

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique

Université Djilali Bounaama KHEMIS MILIANA



Faculté des Sciences et de la technologie Département des Sciences et technologie

Mémoire Présenté
Pour l'obtention de diplôme

Master

En

<<Electrotechnique>>

Option :

<<Electrotechnique Industriel>>

Titre :

Etude et Elaborations des Bancs D'essai pour Variation de Vitesse des Moteurs MCC Et MAS

Présenté par :

Mr. MAZOUZI MAHFOUDH

Mr. BOUNEDJAR MOHAMED

Devant le jury composé de :

Md. HAMZAOUI IHSEN

Président

Mr. KACI MEZIANE

Encadreur

Mr. BENALLAL Mohamed Nadjib

Examineur

Année Universitaire : 2018/2019

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

« Ma très chère mère.

Mon très cher père.

Mes sœurs et mes frères

toutes mes familles Mazouzi

Mon binôme

Tous mes amis.

Toute la promotion 2018/2019



Mazouzi Mahfoudh

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

« Ma très chère mère.

Mon très cher père.

Mes sœurs et mes frères

toutes mes familles Bounedjar

Mon binôme

Tous mes amis.

Toute la promotion 2018/2019



Bounedjar Mohamed

Remerciement

Avant tout :

Nous remercions Allah tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience pour terminer ce travail

Ce présent, n'aurait pu avoir le jour sans la contribution de nombreuses personnes dont nous faisons aujourd'hui un plaisir et in devoir de les remercier, et de leur témoigner notre profonde gratitude

*Nous remercions notre encadreur **KACI MEZIANE** pour l'intérêt qu'il apporté à ce travail, qu'il nous a accordé tout au long de ce travail. A tous les enseignants de la faculté génie électrique*

Nous n'oublions pas nos parents de leur soutien moral et matériel

Qu'ils sont de mémé pour tous nos ami(e) dont le soutien indéfectible et leur fidélité en amitié .merci

Nous présentons également nos remerciements aux membres de jury qui daigneront, évaluer et juger notre travail

Enfin, nos remerciement à toutes les personnes qui nous ont aidé de près ou de loin durant notre formation.

Résumé

Ce mémoire présente l'étude et la réalisation de banc d'essai pour variation de vitesse des moteurs (à courant continu, asynchrone)

Nous commençons notre travail par une étude théorique du machine à courant continu et moteur Asynchrone, description des deux machine en présentant ; les différents types existant, avantage et les inconvénients, couple, bilan de puissance et la vitesse de rotation.

Puis, nous allons présenter les différentes méthodes de variation de vitesse des moteurs à courant continu et moteur asynchrone. Parmi ces méthodes, on a la méthode de modulation de largeur d'impulsion (MLI). Son principe et leurs avantages et inconvénients est bien présentés dans ce mémoire et avec description des différents éléments d'électronique de puissance utilisés dans notre réalisation. La simulation des hacheurs à un seul quadrant et quatre quadrants d'un moteur à courant continu et la variation de vitesse de Moteur AC est faite en utilisant MATLAB/SIMULINK. Avec le logiciel ISIS PORTEUS, on a simulé le moteur à courant continu. Dans la partie réalisation, on a réalisé un banc d'essai du variateur de vitesse d'un MCC avec objectif de varier la vitesse d'un moteur MCC.

Mots clés : variateur de vitesse, Moteur DC, Moteur AC, banc d'essai, PWM

ملخص

تعرض هذه المذكرة دراسة وتحقيق تطوير منصدة اختبار لتغير سرعة المحرك (محرك تيار مستمر ومحرك غير متزامن) نبدأ عملنا من خلال دراسة نظرية لآلة لي محرك تيار مستمر ومحرك غير متزامن وسنقدم وصف الجهازين بمختلف الأنواع والمزايا والعيوب وعزم الدوران بعد ذلك سوف نقدم الاختلافات في السرعة المختلفة لمحركات التيار المستمر والمحركات غير المتزامنة. ثم سنقدم طريقة تعديل عرض النبضة (PWM) ومبدأها ومزاياها وعيوبها. بعد أن نتحدث عن العناصر المختلفة للإلكترونيات الطاقة المستخدمة في إدراكنا ومحرك تيار مستمر نعمل على محاكاة رباعي المروحيات وأربعة المروحيات الرباعية لمحرك وتغيير محاكاة السرعة. محرك غير متزامن. MATLAB/SIMULINK كما نفعل محاكاة محرك على ISIS PORTEUS . أخيراً تم إجراء اختبار التحكم في سرعة محرك تيار مستمر وصلنا إلى الهدف هو التحكم في اختلاف سرعة محرك تيار مستمر.

الكلمات المفتاحية : معدل سرعة, محرك مستمر محرك غير تزامني , منصة اختبار , تعديل عرض النبضة

Abstract

This thesis presents the study and development of a test table to change the engine speed (DC motor and asynchronous motor).

We start our work through a theoretical study of a machine that has a DC motor and an asynchronous motor and we will describe the two devices in different types, .advantages, defects and torque

After that we will offer different speed variations for DC motors and asynchronous motors. We will then introduce the PWM method, its principle, advantages and disadvantages. After talking about the different elements of the energy electronics used in our perception and the DC motor, we work on simulating four helicopters and four helicopters for the engine and changing the speed simulation. Asynchronous drive MATLAB / SIMULINK. We also do a simulation engine on ISIS PROTEUS. Finally, the control test was done at the speed of the DC motor we got to the target is to control the speed difference of the DC motor

Keywords: speed variator, motor DC, motor AC, test bench, PWM.

Liste des symboles

n: le nombre de conducteur de l'induit.

I: le courant total à l'induit.

2a: le nombre de voie en parallèles de l'induit .c'est-à-dire nombre de circuits.

N: la vitesse de l'induit en tours par seconde.

PE: la puissance électromagnétique.

T em: couple électromagnétique

Ω : vitesse de rotation

E : force contre - électromotrice.

K : constant

f.e.m : Force électromotrice

P: nombre de pair de pôles de la machine.

N: nombre de conducteurs actifs de la périphérie de l'induit.

a: nombre de paires de voies de l'enroulement entre les deux balais.

n: fréquence de rotation de l'induit (en t/s).

Φ : flux sous un pôle de la machine en Webers.

Ie: courant d'excitation.

Pa: la puissance électrique absorbée.

Pu: puissance mécanique fournie

Tu : couple utile.

V : tension d'alimentation.

I: l'intensité du courant.

P_{fer} : Pertes fer.

P_{méca} : Pertes mécanique.

R_s : résistance d'une phase statorique.

R_r : résistance d'une phase rotorique.

L_s : coefficient de mutuelle inductance entre deux phases du stator.

L_r : coefficient de mutuelle inductance entre deux phases du rotor.

M_{sr} : inductance mutuelle entre une phase du stator et phase du rotor.

L_{s0} et **L_{r0}** : inductance de fuite statorique et rotorique

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : tension d'alimentation des phases Sa, Sb, Sc.

V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} : tension des phases Ra, Rb, Rc.

I_{sa} , I_{sb} , I_{sc} : courant statorique des phases Sa, Sb, Sc.

I_{ra} , I_{rb} , I_{rc} : courant rotorique des phases Ra, Rb, Rc.

Φ_{sa} , ϕ_{sb} , ϕ_{sc} : flux statoriques des phases Sa, Sb, Sc.

Φ_{ra} , ϕ_{rb} , ϕ_{rc} : flux rotorique des phases Ra, Rb, Rc.

P : nombre de paires de pôles.

α : angle électrique entre $\vec{S_a}$ et $\vec{R_a}$.

ω : vitesse angulaire électrique.

T_e : couple électromagnétique.

T_c : couple de charge.

J : moment d'inertie du rotor.

F : coefficient de frottement.

ω_{syn} : la vitesse de synchronisme en rad/s.

V_{CE} : Tension Collecteur/Emetteur.

$P_{IGBT_{cond}}$: Perte par conduction.

I_B : Courant de base.

I_C : Courant de collecteur.

$V_{CE_{sat}}$: Tension Collecteur/Emetteur saturé.

$R_{D_{son}}$: Résistance de l'état passante.

Liste des tableaux

Tableau (II.1) : convertisseurs électroniques de tension continue.....	22
Tableau (II.2) : Vitesse de synchronisme courante.....	33

Liste des figures

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LE MOTEUR A COURANT CONTINUE ET ASYNCHRONE

Figure (I.1) :	constitution d'un moteur à courant continu.....	03
Figure (I.2) :	vue du moteur à courant continu.....	04
Figure (I.3) :	induit (rotor) de moteur à courant continu.....	04
Figure (I.4) :	inducteur de moteur à courant continu.....	05
Figure (I.5) :	collecteur et balais d'une machine à courant continu.....	05
Figure (I.6) :	principe du collecteur d'une machine à courant continu.....	06
Figure (I.7) :	schéma d'une machine à courant continu.....	07
Figure (I.8) :	Moteur à aimant permanent.....	08
Figure (I.9) :	type d'excitation d'un moteur à courant continu.....	09
Figure (I.10) :	Caractéristiques d'un moteur à excitation séparée.....	10
Figure (I.11) :	Le couple en fonction de courant d'alimentation.....	10
Figure (I.12) :	Caractéristique de vitesse d'un moteur série.....	11
Figure (I.13) :	Caractéristique de couple d'un moteur série.....	12
Figure (I.14) :	Bilan de la puissance.....	13
Figure (I.15) :	constitution d'un moteur asynchrone.....	14
Figure (I.16) :	représenter le stator.....	14
Figure (I.17) :	représenter le rotor.....	15
Figure (I.18) :	représenter rotor a bague.....	15
Figure (I.19) :	représenter le rotor a cage.....	16
Figure (I.20) :	principe de fonctionnement.....	17
Figure (I.21) :	bilan de puissance.....	18

CHAPITRE II : BANC D'ESSAI DE LA VARIATION DE VITESSE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE ET MCC

Figure (II.1) :	Tension redressée.....	23
Figure (II.2) :	La variation de tension sur un pont mixte monophasé asymétrique.....	24
Figure (II.3) :	La variation de tension sur un pont tout thyristor.....	25
Figure (II.4) :	Synoptique d'une moto variateur à hacheur (en B.O).....	26
Figure (II.5) :	Schéma de principe de la conversion Continu - Continu (DC – DC).....	26
Figure (II.6) :	Schéma électrique d'un hacheur Buck.....	27
Figure (II.7) :	Schéma électrique d'un hacheur Boost.....	27
Figure (II.8) :	Schéma électrique d'un hacheur Buck- Boost.....	28
Figure (II.9) :	Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Boost.....	29
Figure (II.10) :	Zones de fonctionnement d'un hacheur à 4 quadrants.....	30
Figure (II.11) :	Schéma électrique d'un hacheur à 4 quadrants.....	30
Figure (II.12) :	Schéma synoptique de la régulation d'un moteur à courant continu.....	32
Figure (II.13) :	Structure d'un variateur de vitesse.....	34
Figure (II.14) :	Redresseur triphasé à diodes.....	36
Figure (II.15) :	Tension redressée.....	37
Figure (II.16) :	Schéma du principe de filtrage.....	37
Figure (II.17) :	Schéma de principe de l'onduleur.....	38
Figure (II.18) :	Couple du moteur pour une fréquence variable.....	39
Figure (II.19) :	Tension du moteur en fonction de la fréquence.....	40

CHAPITRE-III : MATERIELS UTILISES ET METHODES ADOPTEES

Figure (III.1) :	La structure de commande.....	41
Figure (III.2) :	Un signal MLI (PWM).....	41
Figure (III.3) :	potentiomètre de 10k.....	42
Figure (III.4) :	Transistor BD244c.....	43
Figure (III.5) :	Condensateur électrolytique 470nf.	44
Figure (III .6) :	Moteur DC 12v.....	44

CHAPITRE IV : SIMULATION ET REALISATION

Figure (IV.1) :	montage d'une machine à courant continue à excitation séparée.....	46
Figure (IV.2) :	Hacheur série commande un moteur à courant continu.....	47
Figure (IV.3) :	Fenêtre de réglage des paramètres du moteur à courant continu.....	48
Figure (IV.4) :	La tension d'entrée d'hacheur.....	49
Figure (IV.5) :	La tension de Sortie avec un rapport cyclique de 40 %.....	49
Figure (IV.6) :	La vitesse de moteur avec un rapport cyclique de 40 %.....	50
Figure (IV.7) :	Le courant de moteur avec un rapport cyclique de 40 %.....	50
Figure (IV.8) :	La tension de Sortie avec un rapport cyclique de 80 %.....	51
Figure (IV.9) :	La vitesse de moteur avec un rapport cyclique de 80 %.....	51
Figure (IV.10) :	Le courant de moteur avec un rapport cyclique de 80 %.....	52
Figure (IV.11) :	Hacheur quatre quadrants commande un moteur à courant continu.....	53
Figure (IV.12) :	La tension de sortie avec un rapport cyclique de 60 %.....	54
Figure (IV.13) :	La vitesse de moteur avec un rapport cyclique de 60 %.....	54
Figure (IV.14) :	Le courant de moteur avec un rapport cyclique de 60%.....	55
Figure (IV.15) :	programme de simulation de MAS sur MATLAB/SIMULINK.....	56
Figure (IV.16) :	fenêtre de réglage du moteur asynchrone.....	57
Figure (IV.17) :	courbe de variation de vitesse à f=60Hz.....	58
Figure (IV.18) :	courbe de variation de courant à f=60Hz.....	58
Figure (IV.19) :	courbe de variation de couple électromagnétique à f=60Hz.....	59
Figure (IV.20) :	variation de fréquence de la tension d'alimentation.....	59
Figure (IV.21) :	signaux du courant de l'IGBT.....	60
Figure (IV.22) :	courbe de variation de vitesse à f=50Hz.....	61
Figure (IV.23) :	courbe de variation du courant (Ias) à f=50Hz.....	61
Figure (IV.24) :	courbe de variation de couple électromagnétique à f=50Hz.....	62
Figure (IV.25) :	Simulation de variateur de vitesse de MCC sur ISIS PROTEUS.....	63
Figure (IV.26) :	Signal de sortie.....	64
Figure (IV.27) :	Circuit de réalisation par CIRCUIT WIZARD.....	64
Figure (IV.28) :	Banc d'essai du variateur de vitesse de MCC.....	65

Sommaire

Introduction General:.....	1
CHAPITRE I : GENERALITE SUR LE MOTEUR A COURANT CONTINUE ET ASYNCHRONE	
I Introduction	3
I.2 Description d'un moteur à courant continu	3
I.2.1 L'induit (rotor)	4
I.2.2 Inducteur (stator)	4
I.2.3 Collecteur et balais	5
I.3 Symbole d'un moteur à courant continu.....	5
I.4. Principe de fonctionnement et modèle équivalent de l'induit	6
I.4.1 Fonctionnement en moteur.....	6
I.5 Equation de grandeur de moteur à courant continu	7
I.5.1 Couple utile du moteur	7
I.5.2 Force électromotrice (f.e.m.).....	8
I.6. Les Différents types de moteur à courant continu	8
I.6.1 Les moteurs à inducteur à aimant permanent	8
I.6.2 Les moteurs à inducteur bobiné.....	9
I.6.2.1 Le moteur à excitation séparée	9
I.6.2.2. Le moteur à excitation série.....	10
I.6.2.3. Le moteur à excitation shunt.....	12
I.6.2.4 Le moteur à excitation composée.....	12
I.7. Avantages et inconvénients de moteur à courant continu	12
I.7.1 Avantages de moteur à courant continu.....	12
I.7.2 inconvénients de moteur à courant continu.....	12
I.8. Bilan de la puissance.....	13
I.9. Le rendement.....	13
I.10 Structure de moteur asynchrone	14
I.10.1 Le stator	14
I.10.2 Le rotor.....	15
I.10.2.1 Le rotor bobiné ou à bagues.....	15
I.10.2.2 Le rotor à cage	16
I.10.3. Principe de fonctionnement	16
I.11. Expression du couple électromagnétique et bilan de puissance et rendement	17
I.11.1 L'équation du couple électromagnétique	17
I.11.2 Bilan de puissance	18
I.11.3 Le rendement	18
I.12. L'équation mécanique	19
I.13. Avantages et inconvénients d'un moteur asynchrone.....	19
I.13.1. Avantages de moteur asynchrone.....	19
I.13.2 Inconvénients de moteur asynchrone.....	19
I.14. Conclusion.....	19

