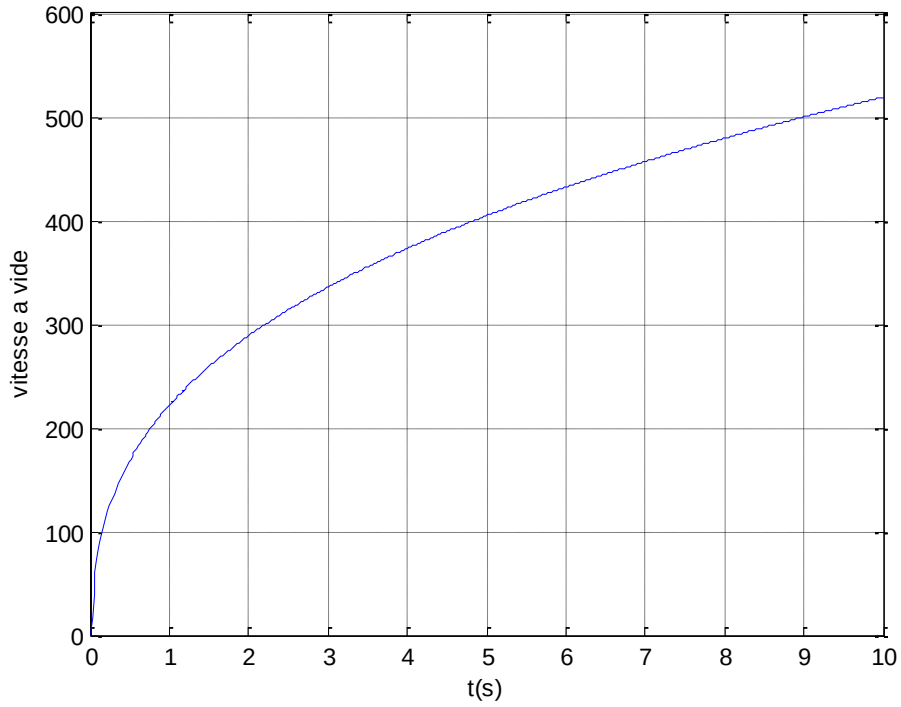


Figure. III.4. Vitesse Mcc série a vide

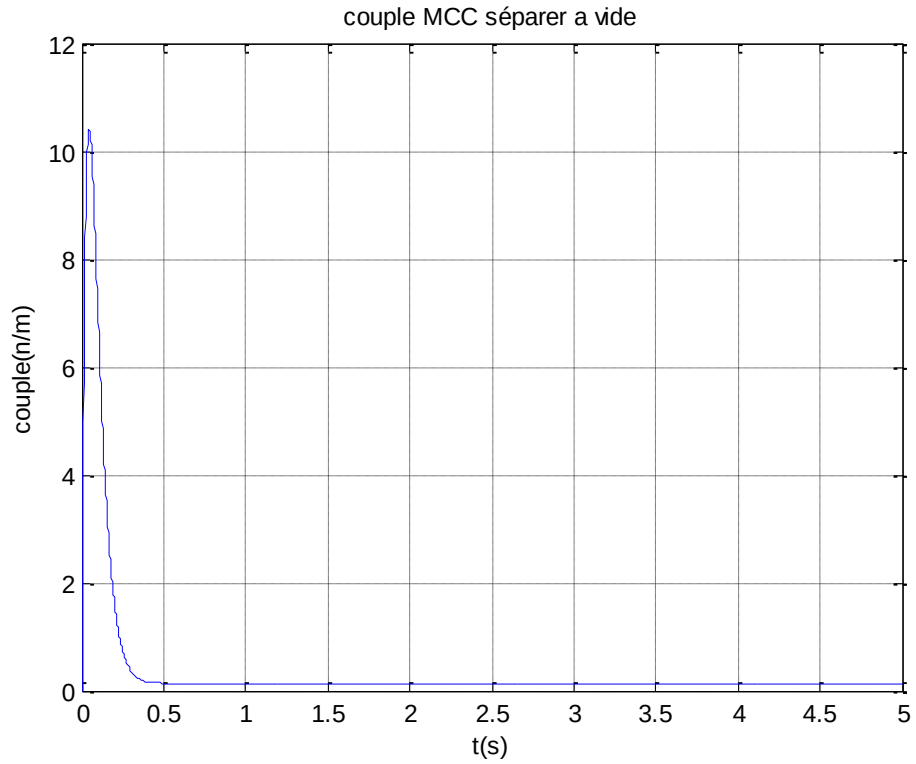


Figure.III.5. Couple a vide Mcc séparé

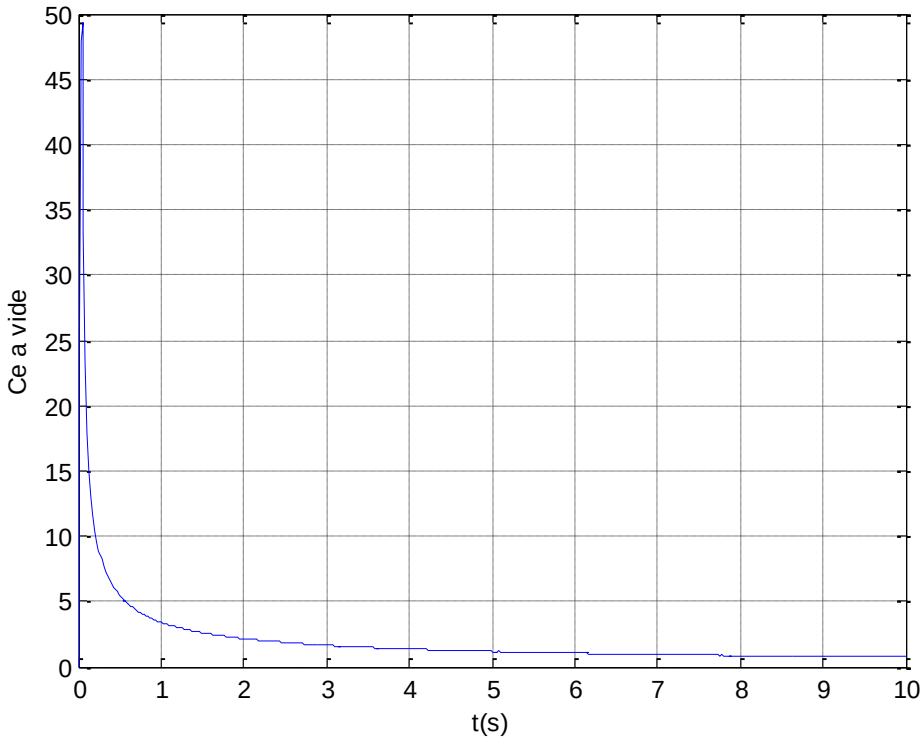


Figure. III.6. Couple Mcc série à vide

- **avec couple de charge**

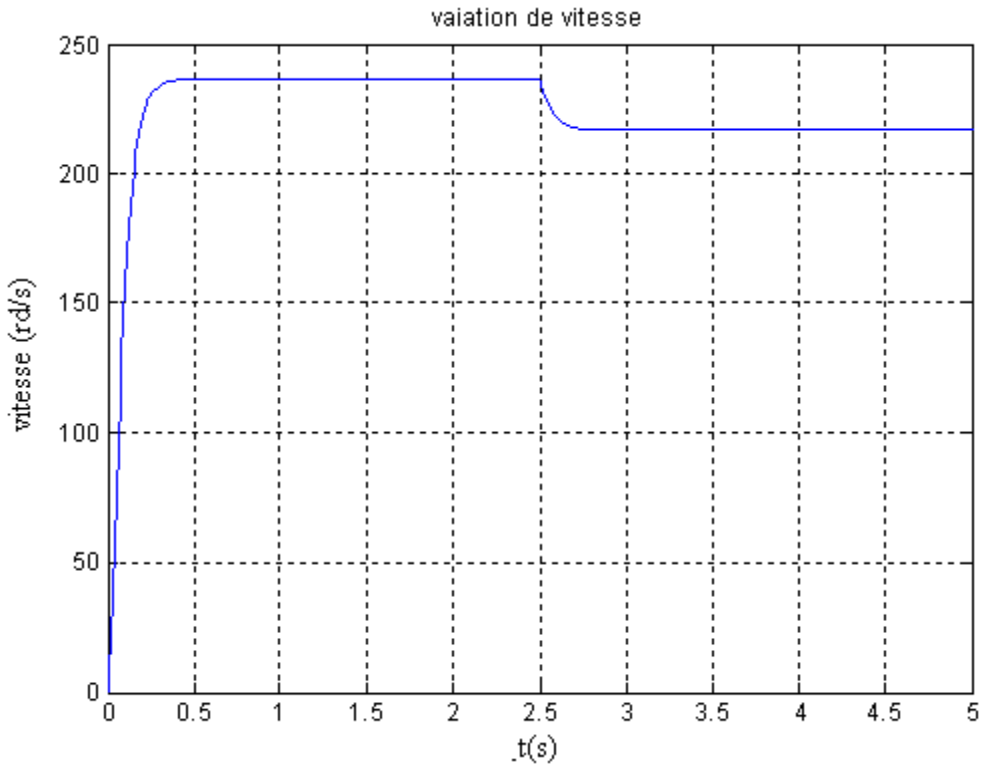


Figure.III.7. La vitesse Mcc séparer en charges

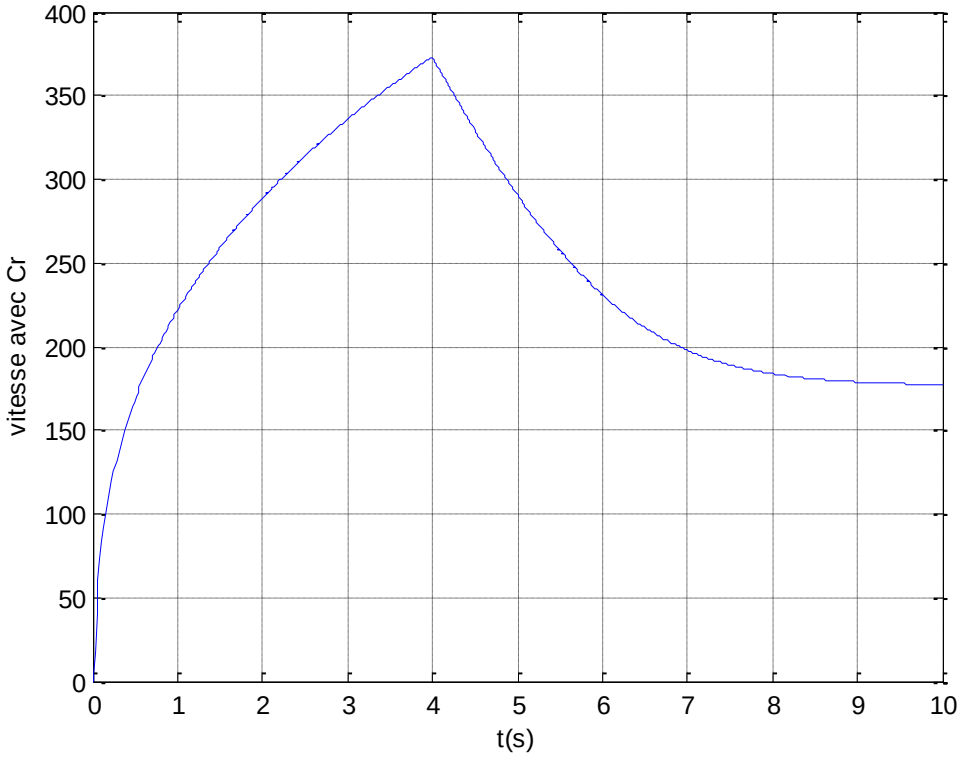


Figure. III.8. Vitesse Mcc série en charge

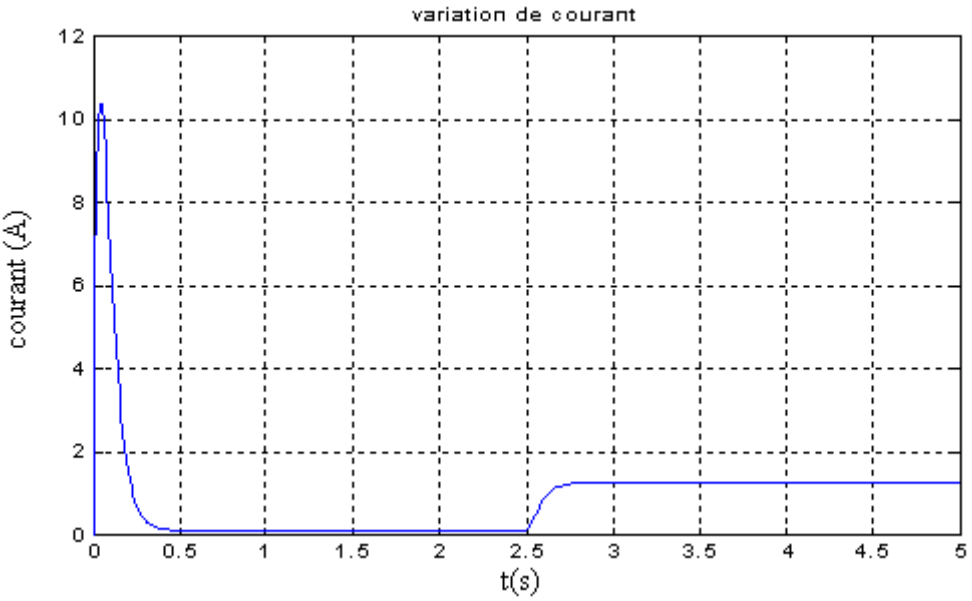


Figure. III.9. Courant Mcc séparer en charge

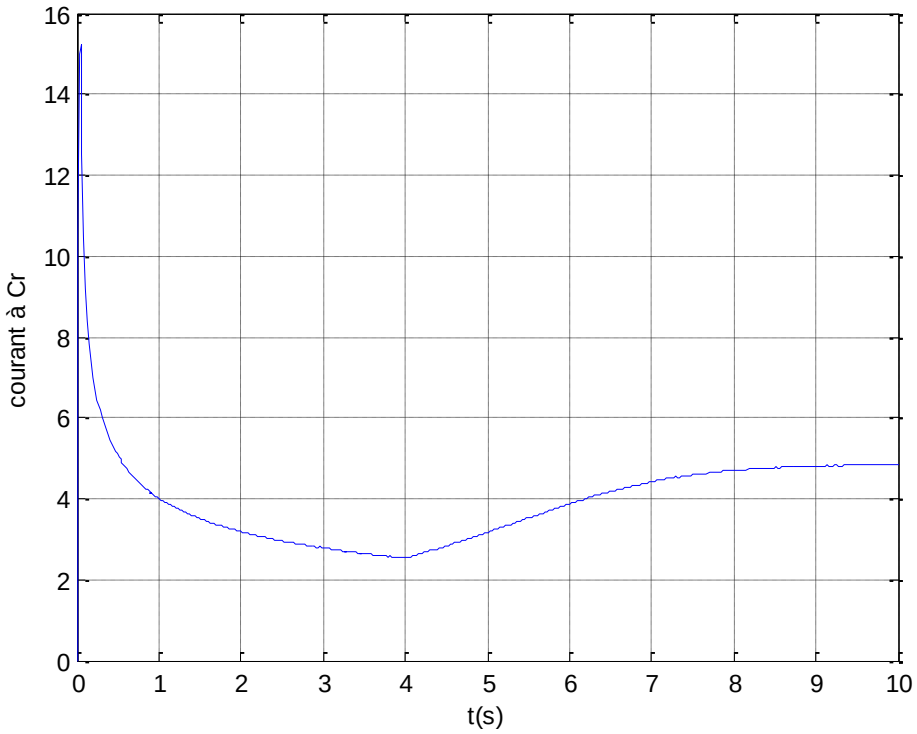


Figure.III.10. Courant Mcc série a charge

➢ Interprétation

❖ Excitation séparer

Le moteur développe un couple fort à une faible vitesse et le courant atteint un pic de «I=10.3 A » durant le régime transitoire, puis la vitesse se stabilise sur «Ω= 240 rad/s » par contre le courant et le couple électromagnétique diminue presque s'annulent I=0.1228A.

Avec les mêmes paramètres et un couple résistant de «*5 N.m* » produit par la charge qu'entraîne le moteur, on remarque que les résultats représentés par les figures (**figure. II.1.2**), sur ces résultats apparaît clairement la diminution de la vitesse du moteur qui atteint la valeur de «Ω= 218 rad/s », par contre le couple moteur et le courant font les mêmes pics qu'à vide en régime transitoire, et ne s'annulent pas au régime permanent et cela est dû à la charge.

❖ Excitation série

On voit sur les deux figures que la vitesse ne cesse pas d'augmenter «*Ω= 506 rad/s* », c'est-à-dire que le moteur c'est emballé « *vitesse infinie* ». Le couple développé par ces modèles est très grand « *Ce=52.3 N.m*». On remarque que le même courant traverse l'induit et l'inducteur «caractéristique du circuit série ». Donc d'après ces résultats, on peut dire que nos modèles donnent de bons résultats reste à vérifier sur le moteur en charge.

On remarque sur ces résultats que la vitesse du moteur atteint rapidement le régime permanent « *vitesse constante* » « *Ω= 175 rad/s* », le couple développé est très grand « *Ce=56N.m*» par contre le courant absorbé est moyennement faible ce qui permet à ce moteur d'entraîner une grande charge.

III.3.1 Simulation de l'association de la Mcc avec l'hacheur

Pour étudier l'influence de rapport cyclique sur la vitesse de rotation de la Mcc on alimente la machine par un hacheur série