CHAPITRE-II : ETAT DE L'ART SUR LES VARIATEURS DE VITESSE DES MACHINES ASYNCHRONES

II.1	Introduction:.....	20
II-2	Les Quadrants De Fonctionnement.....	20
II.3.	Critères de choix d'un variateur.....	21
II.4	Paramétrage.....	21
II.5.	Avantages – inconvénients.....	21
II.6	Variation de vitesse des moteurs à courant continu.....	22
II.6.1	Fonctionnement a vitesse variable.....	22
II.7.	Technologie des variateurs.....	22
II.8.1	La conversion Alternatif – Continu.....	23
II.8.1.1.	Les différents redresseurs.....	23
II.8.1.2	La variation de tension sur un pont mixte monophasé asymétrique.....	24
II.8.1.3.	Les ponts tout thyristor.....	25
II.8.1.4.	Les ponts unidirectionnels – bidirectionnels.....	25
II.8.2.	La conversion Continu – Continu.....	25
II.8.2.1.	Principe du hacheur.....	26
II.8.2.2.	Le rapport cyclique α	26
II.8.2.3.	Différents types d'hacheurs.....	26
II.9.	Régulation de vitesse de moteur à courant continu.....	32
II.10.	La vitesse du moteur asynchrone.....	33
II.10.1.	Vitesse de synchronisme.....	33
II.10.2.	Vitesse de rotation du moteur.....	33
II.10.3	Vitesse angulaire.....	33
II.10.4.	Vitesses de synchronisme courant.....	33
II.10.5.	Le glissement.....	33
II.11.	Variation de vitesse d'un moteur asynchrone.....	33
II.11.1.	Action sur les paires de pôles.....	34
II.11.2.	Action sur la fréquence d'alimentation du moteur.....	34
II.12.	Le variateur de vitesse.....	34
II.12.1.	Définition.....	34
II.12.2.	Constitution et principe de fonctionnement d'un variateur de vitesse.....	34
II.12.3.	Constitution.....	35
II.12.4.	Principe.....	35
II.12.5.	Interface utilisateur.....	35
II.12.6.	Redresseur.....	36
II.12.6.1	Etude du fonctionnement.....	36
II.12.6.2	Valeur moyenne de la tension redressée.....	37
II.12.7.	Circuit intermédiaire (filtre).....	37
II.12.8	L'onduleur.....	38
II.13.	Alimentation d'un MAS triphasé a fréquence variable.....	38
II.13.1.	Etude du couple dans le cas ou $U_{moteur} = Cste$	38
II.13.2.	Etude du couple a $U/f = Cste$	39
II.14.	Introduction Banc d'essai de la variation de vitesse.....	40
II.14.1.	L'objectif de banc d'essai.....	40
II.15	Conclusion.....	40

Chapitre-III : Matériels utilisés et méthodes adoptées

III.1. Introduction	41
III.2. Technique De Commande MLI	41
III.2.1. Structure de commande	41
III.2.2. Principe de la commande MLI	41
III.2.3. Les avantages et les inconvénients	42
III.3. Matériels utilisés	42
III.3.1. Potentiomètre	42
III.3.1.1. Utilisation en résistance variable	42
III.3.1.2. Types de potentiomètres	42
III.3.2. Transistor de puissance BD244 (PNP)	43
III.3.2.1. Présentation	43
III.3.2.2. Choix d'un transistor	43
III.3.2.3. Transistor IGBT	43
III.3.3. Capacité	44
III.3.4. Batterie 9V	44
III.3.5. Moteur à courant continu	44
III.4 Conclusion	45

Chapitre-IV : Simulation et réalisation

VI.1. Introduction	46
VI.2. MATLAB-SIMULINK	46
VI.3. Simulation D'un Moteur A Courant Continu A Excitation Séparée	46
VI.4. Simulation d'un hacheur à un seul quadrant commande un moteur à courant continu à excitation séparée	47
VI.4.1 Paramètre du moteur à courant continu	48
VI.4.2 Les courbes et résultats de simulation	48
VI.5. Simulation d'un hacheur quatre quadrants commande un moteur à courant continu à excitation séparée	53
VI.5.1. Les courbes et résultats de simulation	54
VI.5.2. Analyse des résultats obtenus	55
VI.6. Simulation de variation de vitesse de MAS sur MATLAB/SIMULINK	56
VI.6.1 Paramètre du MAS	57
VI.6.2 Résultats de simulation	57
VI.6.3 Interprétations des Résultats de Simulation	62
VI.7. Introduction sur logiciel Isis PROTEUS	63
VI.7.1. Simulation sur logiciel ISIS PROTEUS	63
VI.7.2. Résultats de simulation	64
VI.8. La réalisation de variateur de vitesse	64
VI.9. Conclusion :	66
Conclusion générale	67
Références et Bibliographies	
Annexe	

Introduction

Générale



Introduction générale :

Les moteurs électriques sont très importants dans plusieurs domaines d'électrotechnique, les récepteurs les plus nombreux dans les industries. Ils nous permettent de convertir facilement l'énergie électrique en énergie mécanique, avec une grande importance économique.

Parmi tous les types des moteurs connus nous les mentionnons:

Les machines à courant continu ont pendant longtemps été seuls aptes à la vitesse variable, ils ont l'objet de nombreuse amélioration et beaucoup de produit commercialisés aujourd'hui n'ont rien à envier à leurs homologues sens balais. En électrotechnique on s'intéresse toujours en premier lieu à la machine à courant continu car il est possible d'obtenir de manière relativement simple sa modélisation surtout dans le cas où le flux agissant sur l'induit est constant (machine à flux constant) il s'en suit que la machine à courant continu est une référence aussi bien en fonctionnement moteur qu'en génératrice. Les premiers moteurs à courant continu datent des années 1830-1840 [1].

Les machines asynchrones, on dit spécialement les moteurs asynchrones jouent un rôle important dans le domaine de la conversion de l'énergie électromécanique. Par leur simplicité de construction, d'utilisation et d'entretien, et de sa robustesse et son faible coût d'achat de fabrication. Les machines asynchrones sont largement utilisées en milieu industriel, assurées leur continuité de fonctionnement, en effet, la fiabilité et la sûreté de leur fonctionnement permettent en partie d'assurer la sécurité des personnes, la qualité du service [2].

Ces dernières années, on remarque que le domaine de l'électronique de puissance s'est développé par rapport aux années précédentes par des nouvelles technologies basées sur les semi-conducteurs, la variation de vitesse par l'électronique, des moteurs électriques a pris le dessus sur les anciens systèmes « variateurs mécanique ».

Cette technologie, devenue fiable, part toujours du même principe : à partir d'une source, qu'elle soit monophasée alternative ou triphasée alternative. Dans notre étude on s'intéresse aux variateurs électroniques de vitesse d'un moteur MCC et AC.

L'objectif principal de notre travail est d'élaboration des bancs d'essai pour variation de vitesse des moteurs MCC, moteur AC.

Pour atteindre notre objectif, nous avons organisé notre mémoire en quatre chapitres:

Le premier chapitre de cette étude, présente des généralités sur les machines à courant continu et machines asynchrone, Après une brève introduction description, nous donnons les

Constitutions des moteurs et leur principe de fonctionnement avec les caractéristiques électrique et mécanique des moteurs.

Le deuxième chapitre aborde les BANC D'ESSAI DE LA VARIATION DE VITESSE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE ET MCC, Après une brève introduction de variateur de vitesse nous donnons les applications des variateurs de vitesse et leur principe de fonctionnement et Variation de vitesse des moteurs MCC et AC

Dans Le troisième chapitre se focalise sur les matériels utilisés et les méthodes adoptées pour notre réalisation.

Dans le quatrième chapitre consiste à présenter une simulation de MCC et AC par logiciel MATLAB/SIMULINK. En passant après à la réalisation pratique des différents éléments de notre variateur de vitesse avec le moteur à courant continu et la Simulation avec PROTEUS.

A la fin de ce travail, une conclusion générale résumera l'ensemble des résultats obtenus, des recommandations et des suggestions sur les travaux futurs de ce domaine.

Chapitre I

***GENERALITE SUR LE MOTEUR A COURANT
CONTINU ET ASYNCHRONE***



I.1. Introduction :

Dans ce premier chapitre on verra deux modèles de machines. Il s'agit de machines à courant continu et machine asynchrone [1 2]:

La machine à courant continu est un convertisseur d'énergie. Totalement réversible elle peut fonctionner soit en moteur. Convertisseur de l'énergie électrique en énergie mécanique soit en génératrice. Convertisseur de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Les moteurs à courant continu sont utilisés dans les asservissements où la facilité de réglage de la vitesse du moment. Du couple et du sens de rotation une mise en œuvre aisée.

La machine asynchrone est une machine électrique à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor. Comme les autres machines électriques, la machine asynchrone est un convertisseur électromécanique basé sur l'électromagnétisme.

I.2. Description d'un moteur à courant continu [3]:

Les moteurs à courant continu sont constitués comme tous les moteurs de 2 parties principales :

- la partie fixe : appelée stator que l'on appelle aussi inducteur
- la partie mobile : appelée rotor que l'on appelle aussi induit

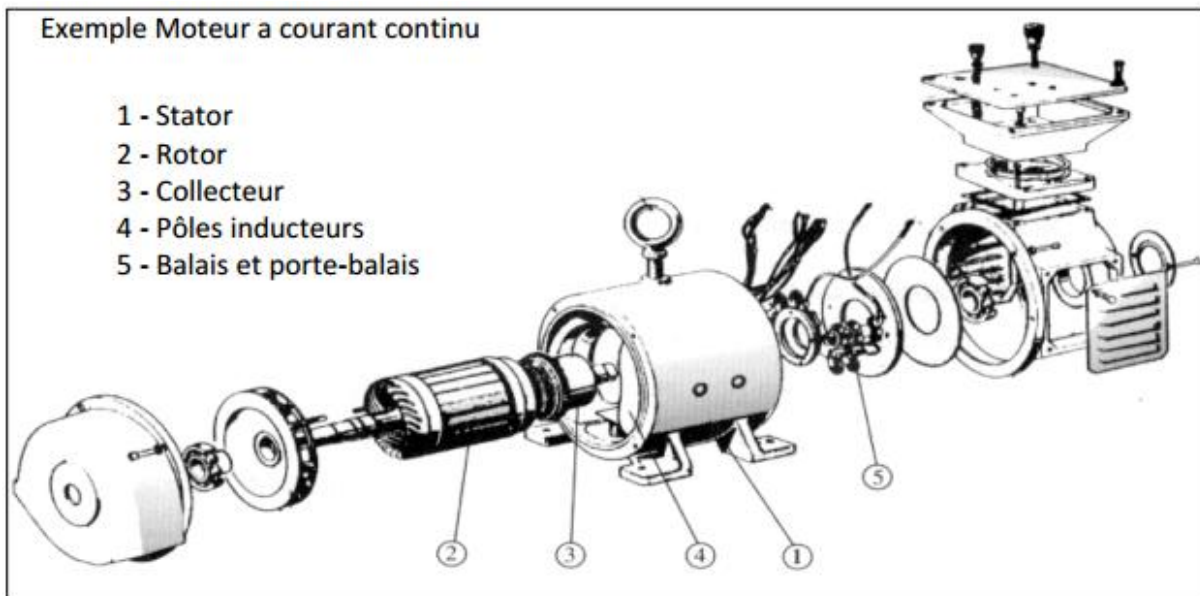


Figure (I.1): constitution d'un moteur à courant continu [3].

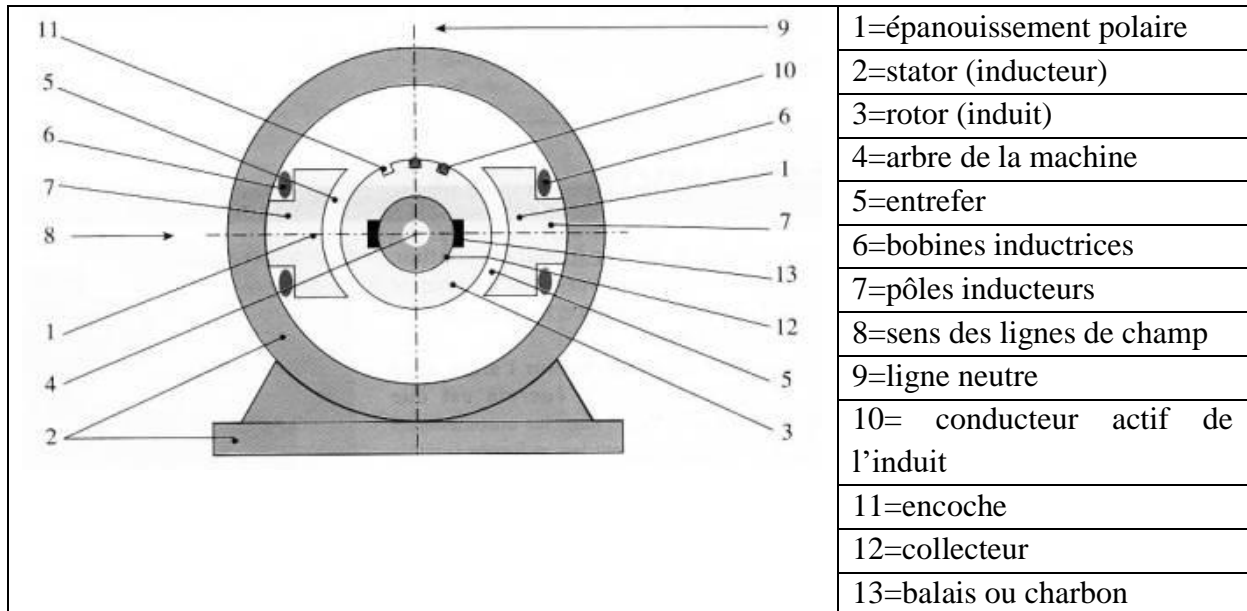


Figure (I.2) : vue du moteur à courant continu [3].

I.2.1. L'induit (rotor) :

L'induit est la partie tournante de le moteur, le noyau d'induit est en fer pour canaliser les lignes de champ les conducteurs sont logés dans encoches sur le rotor, deux conducteurs forment une spire.

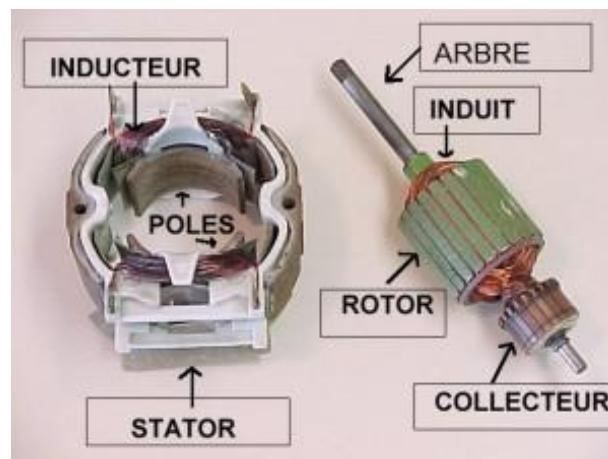


Figure (I.3): induit (rotor) de moteur à courant continu.

I.2.2. Inducteur (stator) :

C'est la partie fixe. il est formé soit d'aimants permanents en ferrite soit de bobines placées autour des noyaux polaires. Lorsque les bobines sont parcourues par un courant continu. Elles créent un champ magnétique dans le circuit magnétique de la machine notamment dans l'entrefer. Espace séparant la partie fixe et la partie mobile.

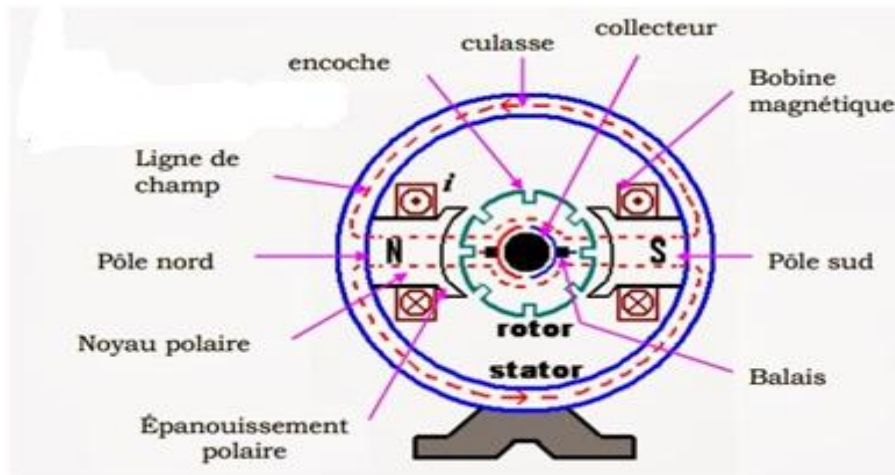


Figure (I.4) : inducteur de moteur à courant continu [3].

I.2.3. Collecteur et balais :

Le dispositif collecteur /balais permet de faire circuler un courant dans l'induit, le collecteur est un ensemble de lames de cuivre, isolées latéralement les unes des autres par des feuilles de mica, et disposées suivant un cylindre, en bout de rotor. Ces lames sont réunies aux conducteurs de l'induit et transformeront le courant alternatif dans le bobinage en courant continu.

Les balais portés par le rotor frottent sur les lames du collecteur. Ces contacts glissants entre lames et balais permettent d'établir une liaison électrique entre l'induit, qui tourne et l'extérieur de la machine.

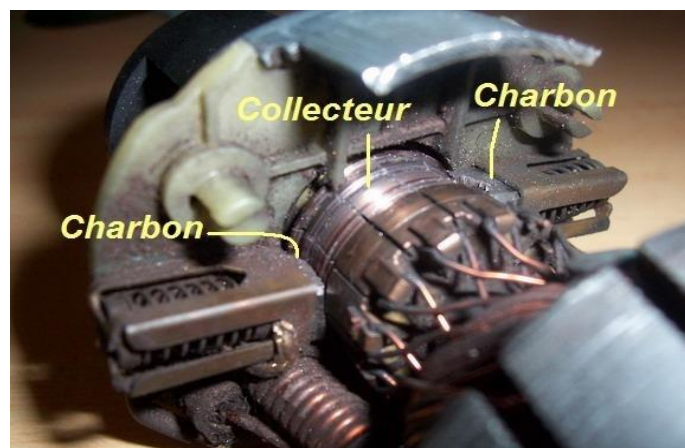


Figure (I.5) : collecteur et balais d'une machine à courant continu.

Le collecteur est un commutateur mécanique qui inverse le sens du courant dans les conducteurs qui franchissent la ligne neutre les balais solidaires de la carcasse qui frottent sur le collecteur lorsque l'induit est soumis à une tension appliquée entre balais [4], le système balais –collecteur répartit le courant dans les conducteurs comme indiqué sur le schéma de la figure (I.6) le sens conventionnel est le même dans tous les conducteur situés un pôle , et le sens contraire dans tous les situés sous l'autre pôle.

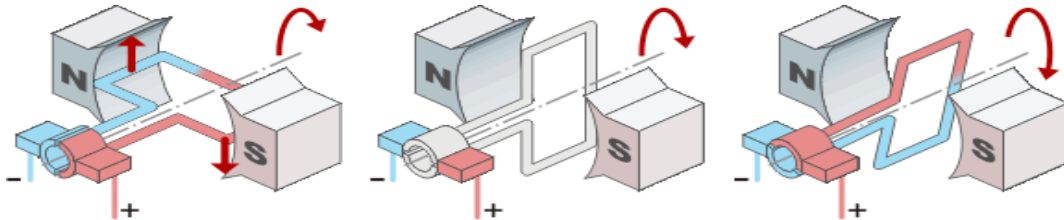
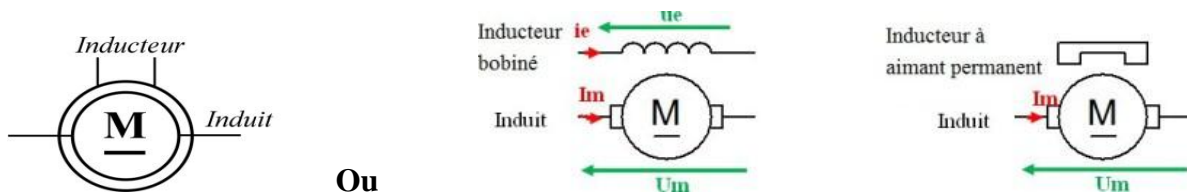


Figure (I.6): principe du collecteur d'une machine à courant continu [4].

I.3. Symbole d'un moteur à courant continu [5]:



I.4. Principe de fonctionnement et modèle équivalent de l'induit [6] :

I.4.1. Fonctionnement en moteur :

Les machines à courant continu fonctionnent aussi bien en moteur qu'en générateur. Elles sont réversibles.

Lorsque l'on place une spire parcourue par un courant dans un champ magnétique, il apparaît un couple de forces. Ce couple de forces crée un couple de rotation qui fait tourner la spire.

Au cours de ce déplacement. Le couple de rotation diminue constamment jusqu'à s'annuler après rotation de 90 degrés (zone neutre. la spire se trouve à l'horizontale et perpendiculaire aux aimants naturels).

A fine d'obtenir une rotation sens à coup. L'enroulement d'induit doit être constitué d'un nombre élevé de spire similaires. Celles –ci seront réparties de façon régulière sur le pourtour du rotor (induit). De manière à obtenir un couple indépendant de l'angle de rotation du courant de la partie fixe à la partie tournante du moteur.

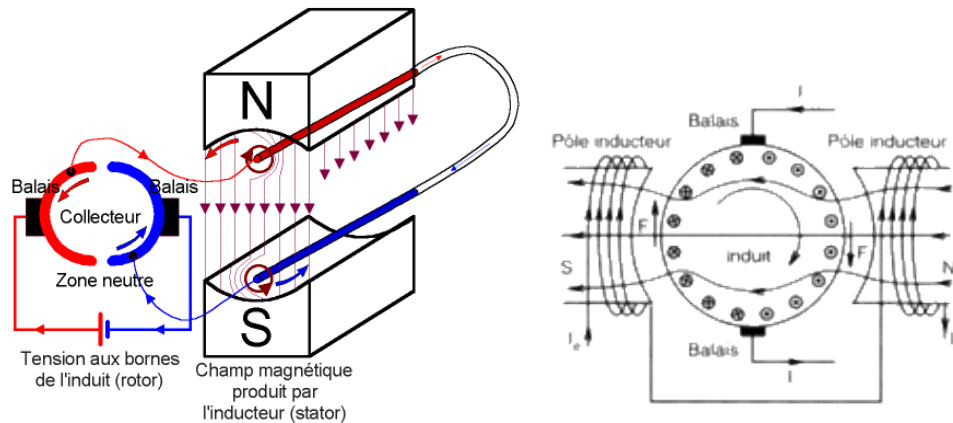


Figure (I.7): schéma d'une machine à courant continu [6].

I.5. Equation de grandeur de moteur à courant continu :

Soit :

- n : le nombre de conducteur de l'induit.
- I : le courant total à l'induit.
- $2a$: le nombre de voie en parallèles de l'induit .c'est-à-dire nombre de circuits.
- N : la vitesse de l'induit en tours par seconde.

I.5.1. Couple utile du moteur [4]:

Lorsqu'il circule une intensité I dans l'induit, la puissance électromagnétique est

$$PE = E \cdot I \quad (I.1)$$

Le rotor tournant à la vitesse Ω , il existe un couple électromagnétique T_{em} tel que :

$$PE = T_{em} \cdot \Omega \quad (I.2)$$

On montre alors que l'expression du couple électromagnétique est :

$$T_{em} = K \cdot I \quad (I.3)$$

C'est-à-dire que le couple électromagnétique est proportionnel à l'intensité qui circule dans l'induit.

I.5.2. Force électromotrice (f.e.m.) [4]:

La force électromotrice (E) est la tension produite par le rotor (l'induit) lors de sa rotation dans le flux magnétique produit par la partie fixe (l'inducteur). Elle dépend des éléments de construction de la machine.

Elle est donnée par la relation d'électrotechnique :

$$E = (P/a) \cdot N \cdot n \cdot \Phi \quad (\text{I.4}) \quad [6]$$

- P : nombre de pair de pôles de la machine.
- N : nombre de conducteurs actifs de la périphérie de l'induit.
- a : nombre de paires de voies de l'enroulement entre les deux balais.
- n : fréquence de rotation de l'induit (en t/s).
- Φ : flux sous un pôle de la machine en Webers.

Finalement :

$$E = K \cdot \Omega \cdot \Phi \quad (\text{I.5})$$

Avec :

$$K = (P/2\pi a) N \quad (\text{I.6})$$

I.6. Les Différents types de moteur à courant continu :

On distingue deux types de moteurs à courant continu [7]:

I.6.1. Les moteurs à inducteur à aimant permanent :

Il n'y a pas de circuit inducteur, le flux inducteur est produit par un aimant permanent. Tous les moteurs à courant continu de faible puissance et les micromoteurs sont des moteurs à aimant permanent. Ils représentent maintenant la majorité des moteurs à courant continu. Ils sont très simples d'utilisation.

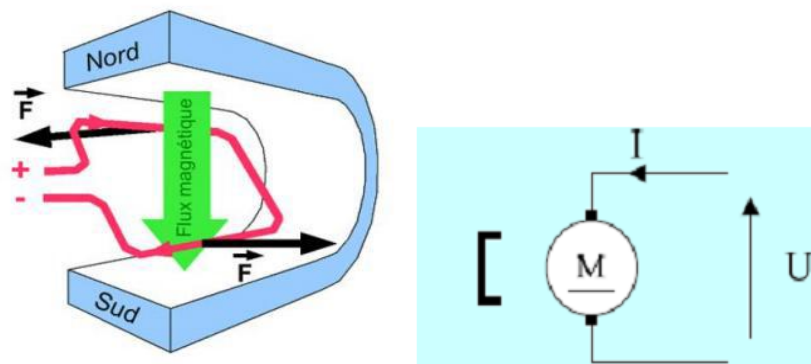


Figure (I.8): Moteur à aimant permanent [7].

1.6.2. Les moteurs à inducteur bobiné :

Il existe 4 types différents de moteurs électriques qui sont classés en fonction du type d'excitation qui est employé, qui sont :

- le moteur à excitation séparée.
- le moteur à excitation shunt.
- le moteur à excitation série.
- le moteur à excitation composée

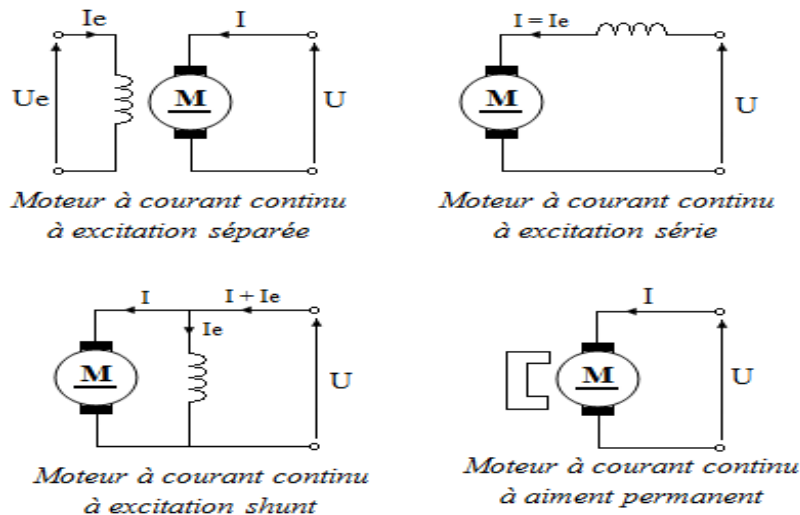


Figure (I.9) : type d'excitation d'un moteur à courant continu [7].

1.6.2.1. Le moteur à excitation séparée [7]:

Dans un moteur à excitation séparée ou indépendante, le circuit d'excitation est séparé du circuit d'induit. Si l'inducteur est un aimant permanent, le flux (Φ) est constant. Si l'inducteur est un électroaimant alimenté par une source de tension continue réglable, le flux (Φ) ne dépend que du courant dans l'inducteur appelé courant d'excitation (I_e).

Le courant crée un champ et une quantité de champ à travers une spire donne un flux. Si la tension (V_e) est constante, le courant d'excitation (I_e) est constant et le flux (Φ) est constant.

Dans ces conditions, la force contre électromotrice (E) ne dépend que de la fréquence (n) de rotation.

Donc la fréquence de rotation (n) est proportionnelle à la tension (V) d'alimentation du moteur. Compte tenu de la conservation de la puissance d'une machine (en négligeant les pertes), la puissance électrique absorbée est :

$$P_a = V \cdot I \quad (\text{I.7})$$

Et la puissance mécanique fournie est :

$$P_u = T_u \cdot \Omega = T_u \cdot 2\pi \cdot n \quad (\text{I.8})$$

Si (V) est proportionnelle à (n) cela signifie que (T_u) est proportionnel à (I).

Donc le couple utile (T_u) est proportionnel à l'intensité du courant d'alimentation du moteur.

Pour un moteur à excitation séparée, le flux (Φ) est constant donc la fréquence de rotation (n) est proportionnelle à la tension d'alimentation (V) :

$$n = E/K\Phi = V - R \cdot I / K\Phi = K \cdot V \quad (\text{I.9})$$

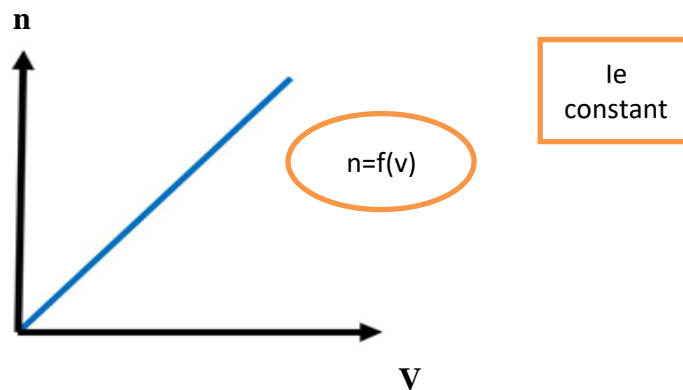


Figure (1.10): Caractéristiques d'un moteur à excitation séparée [8].