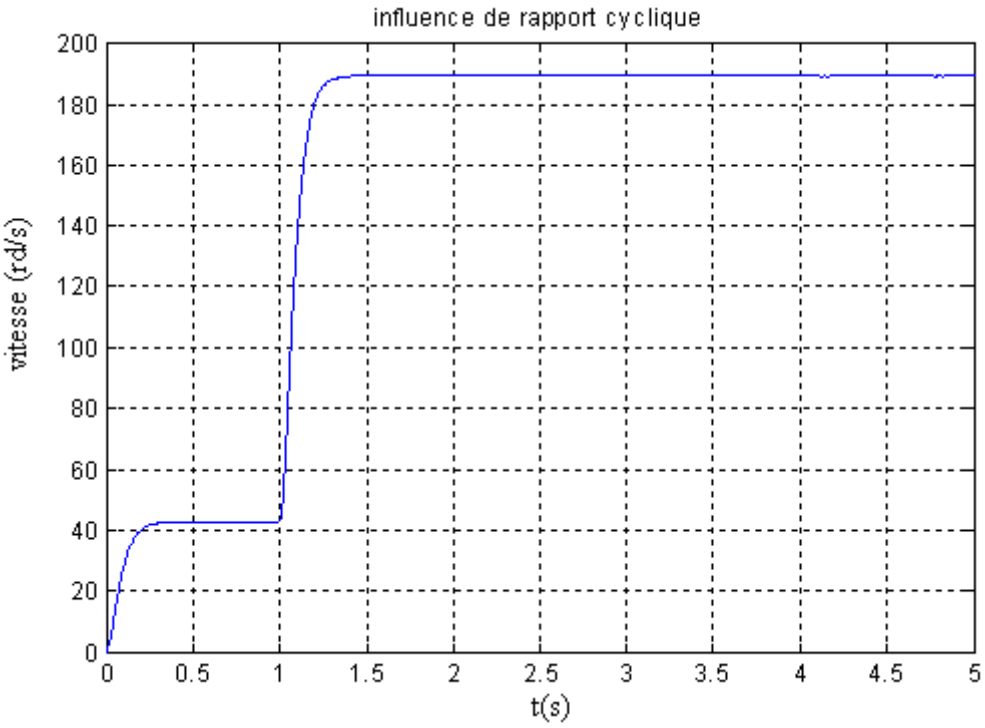


Figure.III.11. Influence du rapport cyclique sur la vitesse de rotation

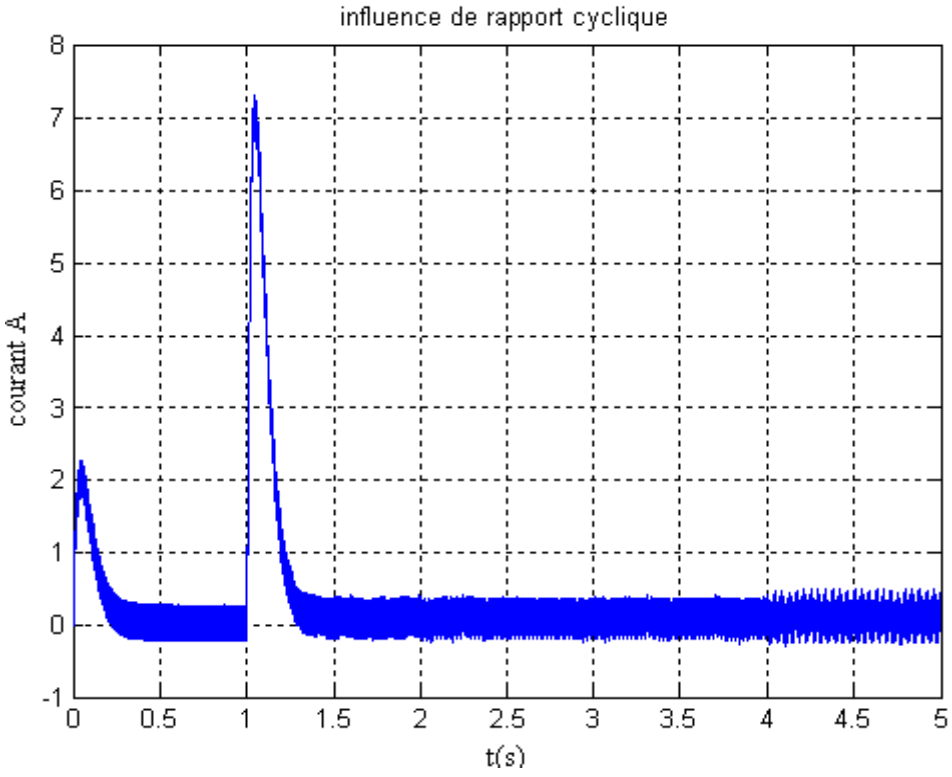


Figure. III.12. Influence du rapport cyclique sur le courant de l'induit

- **Interprétations**

Au démarrage le courant de l'induit est très grand il est simplement limité par la valeur de la résistance de l'enroulement de l'induit qui est très faible. Pour démarrer correctement le moteur, on doit l'alimenter sous une tension plus faible, et donc commander l'interrupteur de puissance de hacheur avec un signale à rapport cyclique plus faible.

La tension moyenne de sortie est positive pour un hacheur série, il y'a qu'un seule sens de rotation.

A partir de la figure 2.5 on constate que la vitesse de rotation est proportionnelle de rapport cyclique de l'hacheur

III.3.2 Simulation de l'association de la Mcc avec l'hacheur quatre quadrants

En ce qui suit, on présente les résultats de simulation de l'association Mcc-hacheur quatre quadrants