Et le couple (T_u) est proportionnel à l'intensité du courant d'alimentation (I) :

$$T = E \cdot I \Omega = K\Phi \cdot I = K' \cdot I \quad (\text{I.10})$$

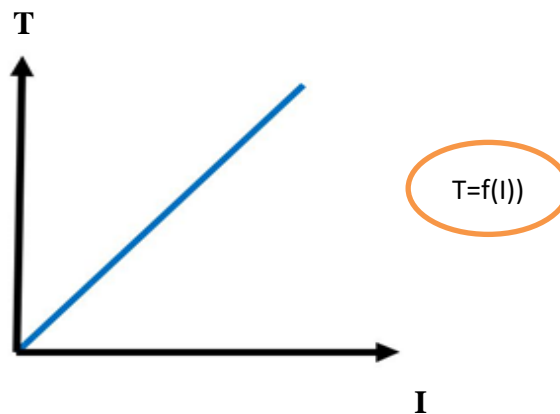


Figure (1.11): Le couple en fonction de courant d'alimentation [8].

1.6.2.2. Le moteur à excitation série :

Dans un moteur à excitation série ou moteur série, le circuit d'excitation est en série avec le circuit d'induit.

Le flux n'est plus constant mais proportionnelle à (I).

Dans ces conditions, la force contre électromotrice (E) dépend de la fréquence (n) de rotation et de l'intensité du courant (I).

Donc la fréquence de rotation (n) est proportionnelle à la tension (V) et au courant (I) d'alimentation du moteur.

Compte tenu de la conservation de la puissance d'une machine (en négligeant les pertes), la puissance électrique absorbée est :

$$Pa = V \cdot I \quad (I.11)$$

Et la puissance mécanique fournie est :

$$Pu = Tu \cdot \Omega = Tu \cdot 2\pi \cdot n \quad (I.12)$$

Si (n) est proportionnelle à (V) et à (I) cela signifie que (Tu) est proportionnel au carré de l'intensité (I²).

Donc le couple (Tu) est proportionnel au carré de l'intensité du courant d'alimentation du moteur.

Pour un moteur à excitation série, le flux (Φ) n'est pas constant mais proportionnel à (I) donc la tension d'alimentation (V) est proportionnelle à la fréquence de rotation n et à l'intensité (I) [8]:

$$E = k \cdot n \cdot N \cdot \Phi = K \cdot \Omega \cdot I \quad (I.13)$$

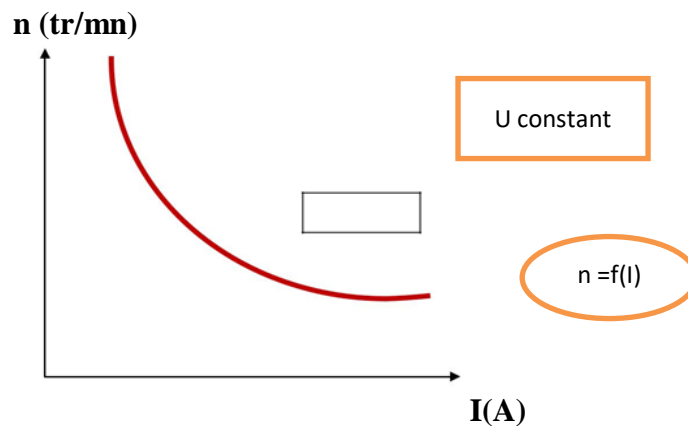


Figure (1.12) : Caractéristique de vitesse d'un moteur série [8].

Et le couple (T) est proportionnel au carré de l'intensité du courant d'alimentation (I).

$$T = E \cdot I / \Omega = K \cdot I^2 \quad (I.14)$$

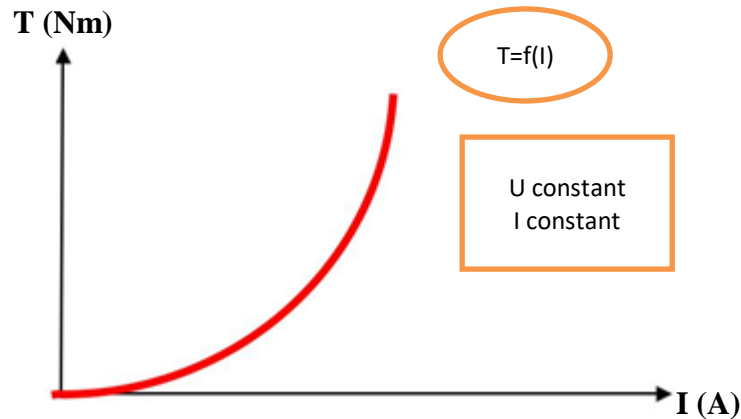


Figure (1.13) : Caractéristique de couple d'un moteur série [8].

1.6.2.3. Le moteur à excitation shunt :

La même source d'alimentation alimente l'induit et l'inducteur. L'inducteur est mis en parallèle avec l'induit.

Les propriétés du moteur à excitation dérivation sont les mêmes que celle du moteur à excitation indépendante.

1.6.2.4. Le moteur à excitation composée :

Modes de branchement : Courte dérivation : L'enroulement est shunté directement avec l'induit. Long dérivation : L'enroulement est shunté en parallèle avec l'induit.

I.7. Avantages et inconvénients:

I.7.1. Les avantages :

- Une large gamme de variation de vitesse au-dessous de la vitesse de régime
- Un fonctionnement avec des couples constants ou variables
- Une vitesse de rotation qui peut être réglée par l'intermédiaire d'un système de rétroaction.
- Une facilité de récupération d'énergie
- La variation de fréquence de rotation est simple à réaliser.

I.7.2. Les inconvénients :

- Le principal problème de ces machines vient de la liaison entre les balais, ou charbons et le collecteur rotatif.
- Une alimentation statorique et rotorique par courant continu.

I.8. Bilan de la puissance :

On peut représenter le bilan des puissances mises en jeu dans un moteur à courant continu en fonctionnement nominal par une flèche qui rétrécit au fur et à mesure que la puissance diminue.

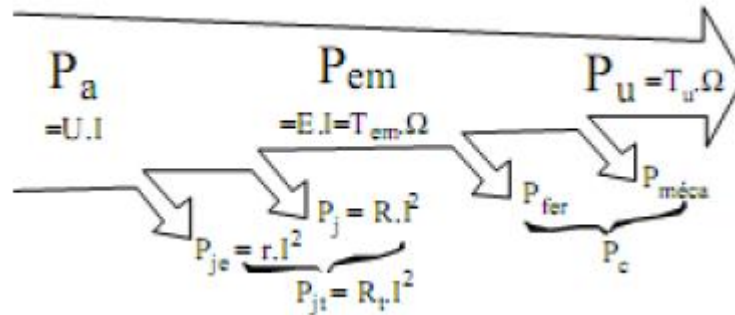


Figure (1.14): Bilan de la puissance.

P_a : Puissance absorbée

P_u : Puissance utile

P_{em} : Puissance électromagnétique

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

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

P_c : Pertes fer + pertes mécaniques : dites pertes constantes

I.9. Le rendement :

Les moteurs à courant continu consomment une partie de l'énergie absorbée pour leur fonctionnement. L'énergie mécanique fournie sera toujours plus petite que l'énergie électrique absorbée. Le rapport entre l'énergie fournie et l'énergie absorbée est le rendement.

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad (I.15)$$

P_u : Puissance utile

P_a : Puissance absorbée

I.10. Structure de moteur asynchrone :

La machine à induction comprend un stator et un rotor constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation sur le quel sont placés les enroulements qui seront accessibles de l'extérieur [9].

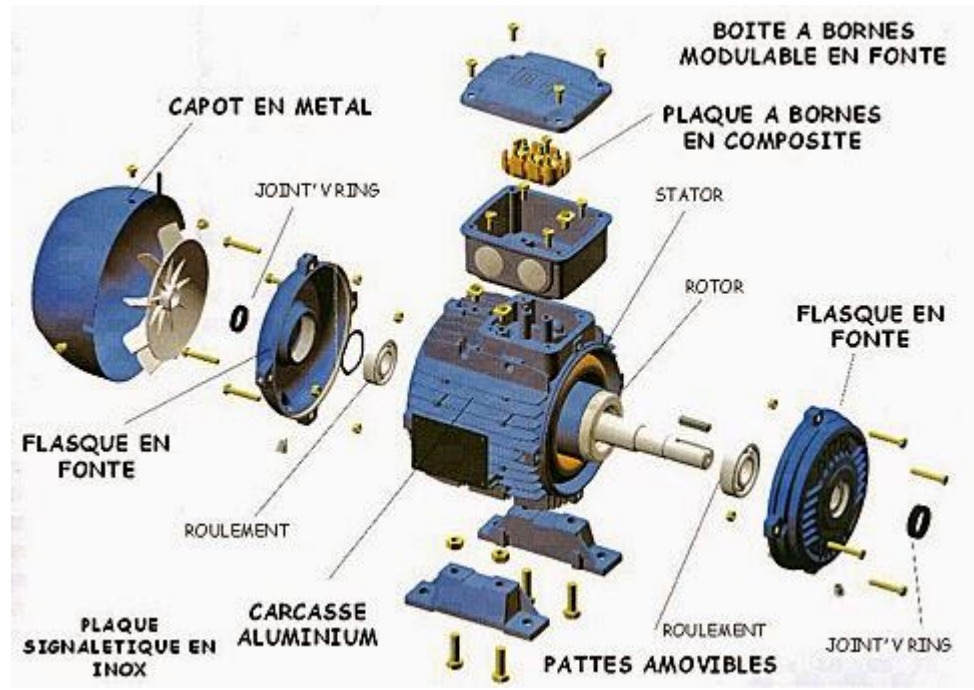


Figure (I.15) : constitution d'un moteur asynchrone [9].

I.10.1. Le stator :

Le stator comporte une carcasse en acier renfermant un empilage de tôles minces identiques en forme de couronne qui constituent un cylindre vide ; ces tôles sont percées de trous à leur périphérie intérieure. L'alignement de ces trous forme des encoches dans lesquelles on loge un bobinage triphasé. Cette couronne est serrée dans une carcasse en fonte.

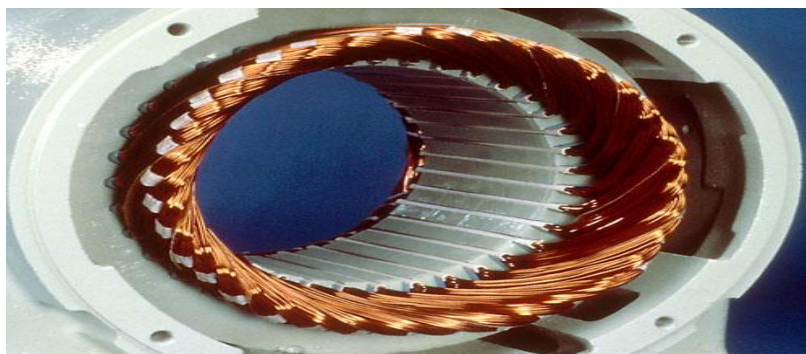


Figure (I.16) : le stator [9].

I .10.2. Le rotor :

Le rotor, monté sur l'arbre moteur se compose d'un cylindre fait de tôles empilées. Des encoches sont percées à la périphérie extérieure destinées à recevoir des conducteurs. Il est séparé du stator par un entrefer très court de l'ordre de 0,4 à 2 mm seulement. Il existe deux types de rotor : le rotor à cage d'écureuil et le rotor bobiné [10].

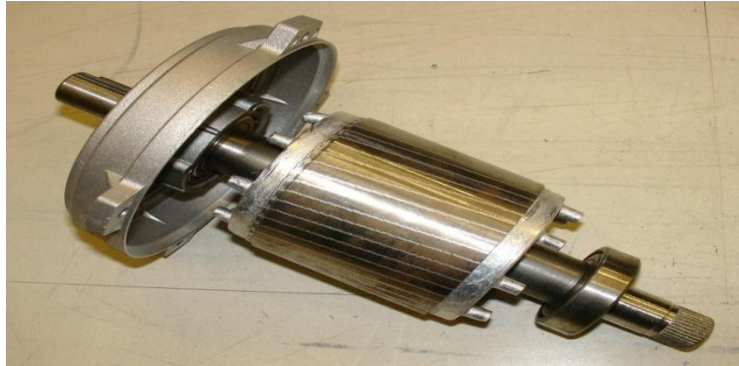


Figure (I.17) : le rotor à cage [10].

I .10.2.1. Le rotor bobiné ou à bagues:

Le moteur qui emploie le rotor enroulé est connu comme un moteur asynchrone à rotor bobiné ou un moteur enroulé en phase. Il consiste en un noyau cylindrique stratifié qui présente une fente semi-fermée à la périphérie extérieure et qui porte un enroulement isolé triphasé. Le rotor est enroulé pour le même nombre de pôles que celui du stator.

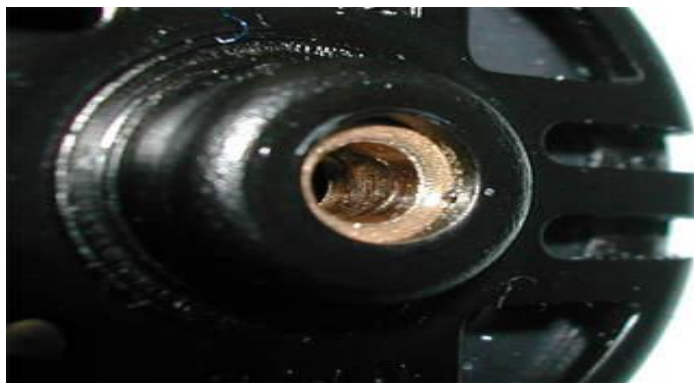


Figure (I.18) : le rotor à bague.

I .10.2.2. Le rotor à cage :

Le moteur qui utilise un rotor à cage d'écureuil est connu comme le moteur à cage d'écureuil. La construction du rotor est robuste et simple. Le rotor du moteur consiste en un noyau cylindrique laminé comportant des fentes circulaires semi-fermées et un court-circuit à chaque extrémité par anneau en cuivre ou en aluminium, appelé court-circuit. Il n'est pas possible d'ajouter une résistance externe dans le rotor du circuit.



Figure (I.19): le rotor à cage.

I.10.3. Principe de fonctionnement [11] :

Le stator supporte trois enroulements, décalés de 120° , alimentés par une tension alternative triphasée.

Ces trois bobines produisent un champ magnétique variable qui à la particularité de tourner autour de l'axe du stator suivant la fréquence de la tension d'alimentation, ce champ magnétique est appelé champ tournant.

L'enroulement rotorique peut se présenter sous deux formes:

Dans les rotors bobinés (à bagues) l'enroulement est exécuté comme un enroulement triphasé statorique connecté en étoile. Les extrémités des bobines rotoriques sont sorties par l'intermédiaire des bagues tournantes et des balais fixes reliés à l'extérieur. Ce mode d'exécution permet l'accès direct aux grandeurs électriques rotoriques ainsi que la modification de certaines du moteur par insertion d'un rhéostat extérieur ou par adjonction d'un convertisseur statique.

Caractéristiques Description et principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé.

Dans les rotors à cage, l'enroulement est constitué de barres nues court-circuit en permanence aux extrémités par des anneaux. On distingue trois types de rotor, en cage d'écureuil simple, à encoches profondes, en double cage d'écureuil. Ces rotors confèrent à la machine des profils de couples différents.

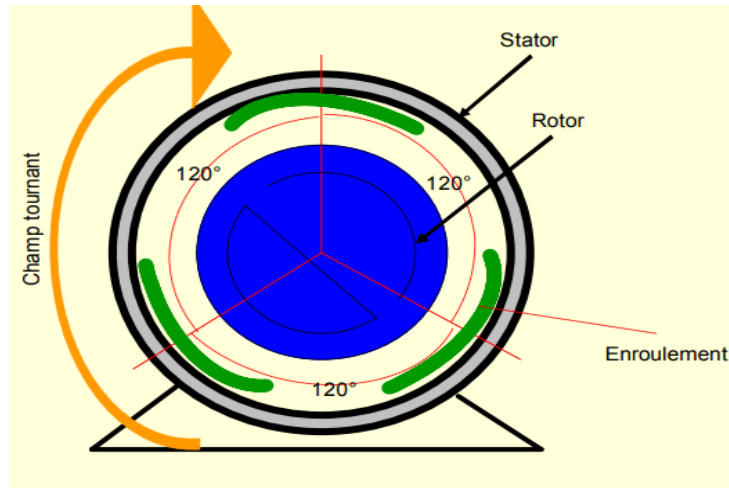


Figure (I.20) : principe de fonctionnement [11].

I .11. Expression du couple électromagnétique et bilan de puissance et rendement :

L'expression générale du couple électromagnétique d'un convertisseur rotatif biphasé devient pour les conditions de fonctionnement en asynchrone :

$$T_e = -2p \cdot M_0 \cdot I_s \cdot I_r \cdot \sin(\alpha + p \cdot \phi) \quad (\text{I.16})$$

Pour une machine polyphasée à m phases le couple serait m/2 fois plus grand :

$$T_e = -m \cdot p \cdot M_0 \cdot I_s \cdot I_r \cdot \sin(\alpha + p \cdot \phi) \quad (\text{I.17})$$

I .11.1. L'équation du couple électromagnétique :

L'expression de couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$T_e = \frac{dw}{d\alpha} = \frac{1}{2} [I]^T \cdot \frac{d([L(\alpha)] \cdot [I])}{d\alpha} \quad (\text{I.18})$$

Avec :

$$[I] = \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} \text{ et } [L(\alpha)] = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & [L_{sr}] \\ [L_{sr}] & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (\text{I.19})$$

Donc :

$$T_e = \frac{1}{2} [I_r]^T \cdot \frac{d}{d\alpha} [L_{rs}] \cdot [I_s] + \frac{1}{2} [I_s]^T \cdot \frac{d}{d\alpha} [L_{sr}] \cdot [I_r] \quad (\text{I.20})$$

Et comme $[L_{rs}] = [L_{sr}]^T$

$$T_e = \frac{1}{2} [I_r]^T \cdot \frac{d}{d\alpha} [L_{sr}]^T \cdot [I_s] + \frac{1}{2} [I_s]^T \cdot \frac{d}{d\alpha} [L_{sr}] \cdot [I_r] \quad (\text{I.21})$$

D'après la propriété du produit matricielle on obtient :

$$Te = [Is]^T \cdot \frac{d([Lsr] \cdot [Ir])}{d\alpha} \quad (I.22)$$

I.11.2. Bilan de puissance :

Pour une vitesse de rotation ω_m la puissance électromagnétique c'est -à-dire la puissance transformée en puissance mécanique :

$$Pe = Te \cdot \Omega_m \quad (I.23)$$

Pour établir le bilan de puissance de la machine asynchrone reprenons l'équation :

$$Vs \cdot \cos \phi = Rs \cdot Is - \omega_s \cdot M_0 \cdot Ir \cdot \sin(\alpha + p \cdot \phi) \quad (I.24)$$

Cette puissance électromagnétique représente la puissance mécanique utile aux pertes rotationnelles prés. le bilan de puissance apparait sur la figure (I.21) on a également représenté les pertes par hystérésis dans le fer du stator.

Le couple électromagnétique Te dans l'entrefer.

$$Te = \frac{p_{entrefer}}{\omega_{syn}} \quad (I.25)$$

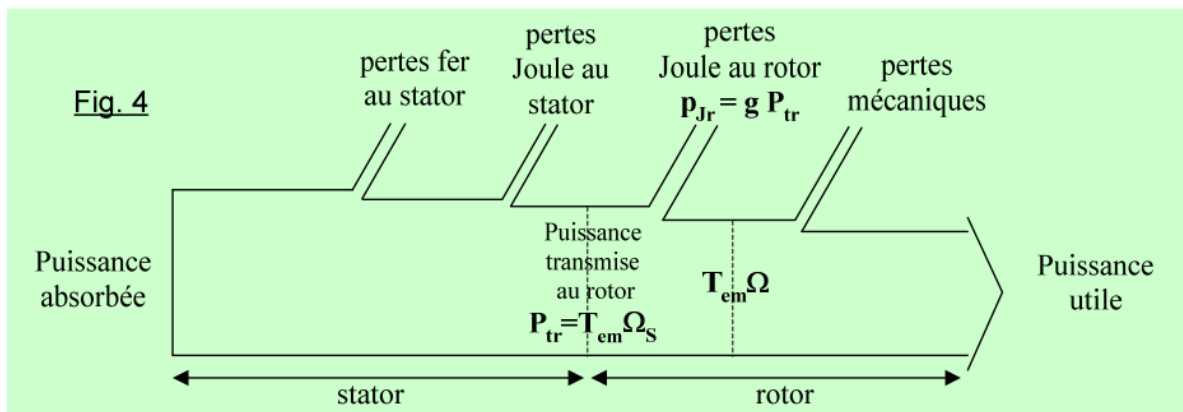


Figure (I.21) : resresenter le bilan de puissance [11].

I.11.3. Le rendement :

Le rendement est égal au rapport de la puissance utile sur la puissance absorbée. Il est toujours inférieur à 1

$$\eta = Pu / Pa < 1 \quad (I.26)$$

I.12. L'équation mécanique:

Le principe fondamental de la dynamique appliquée au rotor permet d'exprimer l'accélération du rotor par la relation suivante :

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = T_e - f \cdot \Omega - T_c \quad (\text{I.27})$$

I.13. Avantages et inconvénients d'un moteur asynchrone :

I.13.1. Avantages :

- Le MAS est facile à réaliser.
- Robuste et Faible coût d'entretien.
- Bonne standardisation entre les fabricants.
- Démarrage en direct sur le réseau (grand couple de démarrage)
- Son rendement est proche de 99%.

I.13.2. Inconvénients :

- Pour les moteurs de moyenne et grande puissance, le temps de démarrage est long.
- Si le couple résistant C_r dépasse une certaine limite, le moteur décroche et s'arrête directement.
- Il faut une excitation, c'est-à-dire une deuxième source d'énergie.
- Demande un fort couple de la charge.

I.14. Conclusion :

Les moteurs à courant continu à excitation séparée sont utilisés pour l'entraînement à vitesse variable des machines. Par rapport aux moteurs asynchrones qui sont les plus utilisés en raison de ces avantages de faible coût et robustes.

Ce chapitre nous a permis de rappeler les différents éléments qui constituent les deux machines à courant continu et asynchrones et le principe de fonctionnement. Avec leurs avantages et inconvénients.

Dans le chapitre qui suit nous présenterons une introduction de variateur de vitesse et nous donnons les applications des variateurs de vitesse, avec leurs critères de choix.

Chapitre II

***BANC D'ESSAI DE LA VARIATION DE VITESSE D'UN
MOTEUR ASYNCHRONE ET MCC***



II.1. Introduction :

Dans l'industrie, le variateur électronique de vitesse joue un rôle nécessaire dans des domaines hydrauliques, mécanique, électromécanique.

Dans ce chapitre, nous présenterons une étude théorique sur la variation de vitesse des moteurs à courant continu et asynchrone avec principe de fonctionnement et leur critère de choix, après avoir donné les quadrants de fonctionnement quel que soit le moteur alternatif ou continu associé à un variateur et les différents dispositifs électroniques utilisées pour la variation de vitesse.

II.2. Les Quadrants De Fonctionnement [14] :

Quel que soit le moteur alternatif ou continu associé à un variateur, il peut fournir suivant les cas, un couple moteur et un couple de freinage dans les deux sens possibles de marche. Ces quatre types de fonctionnement ou de services peuvent être représentés par un système de coordonnées; les plages ainsi délimitées appelées quadrant sont comptées en sens inverse des aiguilles d'une montre et désignées par les chiffres romains I à IV.

D'après le sens de rotation de la machine, l'entraînement vers la droite est positif et le couple agissant dans ce sens est lui aussi positif. Si l'on considère le diagramme couple-vitesse, on constate que les quadrants I et III représentent le service en moteur et que les quadrants II et IV, le service générateur ou freinage par récupération.

En fonction des comportements de la machine, on distingue des services à un quadrant et des services à plusieurs quadrants deux et quatre.

La notion de quadrant est déterminante dans le choix d'un variateur électronique. Elle caractérise ses possibilités en " réversibilité d'énergie ".

Le fonctionnement dans les quatre quadrants ne sera possible, dans le cas d'une solution à variation de vitesse électronique, que si à la fois la chaîne cinématique et la source d'alimentation électrique sont réversibles.

II.3. Critères de choix d'un variateur :

Les critères de choix d'un variateur de vitesse [12]:

- Le type de moteur à raccorder (monophasé, triphasé),
- Le type d'alimentation (monophasée ou triphasée)
- Le courant nominal absorbé par le moteur
- La puissance nominale absorbée par le moteur
- La tension nominale du moteur,

II.4. Paramétrage [12]:

Les paramètres sont différents selon les modèles et les fabricants, Et nous avons

- Le courant nominal du moteur
- La puissance nominale,
- La vitesse nominale de rotation du moteur,
- L'application (il existe des variateurs spéciaux pour le levage, le pompage...),
- Les fonctionnalités des contacts de sortie du variateur (alarmes...),
- Durée des éventuelles rampes de démarrage et d'arrêt,
- L'éventuelle limitation de courant à appliquer.

Les paramètres sont explicités par le fabricant dans la notice et programmés par l'électricien à la mise en service. L'usage ne veut que cette dernière soit placée dans l'armoire ou remise au client dans le dossier technique de la machine dans laquelle le démarreur est installé.

II.5. Avantages et inconvénients :

Parmi les principaux avantages des variateurs de vitesse

- Forte réduction du courant de démarrage
- Couple indépendant
- augmenter progressive en vitesse
- amélioration du facteur de puissance
- diminution de la consommation d'électricité.

Les principaux inconvénients des variateurs de vitesse sont :

- Coût élevé
- Câblage plus complexe,
- Tous les variateurs de vitesse intégrant des dispositifs de communication (diodes, thyristors, IGBT, etc.) forment une charge non linéaire qui engendre des courants harmoniques, sources de distorsion de l'onde (chute ou perturbation de la tension) dans le réseau électrique.

II.6. Variation de vitesse des moteurs à courant continu :

I.6.1 Fonctionnement a vitesse variable :

$$n = [U - R \cdot I] / K' \phi \tag{II.1}$$

Pour faire varier la vitesse on peut agir sur deux paramètres:

- A) la tension d'alimentation de l'induit U.
- B) le flux produit par les inducteurs ϕ

- 1) Action sur la tension d'alimentation avec un flux constant
 - le couple est constant,
 - la puissance varie proportionnellement à la vitesse.
- 2) Action sur le flux avec une tension constante
 - le couple varie avec le flux,
 - la puissance reste constante, (on gagne en vitesse ce que l'on perd en couple).

$$n = [U - R \cdot I] / K' \phi \quad C = K \phi I \quad P = C \cdot 2 \pi n \tag{II.2}$$

II.7. Technologie des variateurs :

- Les dispositifs électroniques utilisés pour la variation de vitesse des moteurs à courant continu [14] :

Pour obtenir une tension continue variable, il existe 2 possibilités :

- Partir d'une tension continue fixe et utiliser un hacheur
- Partir d'une tension alternative sinusoïdale et utiliser un redresseur

Redresseur contrôlé à tension variable		Redresseur contrôlé à tension variable sont des convertisseurs alternatif - continu. Ils permettent de convertir une tension alternatif pour obtenir à une tension continu variable
Hacheur		Les hacheurs sont des convertisseurs continu-continu. Ils permettent de convertir une tension continue fixe pour obtenir une tension continu variable

Tableau (II.1) : convertisseurs électroniques de tension continue [14].

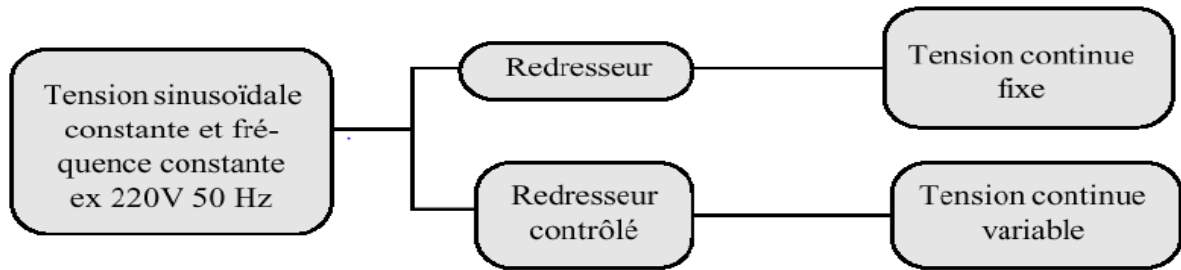


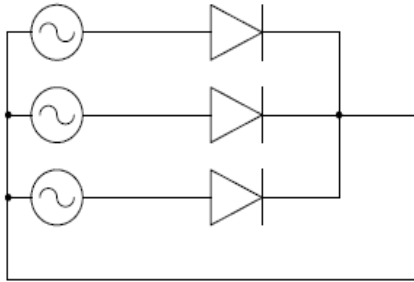
Figure (II.1) : tension redressée [13].

II.8.1 La conversion Alternatif – Continu [13]:

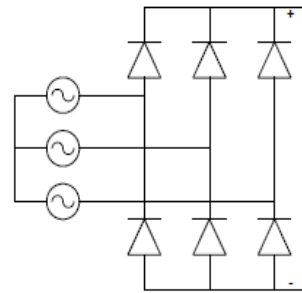
II.8.1.1 Les différents redresseurs:

- **Les redresseurs non commandé :**

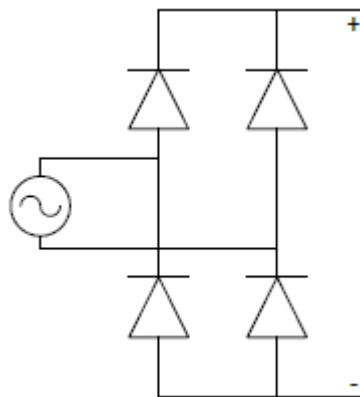
Les redresseurs non commandés, ne comportant que des diodes, sont des convertisseurs qui, à partir d'une source de tension monophasée, et ne seront donc pas utilisé pour faire la variation de vitesse pour les MCC.