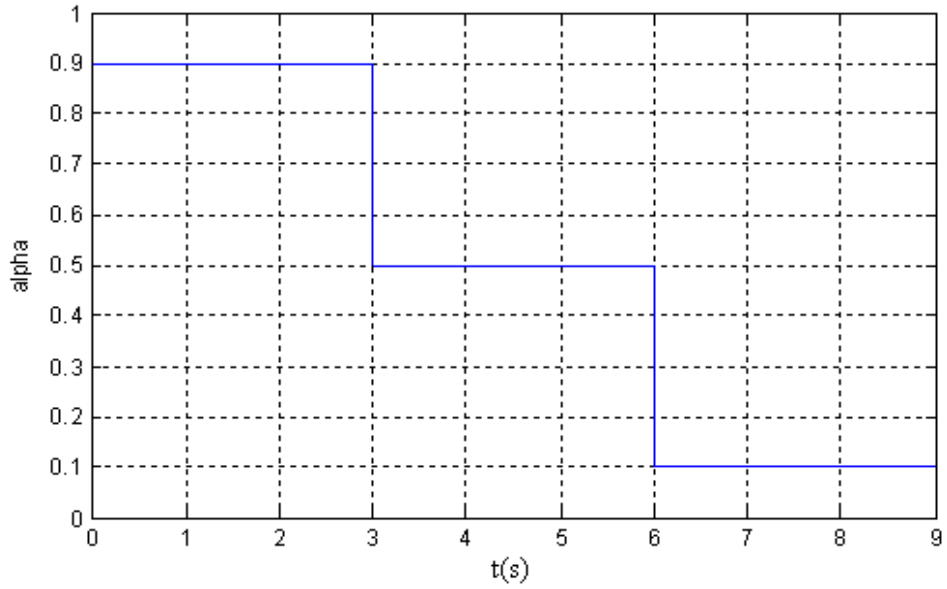


Figure.III.13. Variation du rapport cyclique

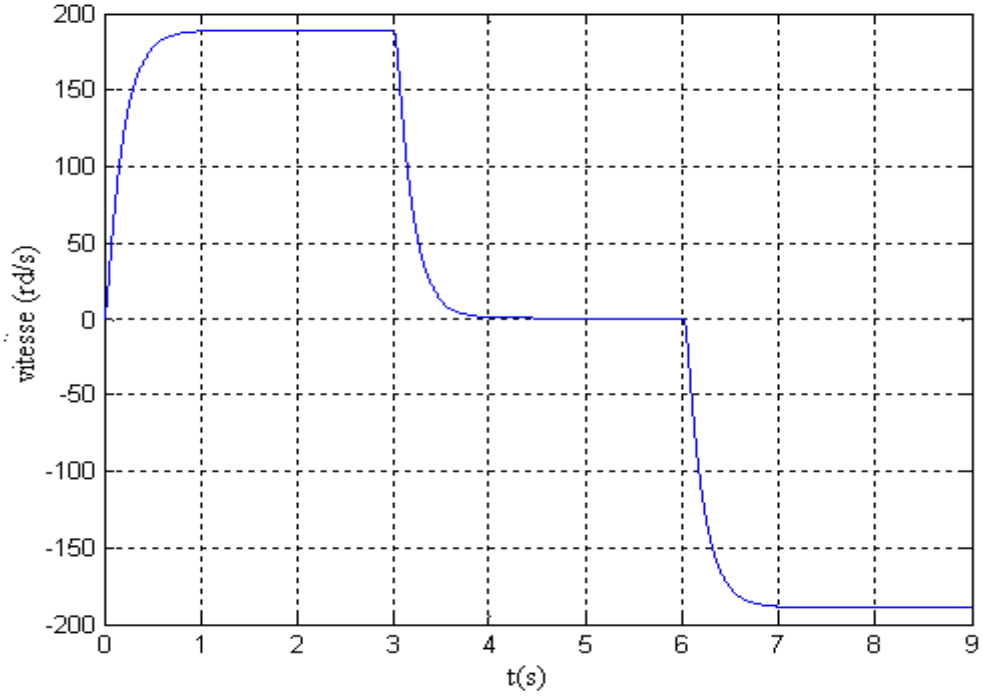


Figure.III.14. Réponse de la vitesse

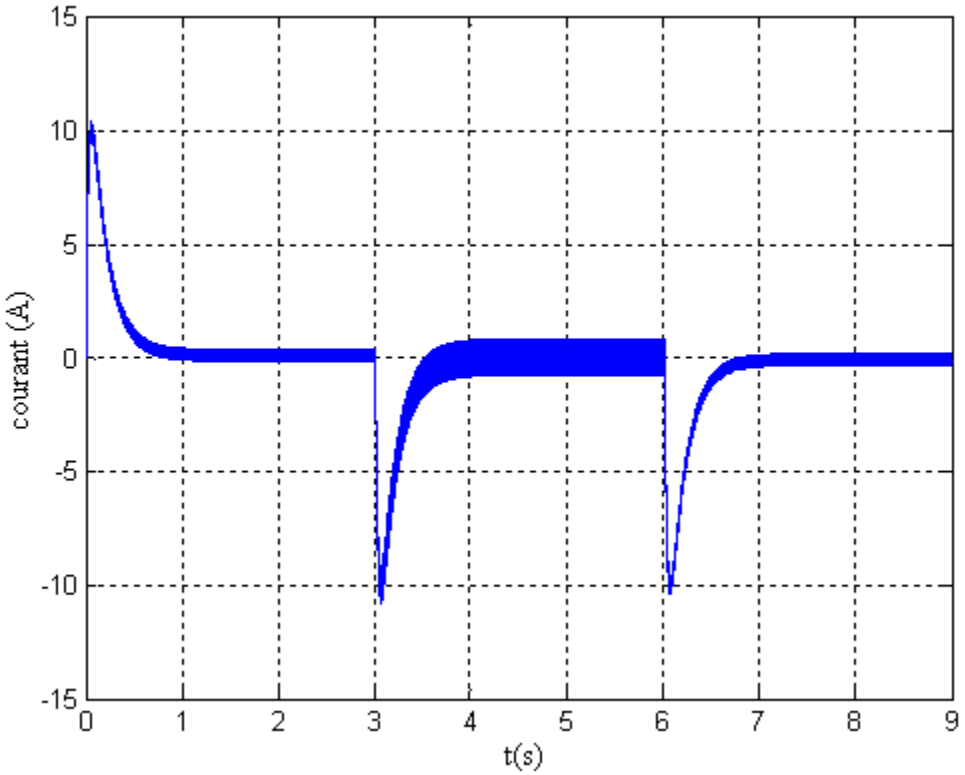


Figure. III.15. Réponse de courant

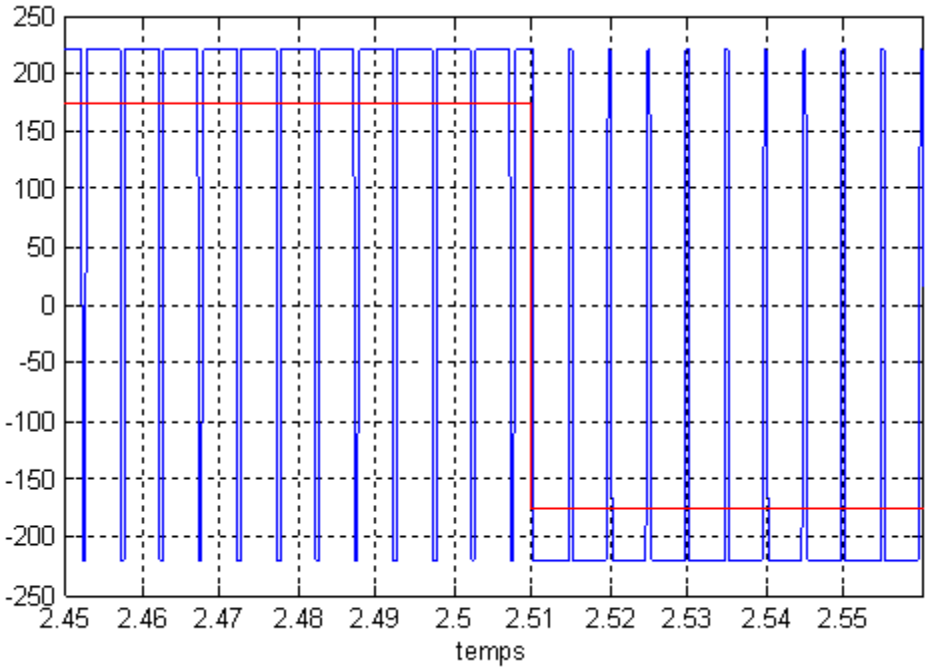


Figure. III.16. Tension de sortie

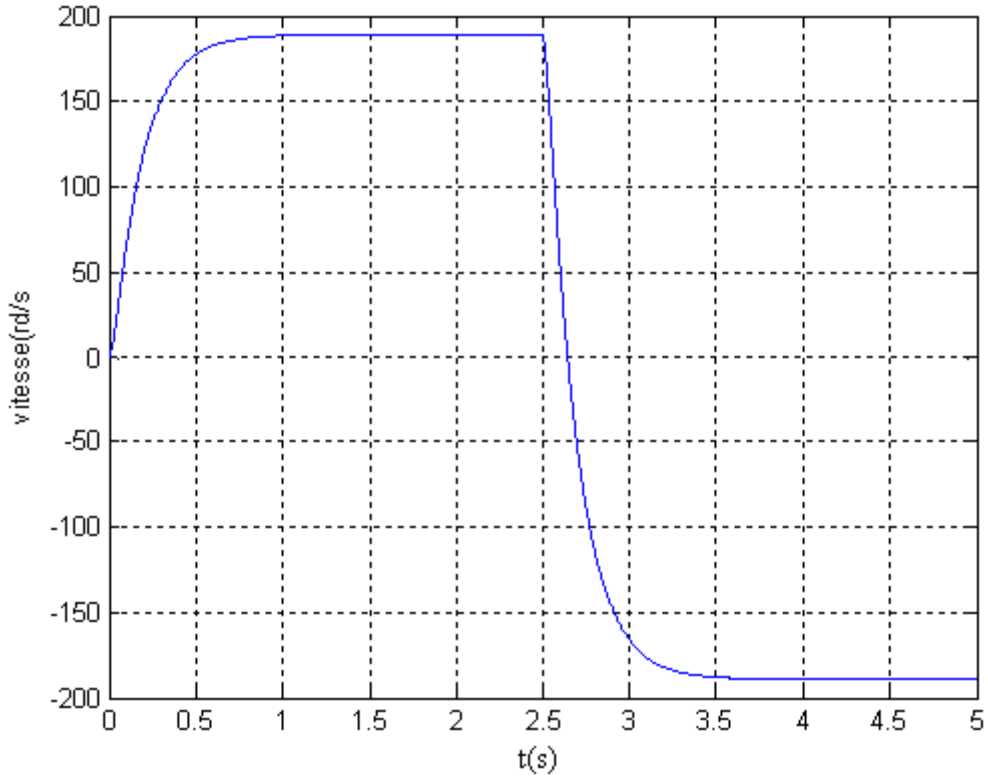


Figure. III.17. Réponse de la vitesse

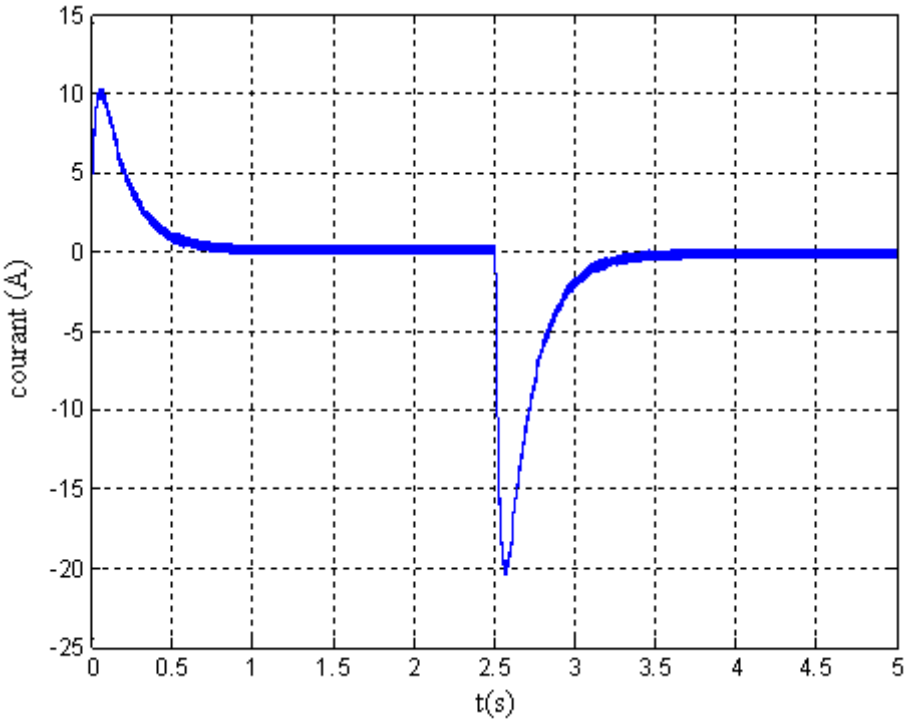


Figure. III.18. Réponse de courant d'induit

- **Interprétation**

La tension appliquée à l'induit peut prendre les valeurs +U ou –U ce qui permet de donner une valeur moyenne de tension de sortie positive ou négative.

On remarque que si on varie le rapport cyclique alpha la tension d'alimentation change est par conséquent la vitesse de rotation change.

III.4 Réglage en cascade de la Mcc

III.4.1 Synthèse de régulateur PI

- Nécessité d'une action intégrale

Dans de nombreux cas (système d'ordre supérieur à 1), il est impossible, à l'aide d'une correction proportionnelle, d'obtenir un bon compromis erreur statique / stabilité. Il est alors indispensable de trouver un type de correcteur permettant de limiter, voire d'annuler l'erreur statique.

Ce correcteur, s'il fonctionne correctement, doit fournir en sortie, au bout d'un certain temps, une tension de commande telle que le système présente une grandeur de sortie égale à la consigne.

Asservissement de courant

Les dépassements de courant observés précédemment constituent un véritable problème, tant pour le convertisseur statique que pour le moteur. Si le système (convertisseur+moteur) a été dimensionné pour une utilisation nominale, les transitoires de courant risquent de détruire les composants de puissance du convertisseur statique. Par ailleurs, dans le cas ou l'on utilise des éléments commerciaux, il arrive que le convertisseur soit surdimensionné, car pouvant fonctionner avec une gamme de moteurs de différentes puissances. Alors le convertisseur pourra délivrer le courant appelé. Ce sont alors les conducteurs du moteur qui risquent d'être détruits par une surintensité. Pour ces raisons il convient donc :

1. d'asservir le courant pour avoir la maîtrise des dépassements ;
2. de limiter le courant maximum pour protéger le moteur dans tous les cas.

L'étude de l'asservissement de courant du cc peut se faire par le raisonnement approché suivant :

La force électromotrice étant une grandeur proportionnelle à la vitesse de rotation, ses variations sont lentes devant celles du courant d'induit. On peut donc la considérer comme une perturbation dans le transfert tension-courant, Sous ces hypothèses la fonction de transfert

$G_i(s)$ Se résumé à :

$$G_i(s) = \frac{1}{R+L\,s} \qquad \text{(III.1)}$$

La fonction de transfert étant celle d'un premier ordre une simple correction **PI:**

$$C_i(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \qquad \text{(III.2)}$$

Pour synthétisé ce régulateur on a utilisé la méthode des pôles imposés permet de choisir les paramètres du régulateur afin d'aboutir à un système en boucle fermé rapide et qui possède un coefficient d'amortissement égale à $(\xi = 0.7)$

En prenant : $P_1 = -\rho + j\,\rho$, $P_2 = -\rho - j\,\rho$

dénominateur s'écrit $\text{den(s)} = (s - P_1)\,(s - p_2)$

En faisant comparaison avec le dénominateur de système électrique en boucle fermé on tire le coefficient de régulateur

$$\begin{cases} k_p = (2\,L\,\rho - R)/\,U \\ k_i \;\; = 2 * \mathrm{p\hat{}2} * \mathrm{L/U} \end{cases} \qquad \text{(III.3)}$$

- Asservissement de vitesse

L'asservissement de vitesse du Mcc est réalisé une fois le courant est réglé. On a donc un asservissement avec boucles imbriquées ou asservissement cascade, répondant au schéma de principe présenté en introduction. Pour réaliser l'asservissement de la vitesse du rotor d'un Mcc, la tension image de la vitesse mesurée est comparée à une tension de référence U, image de la vitesse désirée.