Le pont simple triphasé PS3



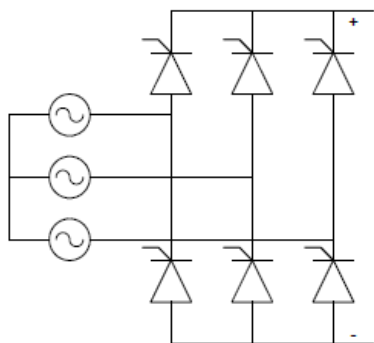
Le pont double triphasé PD3



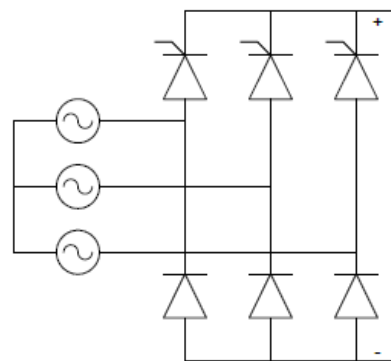
Le pont double monophasé PD2

- **Les redresseurs commandés :**

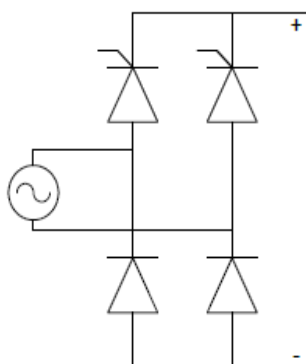
Ces redresseurs permettent de faire varier la tension efficace avec, soit des diodes et des thyristors, soit seulement des thyristors.



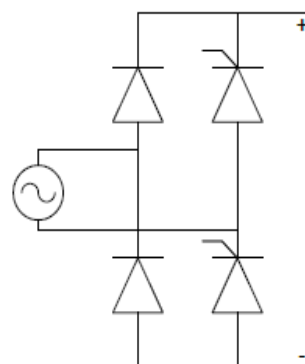
Le pont tout thyristor triphasé PT3



Le pont mixte triphasé PM3



Le pont mixte symétrique monophasé



Le pont mixte asymétrique monophasé

II-8.1.2 La variation de tension sur un pont mixte monophasé asymétrique:

Les deux diodes assurent la diode de roue libre. La tension aux bornes du moteur est nulle quand elles entrent en conduction.

Valeur moyenne de la tension :

Si φ augmente U_m diminue donc n diminue.

$$U_m = \frac{v\sqrt{2}}{\pi} (1 + \cos\varphi) \tag{II.3}$$

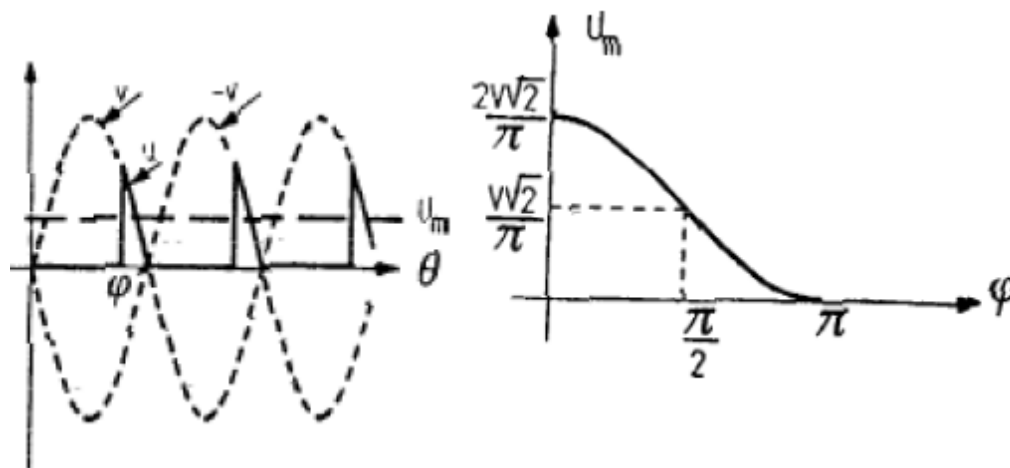


Figure (II.2) : La variation de tension sur un pont mixte monophasé asymétrique.

II.8.1.3 Les ponts tout thyristor :

Il n'y a plus de diode de roue libre. La conduction des thyristors se poursuit tant que le courant ne s'annule pas, bien que la tension de sortie soit négative.

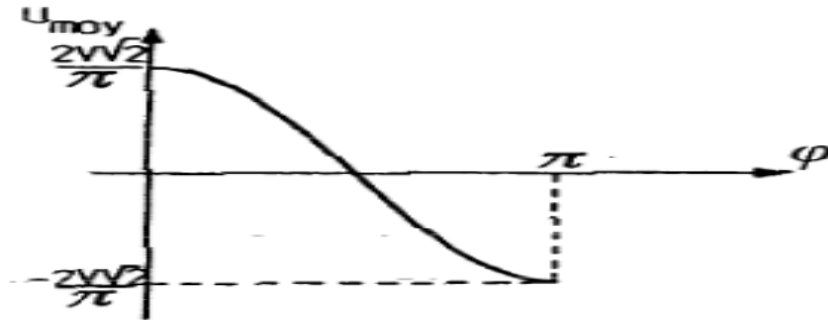


Figure (II.3): La variation de tension sur un pont tout thyristor [14].

Si φ augmente U_m diminue donc n diminue

Si φ diminue U_m augmente donc n augmente

Si on augmente l'angle de retard à l'amorçage au-delà de 90° ,

le signe de la tension redressée s'inverse et l'on passe d'un montage redresseur à un onduleur assisté.

- $\varphi < 90^\circ$ fonctionnement en moteur
- $\varphi = 90$ le moteur est arrêté mais il peut fournir un couple (maintient d'une charge)
- $\varphi > 90^\circ$ Fonctionnement en générateur

Un onduleur est un système qui permet de transformer un courant continu en courant alternatif. On le dit assisté lorsqu'il a besoin de la présence de la tension du réseau pour fonctionner. Il fournit de l'énergie active au réseau, mais il absorbe de l'énergie réactive.

II.8.1.4 Les ponts unidirectionnels – bidirectionnels :

Avec tous les ponts que l'on a vus précédemment, on a changé la tension, le signe de la tension (changement de la vitesse et inversion du sens de la rotation du moteur). Par contre, le courant, donc le couple est toujours du même signe, de ce fait, on n'a pas modifié le signe du couple.

II.8.2 La conversion Continu – Continu [14]:

Si le réseau disponible est un réseau continu, alors le convertisseur statique qu'on associe à la machine à courant continu ne peut être qu'un hacheur. Cette commande est réalisable soit par action sur la tension d'induit soit par action sur le flux. Sachant que le réseau continu provient soit :

- Soit de batteries.
- Soit d'un redresseur à diode.

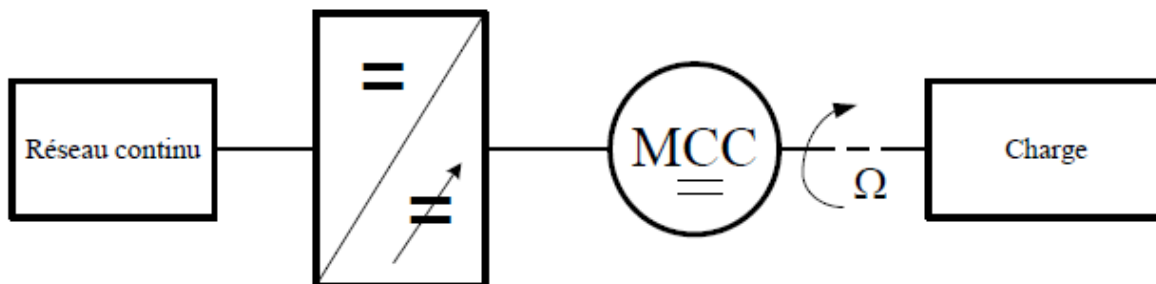


Figure (II.4) : Synoptique d'une moto variateur à hacheur (en B.O) [14].

II.8.2.1. Principe du hacheur:

Le principe du hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source-charge à l'aide d'un interrupteur électronique. Si le réseau disponible est un réseau continu, alors le convertisseur statique qu'on associe à la machine à courant continu ne peut être qu'un hacheur. Cette commande est réalisable soit par action sur la tension d'induit soit par action sur le flux.

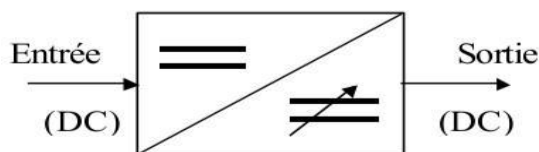


Figure (II.5) : Schéma de principe de la conversion Continu - Continu (DC - DC) [14].

II.8.2.2. Le rapport cyclique α :

Le rapport cyclique est défini comme le temps ton pendant lequel l'interrupteur est fermé divisé par la période de fonctionnement du montage T soit :

$$\alpha = \frac{ton}{T} \quad (\text{II.4})$$

On définit également le temps pendant lequel l'interrupteur est fermé par :

$$toff = T - ton \quad (\text{II.5})$$

II.8.2.3. Différents types d'hacheurs :

L'étude des convertisseurs DC-DC les plus simples qui puissent être. Les différences structures de hacheurs dépendent du cahier des charges imposé au système pour choisir le type de hacheur en prendre en compte la nature des réseaux d'entrée et de sortie, différents types de convertisseurs de tension peuvent être [14]:

- Hacheur abaisseur (ou Buck)
- Hacheur élévateur (ou Boost)
- Hacheur abaisseur-élévateur (Buck-Boost)
- Hacheur à quatre quadrants.

a) Convertisseur Buck :

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur K (Figure II.6) peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

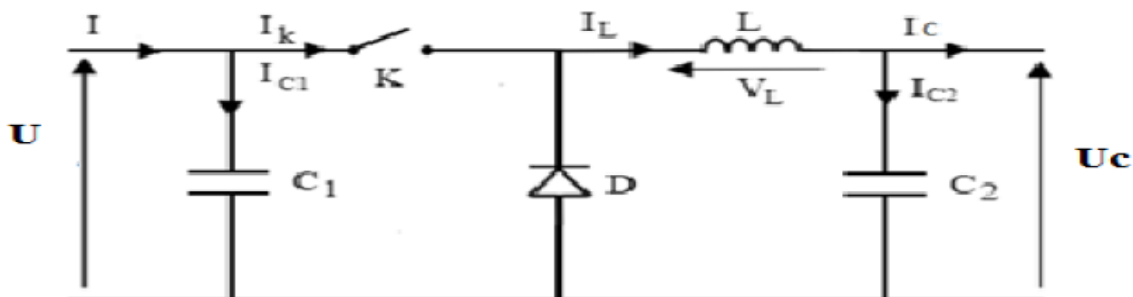


Figure (II.6): Schéma électrique d'un hacheur Buck.

a-1) Principe de fonctionnement :

Dans ce type de convertisseur on a utilisé un interrupteur électronique (K) commandable à la fermeture et commandable à l'ouverture en pratique remplace par transistors bipolaires, Mosfet, thyristors GTO ...

K est commandé périodiquement, fermeture pendant une durée αT ouverture pendant une durée $(1 - \alpha) * T$

α : est le rapport cyclique ($0 < \alpha < 1$)

$f = \frac{1}{t}$: Est la fréquence de hachage.

$$\alpha = \frac{\text{Durée de fermeture K}}{T \text{ période de hachage}} \quad (\text{II.6})$$

D est une diode de « roue libre ». Elle est nécessaire quand la charge est inductive, pour éviter l'interruption du courant i quand K s'ouvre.

b) Convertisseur Boost :

Hacheur élévateur, hacheur survolteur, hacheur parallèle, hacheur de type Boost. C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu et la charge de sortie est de type tension continue l'interrupteur peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [14].

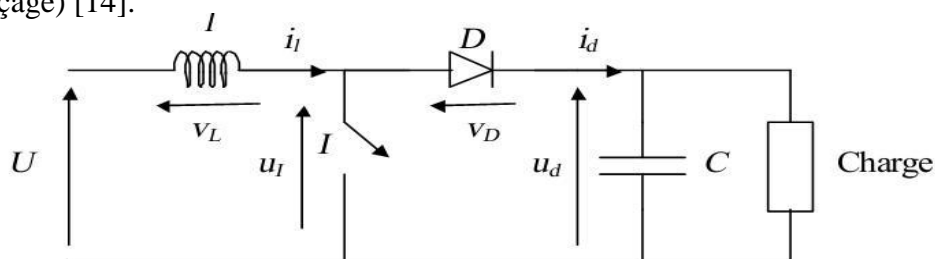


Figure (II.7): Schéma électrique d'un hacheur Boost [14].

b-1) Principe de fonctionnement :

Le circuit est alimenté par une source de tension U , la sortie est alimenté une Charge, l'interrupteur I de puissance, est rendu périodiquement conducteur avec un rapport cyclique α à la fréquence $F = 1/T$. On distingue deux modes de fonctionnement de ce circuit selon que le courant circulant dans l'inductance L est ou non continu (ne s'annule pas au cours de la période). Le mode conduction continue étant le plus intéressant pour ce convertisseur.

c) Hacheur Buck-Boost :

Le hacheur Buck-Boost est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive).

L'interrupteur K Figure (II.8) peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

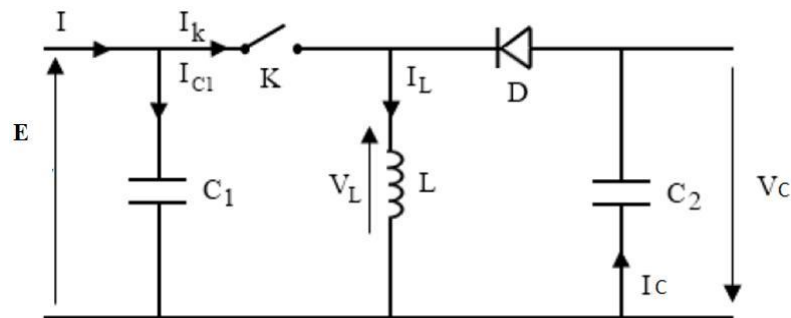


Figure (II.8) : Schéma électrique d'un hacheur Buck- Boost [14].

c-1) Principe de fonctionnement :

Le schéma de principe est présenté sur Figure (II.9). Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT , le courant augmente linéairement. La tension est égale à la tension d'entrée.

A l'ouverture de K , la diode prend le relais et la tension V_L est égale à V_C . Par définition la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle, Il en résulte que :

- Quand le rapport cyclique $\alpha > 0.5$ le hacheur Buck-Boost fonction comme un hacheur Boost
- Si le rapport cyclique $\alpha < 0.5$ le hacheur Buck-Boost fonction comme un hacheur Buck.