La vitesse du rotor est mesurée par l'un ou l'autre des capteurs possibles (génératrice bathymétrique, synchro-résolveur, codeur) et la tension image est directement obtenue en sortie du procédé dans le cas des capteurs analogiques, ou après comptage dans le cas des codeurs incrémentaux. En faisant abstraction du mode de mesure qui est ici assimilé à un simple gain k.

Si la boucle de courant est réglée comme suggéré précédemment, elle a alors une fonction de transfert du premier ordre et il est facile de régler la boucle de vitesse. En toute rigueur, il faudrait réécrire les équations dynamiques du Mcc asservi en courant. Ceci étant, on peut considérer que le bloc de fonction de transfert :

$$G_i(s) = \frac{1}{R+L\,s} \qquad \text{(III.4)}$$

Du schéma 2 est simplement remplacé par la fonction de transfert en boucle fermée G_iBF (s). Dans ce cas, la constante de temps de la boucle de courant étant très petite devant la constante de temps électromécanique du système, on obtient un modèle d'ordre deux , très proche d'un système du premier ordre. On peut donc à nouveau effectuer une synthèse correction PI .on utilisons la méthode des pôles imposés après calcul on tire les coefficients :

$$\begin{cases} k_i \;\; = \; (2\,\rho^2 j)/k \\ k_p = (2p\,j - f)/k \end{cases} \qquad \text{(III.5)}$$

III.5 Résultats de simulations en boucle fermé

Alimentation avec contrôle de la vitesse et limitation du courant

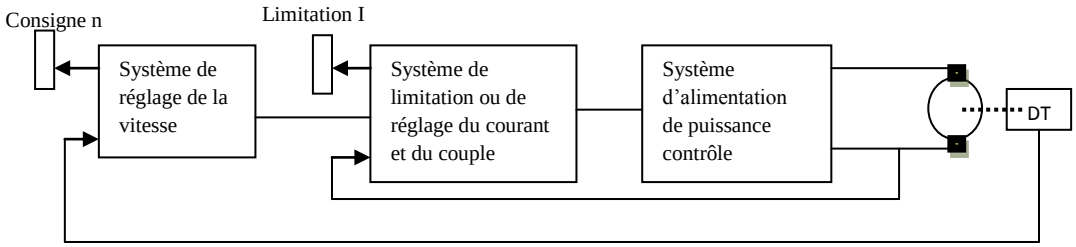


Figure. III.19. Structure de réglage en boucle fermée

La vitesse initiale et le courant initial sont nuls. On applique tout d'abord la tension maximale autorisée pour atteindre le plus rapidement possible le courant maximal d'induit. On asservit ensuite la tension d'induit pour maintenir le courant d'induit maximal pendant l'accélération. Lorsque la vitesse de 157tr/min est atteinte la tension d'induit est positionnée afin d'imposer un courant d'induit tel que Ce = Cr (dans notre cas le moteur est à vide et les couple de pertes moteur ne sont pas négligés donc $Ind \neq 0$). Lorsque le couple résistant passe de 0 à 1.5Nm le système réagit pour maintenir Ce = Cr à la vitesse de 157 tr/min.

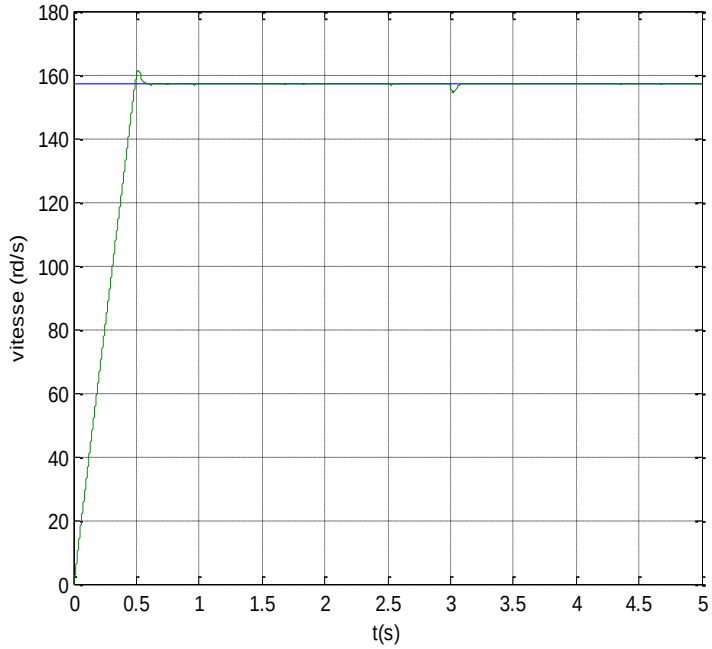


Figure. III.20. La réponse de la vitesse en boucle fermé

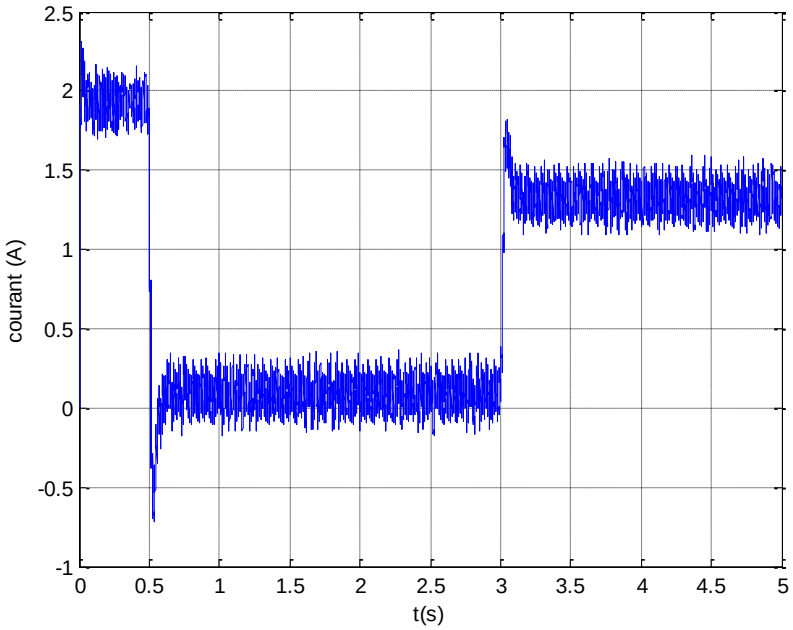


Figure. III.21. La réponse de courant en boucle fermé

Pour testé les performances de notre régulateur on à applique une référence de vitesse qui démarre d'une valeur positive +157 puis on à inversé le sens brusquement à -157 et on voit clairement que la sortis suit la référence.

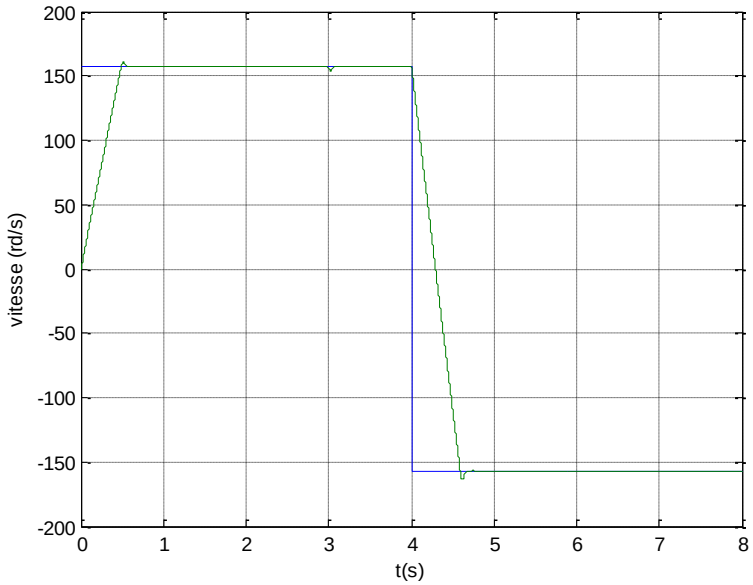


Figure. III.22. La réponse de vitesse

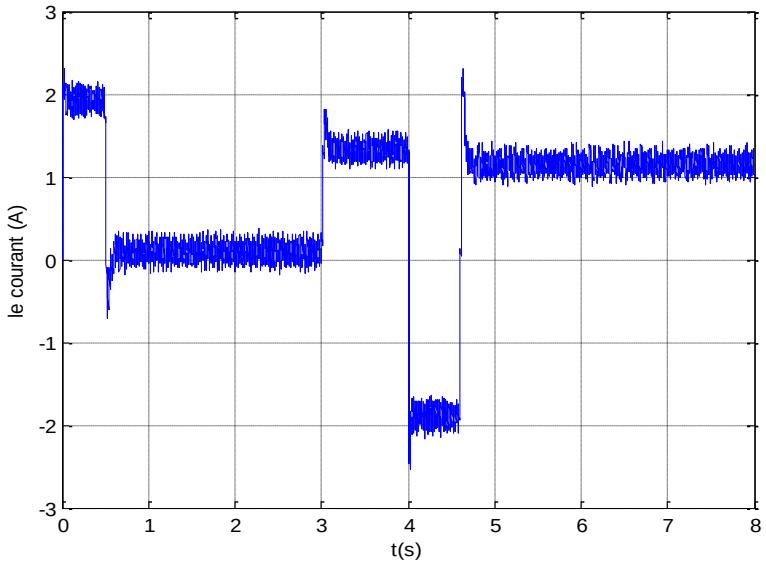


Figure. III.23. La réponse de courant

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons traités un réglage du courant et de vitesse en cascade afin d'améliorer les performances du moteur à courant continu et limiter le courant circulant dans son induit, ce qui a un effet favorable sur le problème d'échauffement de la machine. On remarque que le couple développé par Mcc excitation série est très grand para port Mcc excitation séparer.

IV.1 Introduction

L'architecteur d'un quad est d'une grande importance et peut avoir un impact sur les performances des quads. Le but de ce chapitre est présenté la démarche suivie pour la conception et la réalisation de notre quad. Cette partie rassemble : l'emplacement du moteur électrique d'entraiment, la conception et la réalisation de la carcasse des batteries, et la réalisation de la poulie de l'arbre moteur, la conception et la réalisation de la carcasse de notre quad.

IV 1er proposition avec quatre roues

IV .1.1.1 Plate-forme véhicule électrique

Le schéma général du banc d'essai, avec ses principaux composants, est présenté sur la Figure IV.1

Ils sont composés des batteries de types 6-DZM-20 et d'une moteur à courant continu de types BOSCH



Figure IV.1. Le schéma général du banc d'essai

IV.1.2 Adaptation du moteur de traction

Tout d'abord, nous devons mentionner que nous n'avons tende la moteur thermique de sa place. Les dimensions du système d'entrainement que nous allons utiliser sont importantes pour choisir le bon endroit ainsi que le support nécessaire pour le monter dans notre structure.

La figure IV.2 illustre la structure mécanique du quad

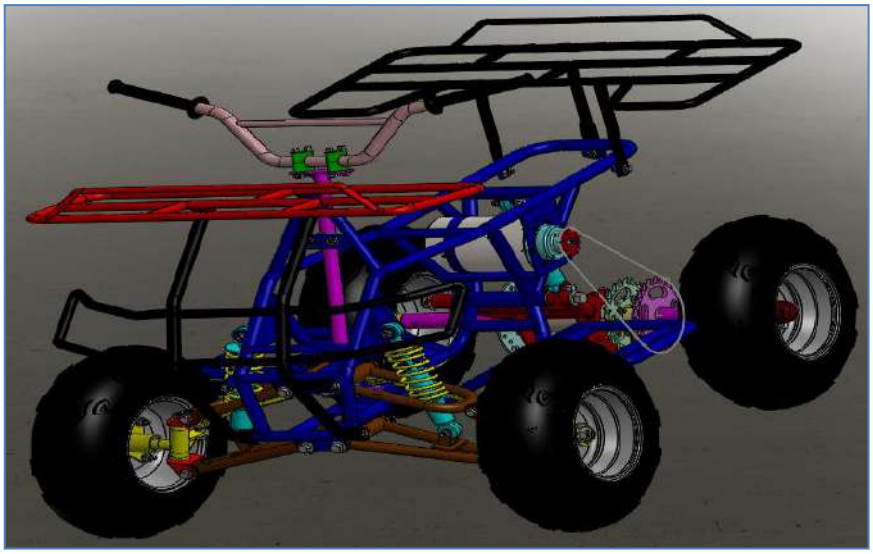


Figure IV.2. Adaptation structure mécanique du quad à la traction électrique

Nous avons utilisé un moteur à courant continu disponible au laboratoire de type bosch dont les caractéristiques :

Vitesse maximale	2000 tr /min
Tension	12 V
Puissance	1500 W

Ce moteur est accoupler par un réducteur de type chaine

Le meilleur emplacement du moteur électrique est l'arrière du quad parallèlement à l'axe des roues arrière .pour cela nous avons proposé la conception ainsi que la réalisation d'un support d'adaptation pour le moteur.

La figure IV.3 Illustre le supporte du moteur.

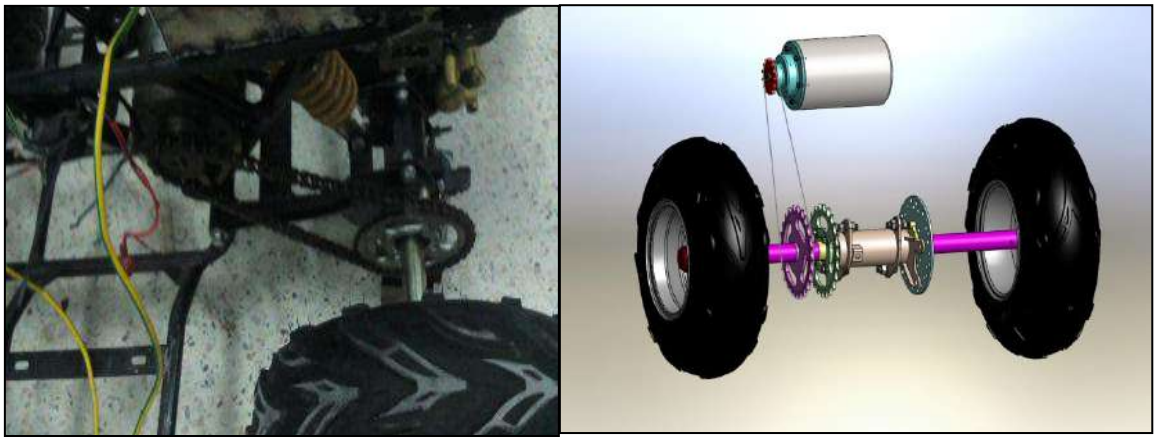


Figure IV.3. Emplacement du moteur

IV.1.3 La transmission mécanique

IV.1.3.1 La poulie de l'arbre moteur

La poulie en sortie de l'arbre moteur est en fer et dispose de 14 dents. Elle a été fabriquée au laboratoire.

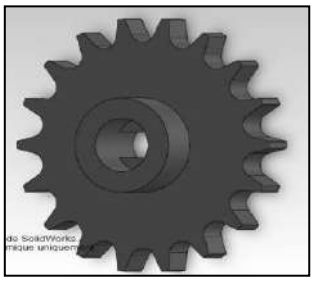


Figure IV.4. Poulie de l'arbre de moteur

IV.1.3.2 Définitions et calculs

La figure suivante définie les grandeurs mécaniques utilisées à savoir :

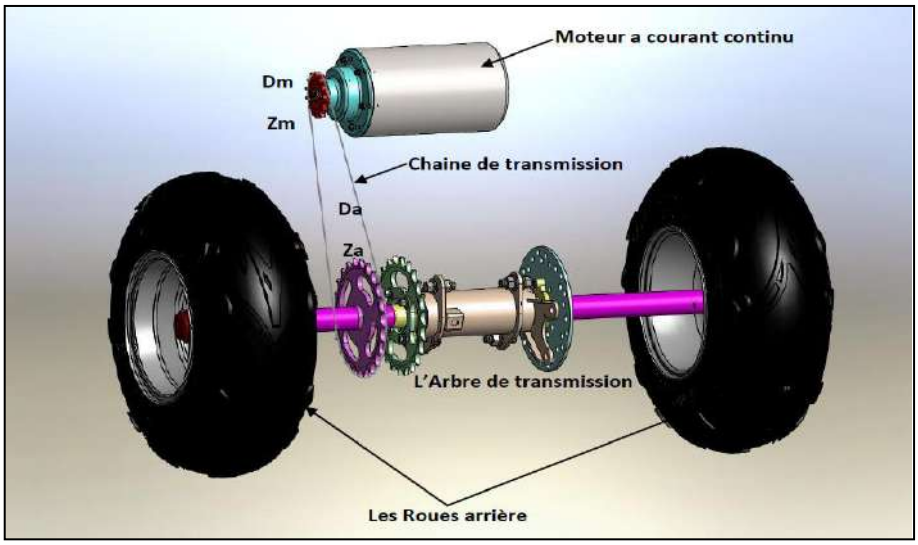


Figure IV.5. Schéma de la transmission (quad électrique).

❖ pour le moteur électrique

-Nm : la vitesse en tours par minute

-Dm : le diamètre de la poulie coté moteur

-Zm : Nombres des dents de poulie moteur

❖ pour l'arbre de transmission

- Na : la vitesse en tours par minute

- Da : le diamètre de la poulie coté l'arbre roue

- Za : Nombres des dents de l'arbre de transmission

- **pour les roues**

- *Nr :* *Na* la vitesse en tours par minute

- *Dr :* le diamètre des roues

- ***V :*** est la vitesse linéaire en kilomètres par heure

La vitesse de l'arbre de transmission est donnée par le rapport du diamètre des poulies :

$$\boldsymbol{i} = \frac{Nm}{Na} = \frac{Da}{Dm} = \frac{Nb\ dent(a)}{Nb\ dent(m)} = \frac{Za}{Zm} = \frac{37}{14} = 2.64$$

$$\text{Na} = \frac{Nm}{2.64} = \frac{2000}{2.64} = 757.57\ tr/min$$

La vitesse de rotation des roues est égale à celle de l'arbre moteur :

$\text{Na=Nr=}757.57\ tr/min$

La vitesse angulaire de rotation des roues est donnée par :

$$\Omega r = \frac{2\pi \times Nr}{60} = 757.57\ \times \frac{\pi}{30} = 79.33\ rad/s$$

La vitesse linéaire du véhicule vaut alors :

$$|V| = \frac{Dr}{2}\Omega r = 0.2 \times 79.33\ = 15.86\ m/s$$

La conversion en kilomètre par heure donne :

$$\text{V} = |V| \times \frac{3600}{1000} = 15.86 \times 3.6 = 57.11\ \text{km/h}$$

IV.1.4 Approvisionnement en énergie

Notre quad a besoin d'une alimentation énergie pour pouvoir effectuer la traction électrique. Il est pourvu de moteur électriques il a besoin d'une source électrique, énergie peut être stockée dans des batteries. Nous allons employer quatre batteries, pour le moteur de traction.