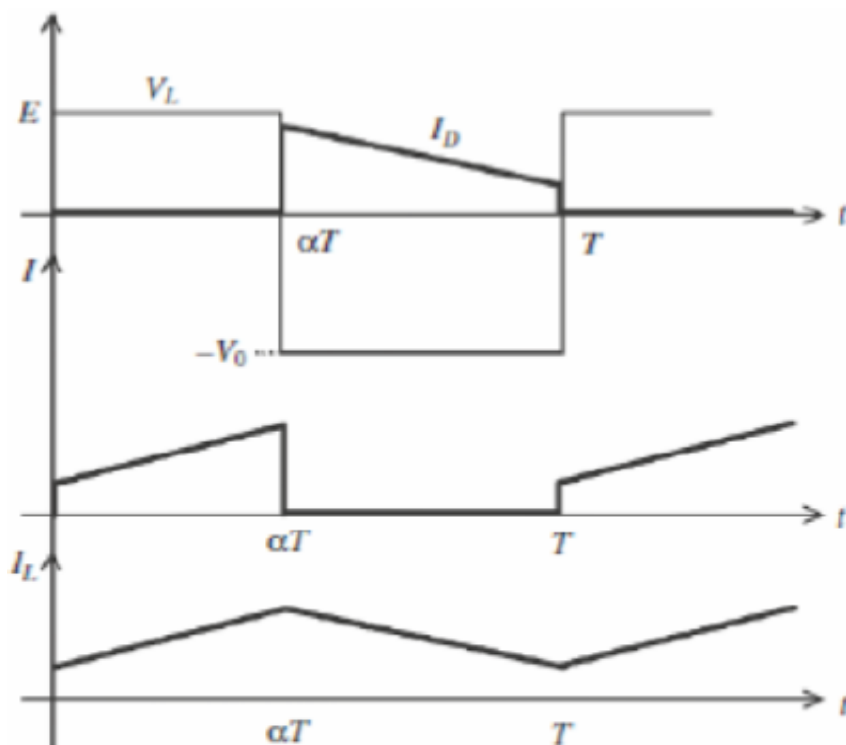


Figure (II.9) : Chronogrammes de courant et de tension d'un hacheur Buck-Boost [15].

d) Hacheur à quatre quadrants [16]:

Le hacheur à deux interrupteurs réversibles en courant et en tension se comporte comme un générateur de tension pouvant laisser circuler librement le courant moyen dans un sens ou dans l'autre. Il permet donc de fournir ou de récupérer de la puissance. Par contre, la tension est uniquement positive, on ne peut donc pas l'utiliser dans une application où le moteur électrique doit tourner en sens inverse.

Pour palier ce problème, l'idée consiste à exploiter un autre bras, identique au précédent mais imposant lui aussi une tension positive. Il suffit de connecter la charge aux bornes de ces deux bras pour disposer d'une tension positive ou négative, selon les valeurs des tensions moyennes de chaque bras.

d-1) Quadrants de fonctionnement des variateurs :

Deux paramètres définissent le fonctionnement des systèmes donc des moteurs. Ces deux paramètres sont le couple et la vitesse. Le couple dépend de la charge qui peut être entraînée ou entraînant. Le signe de la vitesse dépend du sens de rotation du moteur. 4 quadrants définissent les zones de fonctionnement Figure (II.10):

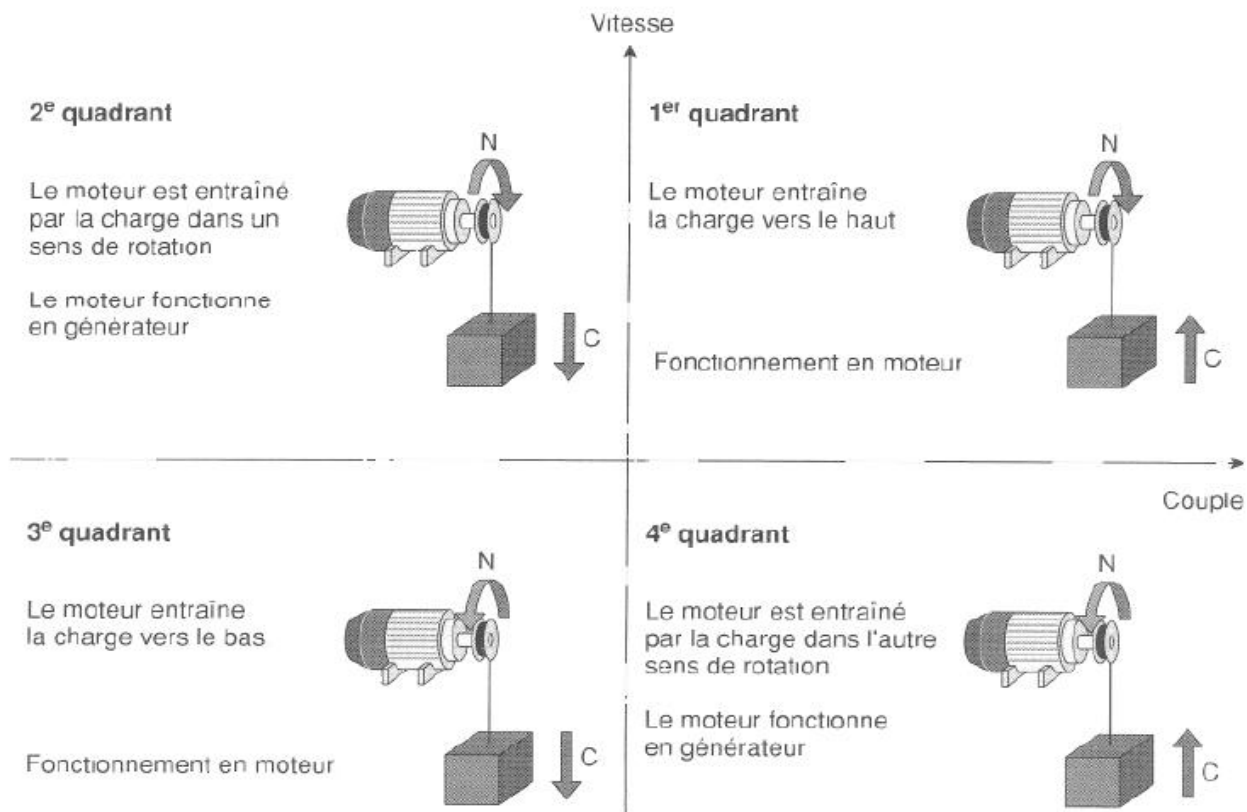


Figure (II.10) : Zones de fonctionnement d'un moteur à 4 quadrants [14].

- Quadrant 1 : la machine tourne en marche avant et fonctionne en moteur.
- Quadrant 2 : la machine tourne en marche avant et fonctionne en génératrice.
- Quadrant 3 : la machine tourne en marche arrière et fonctionne en moteur.
- Quadrant 4 : la machine tourne en marche arrière et fonctionne en génératrice

d-2) Structures des zones de fonctionnement :

Le montage est constitué d'une source de tension continue E réversible en courant, de l'induit d'une machine à courant continu (MCC) + son inductance de lissage L et de 4 interrupteurs électroniques $K1, K2, K3, K4$ commandés à l'ouverture et à la fermeture et bidirectionnels en courant Figure (II.11)

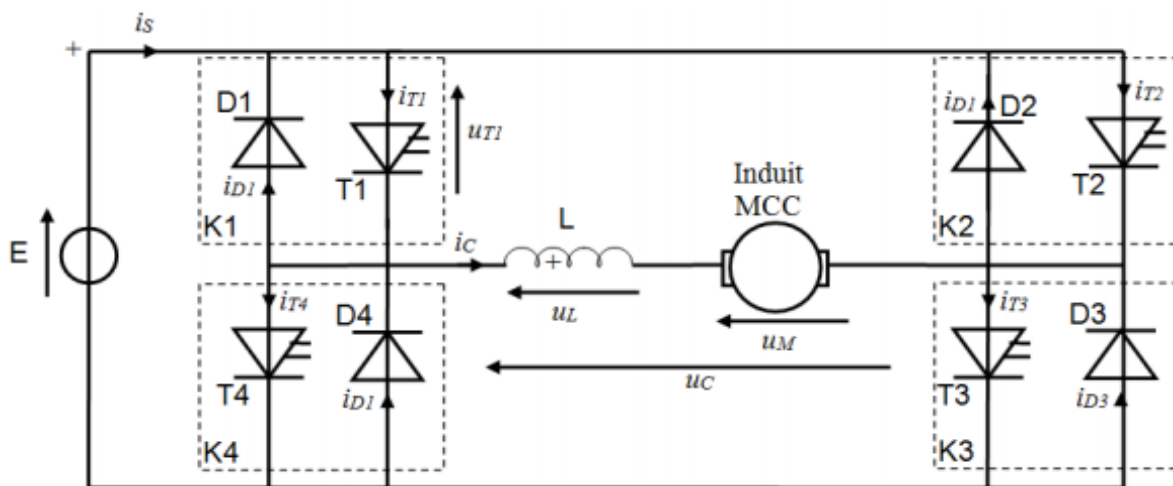


Figure (II.11): Schéma électrique d'un hacheur à 4 quadrants [17].

La machine à courant continu est susceptible de fonctionner en moteur, le transfert d'énergie s'effectue alors de la source E vers la MCC, ou en génératrice, le transfert d'énergie s'effectue alors de la MCC vers la source E.

Les interrupteurs sont constitués d'un transistor ou, IGBT + Mosfet, son circuit de commande, et d'une diode branché en antiparallèle qui permet d'assurer la possibilité du retour du courant. Les interrupteurs doivent pouvoir être commandés à l'ouverture et à la fermeture, et amplifier le courant: on utilise des transistors en commutation généralement des MOSFET.

Chaque interrupteur électronique est associé a une diode dite de diode de récupération, elles permettent la circulation du courant lorsque l'interrupteur est commandé et que le courant est dans le sens opposé à celui de l'interrupteur.

Cette phase est appelée phase de récupération, elle correspond au freinage du moteur (qui fonctionne à ce moment précis en génératrice) appelé « freinage par récupération ».

d-3) Fonctionnement dans les 4 quadrants :

- * Pour $0 \leq t \leq \alpha T$ On commande la fermeture de K1 et K3 donc $U_c = E$
 - Si $i_c > 0$ alors le courant passe par K1 et K3
 - Si $i_c < 0$ alors le courant passe par D1 et D3
- * Pour $\alpha T \leq t \leq T$, on commande la fermeture de K2 et K4 donc $U_c = -E$
 - Si $i_c > 0$ alors le courant passe par D2 et D4
 - Si $i_c < 0$ alors le courant passe par K2 et K4

d-4) La valeur moyenne de la tension au borne de la charge:

La valeur moyenne de la tension U_c est :

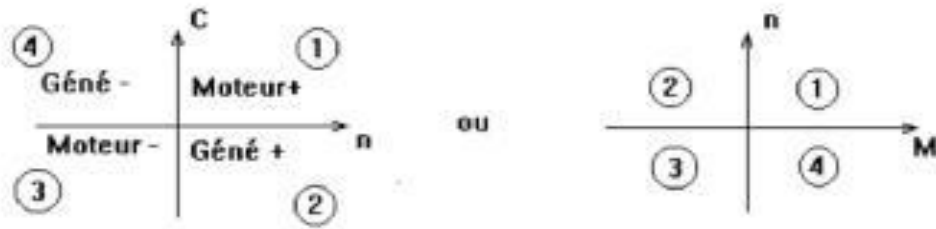
$$U_{cmoy} = \frac{1}{T} \left[\int_0^{\alpha T} E * dt + \int_{\alpha T}^T -E * dt \right] = \frac{1}{T} [E * \alpha T - E * T + E * \alpha * T] \quad (\text{II.7})$$

$$U_{cmoy} = E(2\alpha - 1) \quad (\text{II.8})$$

Cette tension est donc réglable de $-E$ à $+E$

Maintenant on peut avoir $U_{cmoy} < 0$ (formule) donc on peut avoir un sens de rotation négatif.

Le courant pouvant également être négatif on dispose de 4 quadrants.



Pour $\alpha > 0.5$ la machine à courant continu fonctionnant en moteur : **quadrant 1**

Pour $\alpha < \frac{1}{2}$ la machine à courant continu fonctionne en moteur : **quadrant 3**

d-5) Fonctionnement dans les 4 quadrants

La tension aux bornes de la charge vérifie la relation

$$U_c = U_L + U_M \quad (\text{II.9})$$

Or $U_L = 0$ donc $U_c = U_M$

De plus $U_c = E(2\alpha - 1)$ et $U_M = EM + R * ic = K * \Phi * \Omega + R * ic$ (II.10)

On en déduit que la vitesse de rotation est donnée par la relation :

$$\Omega = \frac{(2\alpha - 1)E - R * ic}{k * \phi} \quad (\text{II.11})$$

II.9. Régulation de vitesse de moteur à courant continu:

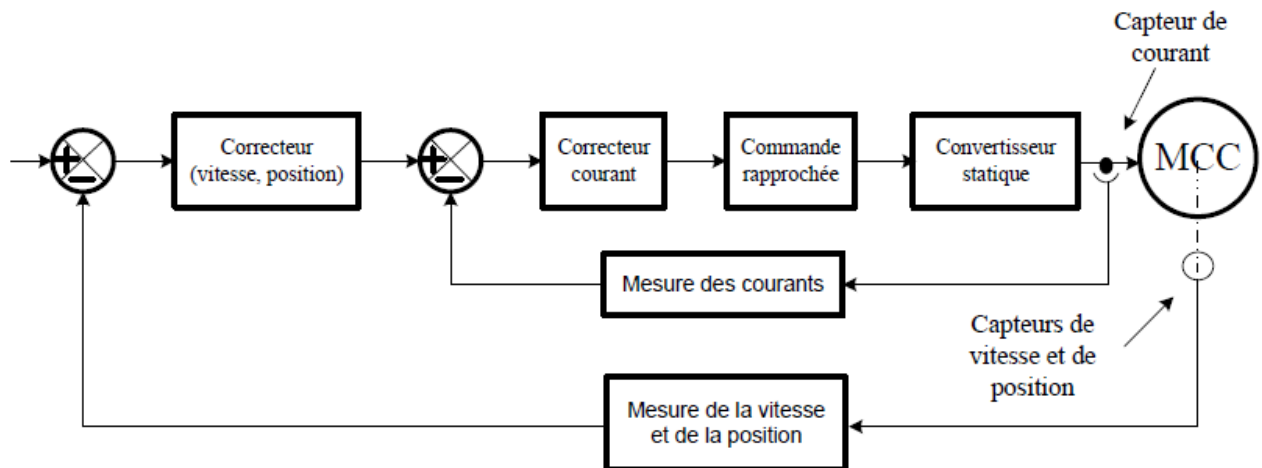


Figure (II.12): Schéma synoptique de la régulation d'un moteur à courant continu [23].

La figure (II-12) donne la structure générale la plus fréquente. C'est celle d'un variateur de vitesse à deux boucles en cascade. On y distingue les deux organes de puissance (le moteur et le convertisseur statique avec son électronique de commande), les deux capteurs (courant et vitesse) et les deux régulateurs (de courant et de vitesse). Dans cette structure, la tension de sortie du régulateur de vitesse (correcteur vitesse et position) sert de référence au régulateur de courant. C'est l'image du courant (donc du couple) désiré [23].

II.10. La vitesse du moteur asynchrone :**II.10.1. Vitesse de synchronisme :**

C'est la vitesse de rotation du champ tournant.

$$ns = 60 * f / P \quad (\text{II.12})$$

II.10.2. Vitesse de rotation du moteur :

C'est la vitesse de rotation de la machine.

$$n = ns(1 - g) \quad (\text{II.13})$$

II.10.3. Vitesse angulaire :

$$\Omega = 2 \pi n \quad (\text{II.14})$$

II.10.4. Vitesses de synchronisme courantes:

Nombre de pôles	2	4	6	8	10	12
Paires de pôles (P)	1	2	3	4	5	6
n (tr/mn) sous 50 Hz	3000	1500	1000	750	600	500
n (tr/mn) sous 60 Hz	3600	1800	1200	900	720	600

Tableau (II.2) : Vitesse de synchronisme courante.