La Figure IV.6. Montre le type de batterie utilisée :



La Figure IV.6. Le type de batterie utilisée

IV.1.4.1 spécification des batteries utilisée

- **Détails rapides**

Point d'origine	La Chine (continent)	**Nom de marque**	Zhenlong
Numéro de Type	6-DZM-20	**Type**	batterie d'acide de plomb/gel battery/VRLA
Tension nominale	12V	**Taille**	181*76*170mm
Capacité nominale	30Ah	**Certificats**	CE/ROHS

IV.1.4.2 L'alimentation de Moteur

Pour obtenir bon fonctionnement de moteur nous raccordé quatre batteries parallèlement

Figure IV.7 Illustre le montage :

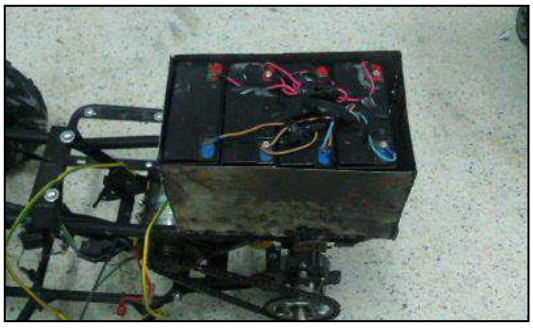


Figure IV.7. Illustre le montage de l'alimentation

Nous avons calcul le courant la tension et le poids de chaque batterie :

Courant	4x22=88Ah
Tension	12 V
Puissance	12x88=1056wh
Poids	4xPoids

IV.2. 2eme Proposition avec trois roues

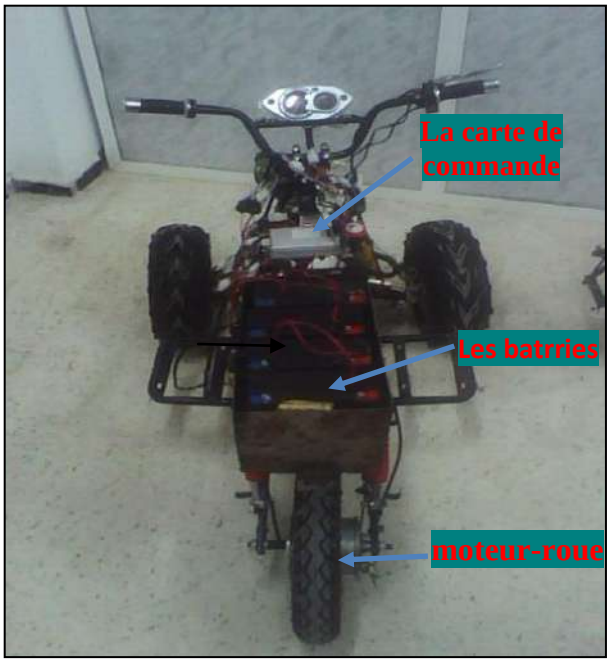


Figure IV.8. Le schéma général du banc d'essai

IV.2.1 Le moteur roue

La machine électrique que constitue le moteur-roue est de type synchrone triphasé à aimants permanent situés dans un rotor externe. Le bobinage est fait parcourir un courant de 30A nominal qui crée un champ tournant qui a pour but d'entraîner le rotor

La figure II.9 représente le moteur roue

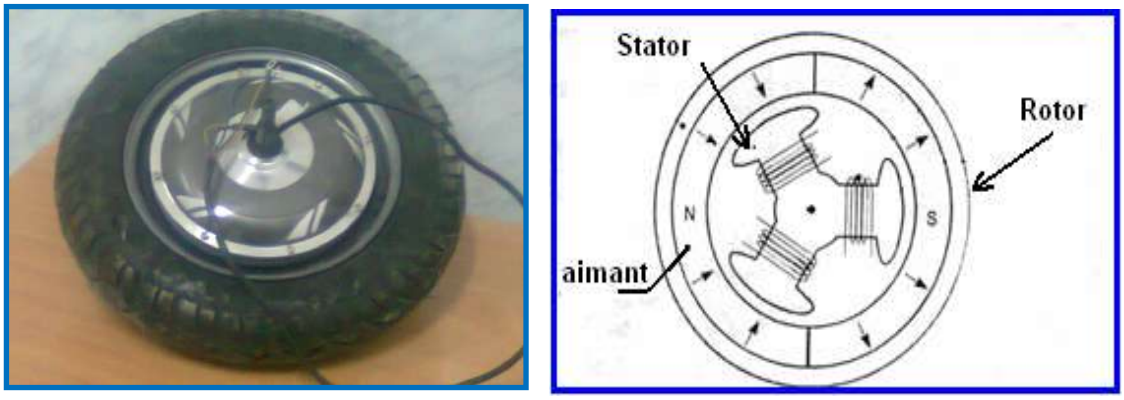


Figure IV.9 Architecte de moteur roue a rotor externe

- **Détails rapides**

Types de Moteur:	Moteur sans balais
Tension:	48V
Puissance en watts:	1000 w
Taille de roue:	20 " - 28 " 700c
Endroit de moteur:	avant
Poids:	5.7kg

IV.2.1 .2 Introdiction sur le moteur brushless

Les moteurs à C.C ont été graduellement remplacées par des moteurs Brushless puisque les applications industrielles exigent des actionneurs plus puissants ont de faible encombrement. La souplesse à la commande, la longue durée de vie due à l'absence de la commutation mécanique ainsi qu'il présente moins de bruit acoustique sont les principaux avantages de ce moteur .Leur principal inconvénient est la nécessité d' avoir une électronique de contrôle. Mais cet inconvénient est dépassé grâce au progrès réalisé dans les domaines de l'électronique de puissance et l'arrivé des nouveaux calculateurs numériques très sophistiqués ce qui permet de réaliser des variateurs performants.

IV.2.1.3 Constitution du moteur Brushless

Les moteurs Brushless sont constitués de 3 éléments principaux :

- Une partie fixe, le stator, muni de trois groupes de bobines, appelées les trois phases du moteur. Ces bobines fonctionnent comme des électro- aimants et permettent de générer diverses orientations du champ magnétique régulièrement réparties autour de l'axe central du moteur.

- Une partie tournante, le rotor, muni d'aimants permanents. Comme l'aiguille d'une boussole, ces aimants vont en permanence entraîner le rotor pour tenter de s'aligner sur le champ magnétique du stator. Pour une durée de vie optimale du moteur, le rotor est monté sur roulements à billes.
- Trois capteurs magnétiques à " effet Hall ". Ces capteurs permettent de connaître à chaque instant la position des aimants du rotor [21].

La machine à courant continu sans balais se présente généralement munie de ses capteurs de position. Ses connexions extérieures comprennent donc les bornes des enroulements et les bornes des capteurs.

IV.2.1.4 Moteur Brushless à rotor extérieur

La figure suivante présente le schéma d'un moteur à rotor extérieur :

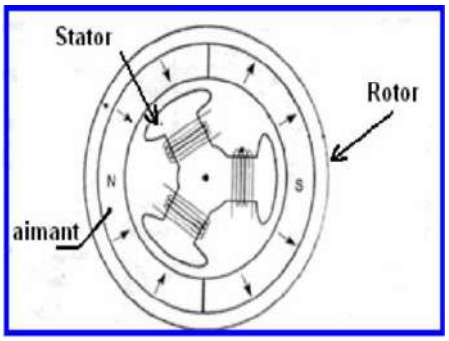


Figure IV.10 : Moteur Brushless à rotor externe

Les tôles utilisées au stator ressemblent à celles de l'induit de la machine à courant continu à balais. Ce type de stat or est simple à bobine r, car le fil se bobine directement sur le stator section par section. Le rotor est constitué d'aimants montés dans une cloche magnétique permettant la continuité du champ. Dans cette configuration, il n'y a plus de problème pour maintenir les aimants, car ils sont plaqués sur la cloche par l'action de la force centrifuge.

Cette structure est celle utilisée pour l'entraînement des lecteurs CD-ROM et elle est aussi fréquemment utilisée dans les applications de ventilation pour son faible coût et sa facilité de fabrication. Cependant, les machines à rotor extérieur ne sont utilisées que pour des applications à vitesse constante car le rotor a une inertie import ante de par sa position externe

IV.2.2 L'alimentation électronique du moteur bruschless

La structure globale d'un moteur à courant continu sans balais comprend :

- des capteur, munis éventuellement de circuits de mise en forme, qui permettent de connaître la position du rotor à tout instant en général des capteurs à effet hall.
- un circuit logique qui élabore les commutation à appliquer aux différents phases du moteur compte tenu des signaux issus des capteurs.
- un commutateur de puissance qui alimente les enroulements en fonction des informations reçues par la logique de commande.
- une commande de la tension ou du courant permettant d'agir sur la vitesse du moteur.

Les trois premières fonctions permettent d'effectuer les commutations assurées par le système balais-collecteur dans un moteur à courant continu classique tandis que la dernière est analogue à celle qui est utilisée pour la commande de ces mêmes moteurs [21].

IV.2.4 Contrôleur

Dans un moteur à courant continu avec balais, l'ensemble collecteur-balais assure mécaniquement la commutation dans l'alimentation des bobines en fonction de l'angle du rotor. Dans un moteur brushless cet élément n'existe plus, il faut donc créer cette commutation électroniquement.

La figure IV.14 Illustre la carte électronique

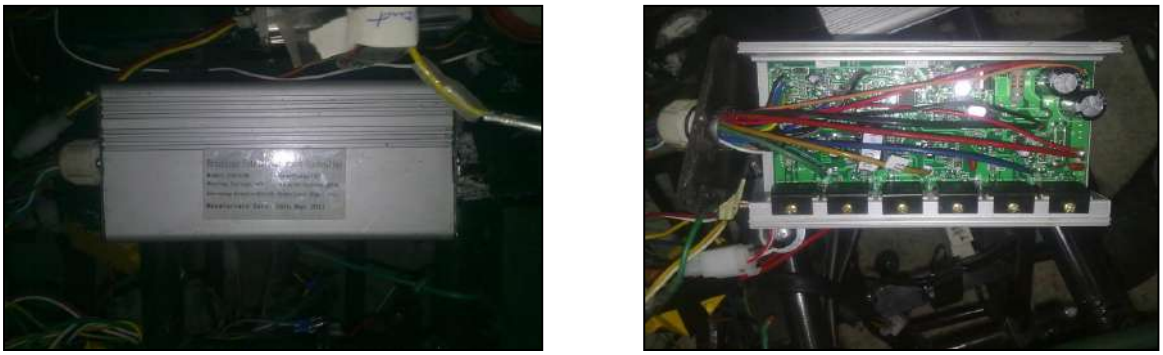


Figure IV.14. Le controlleur

- **Détails rapides**

Brushless Intelligent moteur Controller	
Modal	JDK403R
Tension de fonctionnement	48V
Puissance	1000W
La protection à minimum de tension	42±0.5V
Seuser phases	120
Protection contre les surintensités	30±1A
De niveau de freinage	Niveau élevé
Taille de coque	200mm*90mm*45mm
Manufacture Date 16.may.2011	

IV.2.4.1 Connecteur /Définition de fil



Figure IV-15 Les différents Connecteur.

IV.2.4.1 Connecteur /Définition de fil

1- batterie : grand rouge à ‘’+’’ ,grand noire à ‘’-‘’, slim jaune à ’’ serrure à clé ‘’

2- vitesse en mode : crochet à la vitesse en mode de commutation (la plupart avec ‘’lent’’ ‘’ moyen" " rapide" trois bandes).

3- auto-étude :plug-in à la première fois, le contrôleur aurait phases d'alignement automaticlly et la mémoire, puis branchez-out.

si inverse de marche du moteur, assurez plug-in / Plug-out en même temps.

4- anti-voler 1 : bleu-moteur de verrouillage, d'orange-serrure, brun-verrouillage de phase

anti-voler 2 : fournir une alimentation anti-voleur

5- Frein-bas : prendre la tension’’- ‘’en tant que signal de frein

Frein-Salut : prendre la tension’’+’’ en tant que signal de frein

7- étrangler : le contrôle de tous les accessoires (Lampes, clackson).

8- hall : Lié avec les Capteur à effet Hall qui Situé à l'intérieur du moteur

- **Caractéristiques**

- Intelligent avec microcontrôleur puissant.
- Le redressement synchrone, ultra faible chute,
- Rapide PWM pour atteindre un rendement très élevé.
- Régulateur de courant et de couple.
- Actuelle de la batterie en limitant disponibles, n'affecte pas décoller les performances. Le conseil d'administration-code défaut LED permet le débogage de l'utilisateur.
- Protection de la batterie: coupure de courant de retour,
- arrêt et d'alerte de la batterie haute ou basse.

Thermique du logement amélioré robuste en aluminium

- Connecteurs robustes.
- Facilité d'installation:

Fonctions générales

1 de détection de défauts et de la protection étendue.

2 tension de la batterie de surveillance. Il sera d'arrêter de conduire si la tension batterie est trop élevée.

3 intégré dans la boucle de courant et protection contre les surintensités.

3 3 entrées analogiques, 0-5V. Par défaut d'étrangler d'entrée de freinage d'entrée,

IV.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé la conception et la réalisation de la plate-forme véhicule électrique. Pour cela, nous avons proposé deux architecteur d’un quad, le premier avec quatre roues et l’autre avec trois roues . et effectué l’adaptation du moteur électrique, la réalisation de la carcasse du quad, l’étude sur la transmission mécanique, pour l’obtention la bon fonctionnement de moteur nous utilisons quatre batteries raccordés parallèlement pour augmente l’intensité de courant d’alimentation a cause augmente le couple de moteur.

Conclusion générale

Au cours de cette dernière décennie, la réduction des émissions polluantes des véhicules, notamment le gaz carbonique CO2, est devenu un des plus importants défis à relever par les constructeurs automobiles. Plusieurs solutions ont été proposées à cet effet et l'hybridation s'est avérée une des alternatives prometteuses pour le court et le moyen terme.

Dans notre travail on a étude de cette dernière qui a fait l'objet de ce document. Dans la première partie de notre travail, nous avons donné des généralités sur le quad électrique. Nous y avons présenté les différents types rencontrés, le quad électrique et principalement, le véhicule ''tout électrique''. Nous avons montré également les caractéristiques mécaniques d'un véhicule et donné quelques éléments d'optimisation des chaînes de traction correspondantes.

Dans la deuxième partie on a parler sur , les moteurs à courant continu, il sont toujours aussi répandus, à cause de la simplicité de leur commande en vitesse variable. Mais ils présentent les inconvénients d'avoir des rapports poids/puissance et poids/volume pas très intéressants, de fournir une plage de variation de vitesse relativement limitée, et de nécessiter une maintenance régulière, et donc coûteuse, due à l'usure des balais. C'est pour cette raison que les recherches se sont orientées vers l'utilisation des moteurs à courant alternatif avec pour objectif d'améliorer et de simplifier leur commande. Cependant, on constate de plus en plus une utilisation massive des moteurs alternatifs en raison de leur plus faible coût et de leur maintenance facile. En effet, jusqu'à il y a quelques années, la commande en vitesse variable des machines alternatives était difficile à mettre en œuvre, celle-ci demandait une puissance de calcul que les processeurs de l'époque ne pouvaient fournir ou seulement à des coûts prohibitifs. Avec le progrès de la technologie, les coûts ont diminué et la puissance de calcul n'a cessé d'augmenter, favorisant ainsi l'émergence de ces machines jusque là réservés aux applications de grande puissance.

Dans la troisième partie, nous avons développé le commande du moteur par simulation en MATLAB qui nous permit l'examen des différents configurations du commande .

Conclusion générale

On constate a partir de simulation en matlabe le moteur a excitation séparer, il est autorégulateur de vitesse . par contre le moteur à excitation sérié, il est autorégulateur de puissance .possède un très grand couple de démarage mais risque l'emballement à vide.la vitesse décroit quand la charge augmente .Ce moteur il est mieux en traction électrique .

La dernière partie a traité de la partie expérimentale de notre projet. Nous avons présenté comment effectué l'adaptation du moteur de traction

Il reste à la suite de notre travail de développer un quad automatisé peut valoir un UGV (unmanned ground vehicle) dont les applications sont multiples.par exemples : Sécurité civile, Militaire, Espace, Industrie nucléaire .

Bibliographie

[1] : Nicolas BOUTON, « Modélisation et caractérisation du comportement menant au renversement d'engins agricole de type quad »,Thèse MASTER STIC 2006

[2] : Bernard Multon , Laurent Hirsinger « Problème De La Motorisation D'un Véhicule Electrique» ,Ecole normale supérieure de Cachan , d1375 Revue 3E.I n 5 mars 96 pp.55-64.

[3] : Guy.Grellet,Guy.Clerc «Actionneurs Electrique, Principes,Modeles,Commande» ,Eyrolles,dexieume tirage 2000.

[4] : M. PORNIN, « Traction électrique automobile routière », Techniques de l'Ingénieur, Traité de Génie électrique, juin 1981.

[5]: Shin-ichiro.Sakai, Takahiro .Okano, « Experimental Studies on Vehicle Motion Stabilization with 4 Wheel Motored EV », Tokyo, Japan, 2000.

[6]: H.Chenoufi, « Contribution a l'étude et commande d'un véhicule électrique à deux roues motrice ». Thèse de magister, EMP 2005.

[7]:. HSE. "Safe use of all-terrain vehicles (ATVs) in agriculture and forestry". HSE informatio sheet n°33, Mars 2005.

[8]: Eger, R. and U. Kiencke. "Modeling of rollover sequences". Institute of Industrial Information Technology. Karlsruhe : Allemagne. 2003.

[9]: Grift, T. and M. Veal. "Adaptive tractor overturn prediction system". University of Illinois.Urbana-Champaign : U.S.A. 2004.

[10]: Hac, A., T. Brown and J. Martens. "Detection of vehicle rollover". In SAE World Congress. Detroit : U.S.A. 2004.

[11]: Johansson, B. and M. Gäfvert. "Untripped SUV rollover detection and prevention". In 43rd IEEE Conference on Decision and Control. Atlantis : Bahamas. 2004.

[12]: Odenthal, D. , T. Bünte and J. Ackermann. "Nonlinear steering and braking control for vehicle rollover avoidance". In European Control Conference. Karlsruhe : Allemagne. 1999.

[13] : Falah, B. "Comportement dynamique de véhicules tout-terrain (quad) en présence d'un second passager". Université du Québec. Rimouski : Québec. 2003.

[14]: Wenzel, T. P. and M. Ross. "The effects of vehicle and driver behavior on risk". University

[15] : Trouillet, N. "Stabilité des véhicules agricoles de type quad". Institut Français de Mécanique Avancée. Clermont-Ferrand : France. 2005.

[16] : Baass, Karsten G. "Les problèmes de sécurité associés au design mécanique des véhicules hors route dans les conditions de conduite sur les sentiers et sur la route". In 39ème congrés annuel de l'AQTR. 2004.

[17] :Gaspar, P., I. Szaszi and J. Bokor. "Two strategies for reducing the rollover risk of heavy vehicles". Computer and Automatic Research Institute. Budapest : Hongrie. 2004.

[18] : M. CHAIBI et A H. MOULIA, « Dévlopment d'une plate-forme mobile pour la manipulation robotisée », Thèse d'ingénieur d'état, EMP 2012.

[19] : Y.A.CHAPUIS, D.ROYE, S.COURTINE « Commande Directe du Couple d'une Machine Asynchrone par le Contrôle Directe de son Flux Statorique » Thèse de Doctorat INP Grenoble, 1995.

[20] Grouzet, constructeur des moteurs BLDC, « Notions de base », data sheet.

[21] DJEMAI Mourad et TELLAA Mawloud «Commande de la vitesse et de la position d'un moteur à courant continu sans balais pour les applications en robotique» . Thèse de d'ingénieur, EMP 2007.