II.10.5 Le glissement :

C'est l'écart relatif entre la vitesse de rotation de la machine et la vitesse de synchronisme.

$$g = \frac{ns - n}{ns} \quad (\text{II.15})$$

Remarque :

- Au démarrage : $g = 100\%$
- En rotation : $g < 1$ tant que le MAS n'est pas entraîné par la charge.
- En régime nominal : $g = 3 \text{ à } 10\%$.

II.11. Variation de vitesse d'un moteur asynchrone :

D'après l'équation (II.12), on constate qu'on peut varier la vitesse en agissant sur les Paramètres f, p .

II.11.1. Action sur les paires de pôles :

On s'aperçoit que d'après les formules précédentes la fréquence de rotation d'un Moteur asynchrone triphasé est lié au nombre de paires de pôles p du bobinage.

- Si le nombre de paires de pôles **augmente**, la fréquence de rotation d'un moteur **diminue**
- Si le nombre de paires de pôles **diminue**, la fréquence de rotation d'un moteur **augmente**

II.11.2. Action sur la fréquence d'alimentation du moteur :

Toujours d'après les formules précédentes, on s'aperçoit que la fréquence de rotation

D'un moteur asynchrone triphasé est directement liée à la fréquence f du réseau l'alimentant.

- Si la fréquence **augmente**, la fréquence de rotation d'un moteur **augmente**.
- Si la fréquence **diminue**, la fréquence de rotation d'un moteur **diminue**.

Dans notre projet, nous nous intéressons à la variation de fréquence et cela par l'étude d'un variateur de vitesse dédié à moteur asynchrone.

II.12. Le variateur de vitesse :

II.12.1. Définition :

Un variateur de vitesse est un dispositif permettant de réaliser l'alimentation et la commande d'un moteur asynchrone, leur fonctionnement est similaire à un convertisseur de fréquence.

L'objectif des variateurs de vitesse est d'alimenter les moteurs asynchrones triphasés de manière à obtenir des caractéristiques de fonctionnement radicalement différentes de leur utilisation normale (moteurs alimentés en direct par la tension réseau) ; leur principe consiste à fournir au moteur une onde de tension à amplitude et fréquence variables, en maintenant le rapport tension/fréquence sensiblement constant.

II.12.2. Constitution et principe de fonctionnement d'un variateur de vitesse :

Un variateur de vitesse est constitué d'un redresseur, d'un filtre, d'un onduleur et d'une interface utilisateur.

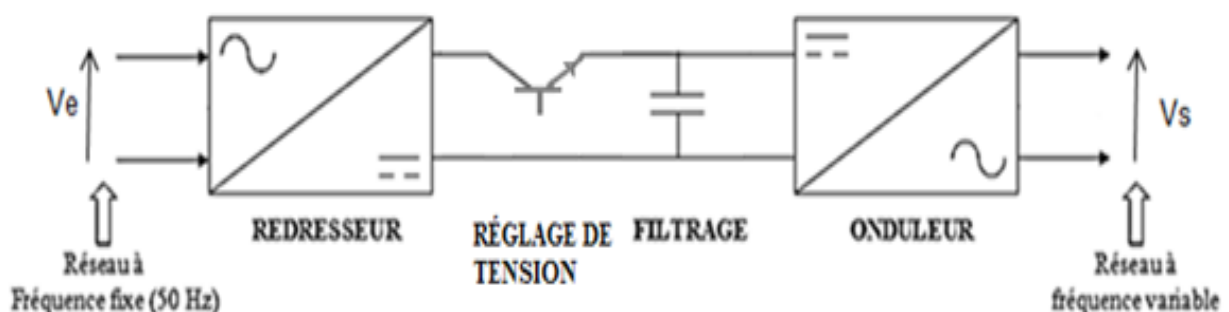


Figure (II.13) : Structure d'un variateur de vitesse [18].

II.12.3. Constitution :

Le variateur de vitesse est constitué essentiellement :

- D'un redresseur qui connecté à une alimentation triphasée (le réseau), qui génère une tension continue (le signal n'est pas parfaitement continue), ce dernier peut-être de type commandable ou non commandable.
- D'un circuit intermédiaire (un filtre) qui agit généralement sur le lissage de la tension de sortie du redresseur (améliorer la composante continue), le circuit intermédiaire peut aussi servir de dissipateur d'énergie lorsque le moteur devient générateur.
- D'un onduleur qui engendre le signal de puissance à une tension et /ou fréquence variable
- D'un système de commande piloté (transmission et réception des signaux) le redresseur le circuit intermédiaire et l'onduleur

Le variateur de vitesse est principalement caractérisé selon la séquence de commutation qui commande la tension d'alimentation du moteur, on a :

- Les variateurs à source de courant (CSI).
- Les variateurs à modulation d'impulsion en amplitude (MIA)
- Les variateurs à modulation de largeur d'impulsion (MLI).

II.12.4. Principe :

Les variateurs de vitesse standards, traditionnellement utilisés dans l'industrie présentés à la Figure (II.13), sont composés de deux convertisseurs connectés par un étage intermédiaire continu (Bus DC), constitué de condensateurs. Cette topologie permet d'assurer une conversion indirecte de type AC/DC/AC. Le premier convertisseur est un redresseur à diodes, non commandable, très robuste et peu coûteux. Il génère une tension continue aux bornes du bus DC, à partir d'un réseau d'entre monophasé (pour les faibles puissances) ou triphasé (pour les plus fortes puissances). Cet étage intermédiaire continu est connecté à un onduleur de tension monophasé, commande en Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI), permettant ainsi de faire varier l'amplitude et la fréquence du fondamental des tensions qui seront appliquées au moteur à l'aide d'un cyclo convertisseur à commutation naturelle piloté lui aussi en fréquence en courant ou vectoriellement.

II.12.5. Interface utilisateur :

L'interface utilisateur lui permet de démarrer et d'arrêter le moteur ainsi que d'en ajuster la vitesse. Elle peut aussi inclure le fonctionnement du moteur en sens opposé, un sélecteur pour choisir entre commande manuelle ou automatique, respectivement locale ou à distance, de la vitesse. L'interface dispose d'un affichage donnant des informations sur le statut du moteur. Des touches permettent à l'utilisateur de communiquer avec l'interface. Des portes d'entrée ou sortie, sont souvent fournis pour connecter d'autres périphériques, signaux... Un port, par exemple série, sert à configurer le variateur de vitesse a parti d'un ordinateur [18].

II.12.6. Redresseur :

Les redresseurs sont les convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent la conversion alternative continue (AC/DC). Alimentés par une source de tension alternative, ils permettent d'alimenter en courant continu le récepteur branché à leur sortie [19].

Nous utilisons le pont triphasé à diodes alimenté par un système de tensions sinusoïdales triphasées, schématisé dans la figure (II.14).

Les tensions simples des réseaux triphasés équilibrés directs sont :

$$\begin{cases} V_a = V_m \sin(\omega t - \varphi) \\ V_b = V_m \sin(\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}) \\ V_c = V_m \sin(\omega t - \varphi - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

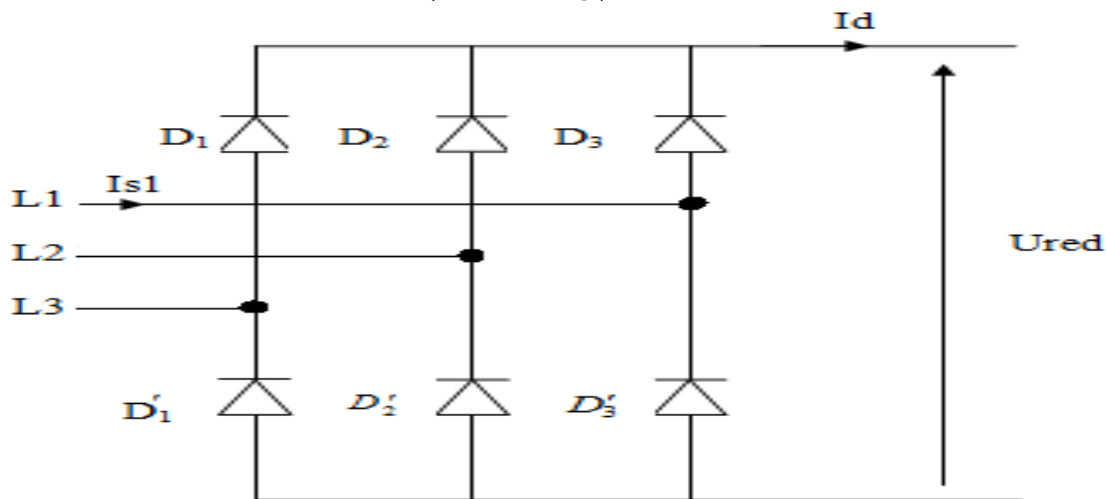


Figure (II.14) : Redresseur triphasé à diodes [19].

II.12.6.1. Etude du fonctionnement :

Les trois diodes D_1, D_2, D_3 forment un commutateur plus positif, qui laisse passer à tout instant la plus positive des tensions, et les diodes D'_1, D'_2, D'_3 forment un commutateur plus négatif, qui laisse passer la plus négative des tensions. La tension redressée est à tout instant la différence entre ces deux tensions, soit :

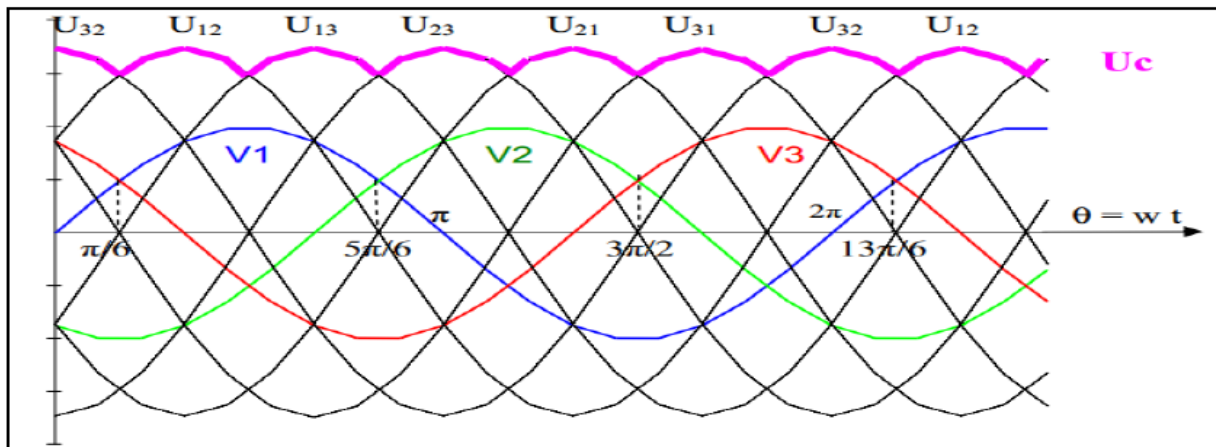


Figure (II.15): Tension redressée [19].

II.12.6.2. Valeur moyenne de la tension redressée :

$$U_{cmoy} = \frac{1}{T} \int_0^T U_c(t) dt = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} V_m [\sin(\omega t) - \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})] d(\omega t) = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \quad (II.17)$$

Le rôle du redresseur est de transformer et de lisser la tension alternative en tension continue ou plus exactement en tension pseudo continue. En effet la tension continue obtenue n'est pas parfaite car elle comporte des ondulations résiduelles.

II.12.7. Circuit intermédiaire (filtre) :

Pour filtrer la tension continue délivrée par le pont redresseur, on utilise le circuit R-C comme indiqué sur la figure (II.16).

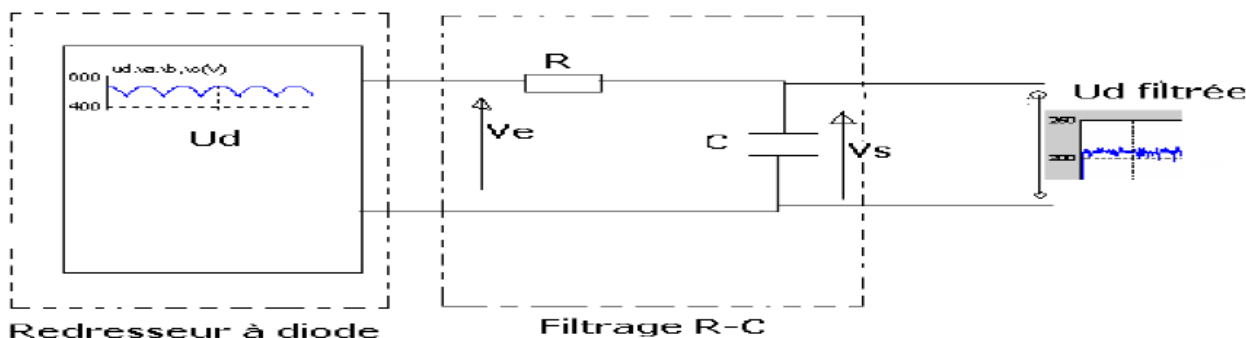


Figure (II.16) : Schéma du principe de filtrage [18].

Le rôle essentiel de ce filtre peut être résumé comme suit :

- Il dérive les harmoniques des courants créés par l'onduleur et empêche qu'ils ne soient injectés dans le réseau d'alimentation.
- Il évite les fluctuations importantes de la tension continue d'alimentation, que ces fluctuations viennent du redresseur (filtrage des harmoniques de la tension redressée) ou du

Débit instantané variable de l'onduleur, le maintien de cette tension continue apparaît comme un facteur favorisant la stabilité des montages variateurs de vitesse.

- Il limite la vitesse de croissance des courants de court-circuit, en freinant les grandeurs qui interviennent.

Pour le dimensionnement du filtre on prend en considération les paramètres suivant :

- La tension U_f d'alimentation de la charge.
- La composante continue du courant exigé I_f ,
- L'ondulation maximale de ce courant et celle tolérée sur la tension U_f dans les plus mauvaises conditions.

La capacité C_f du filtre correspond aussi généralement à des valeurs considérables, de plusieurs mF le cas échéant ; le condensateur utilisé peut appartenir au type électrolytique, à papier ou à film plastique.

En appliquant loi des mailles au modèle de la figure (II-16) on trouve :

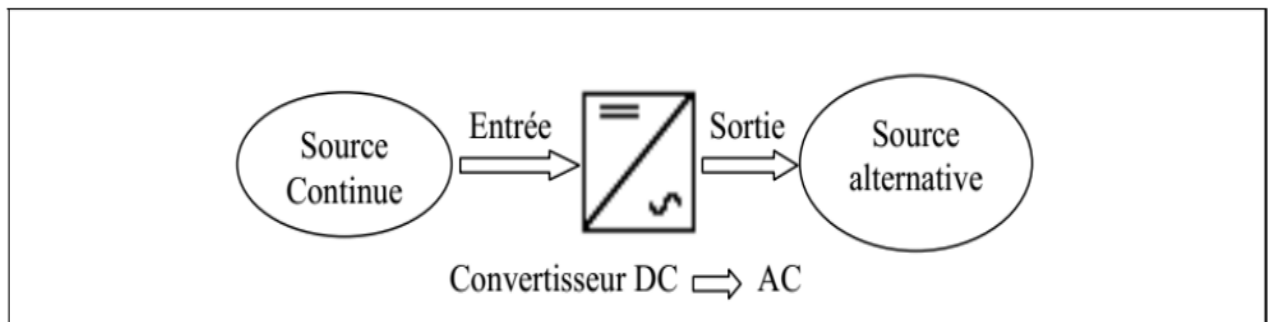
$$U_d = R i_d + V_s \quad (\text{II.18})$$

Avec :

$$i_d = \frac{cdV_s}{dt} \quad (\text{II.19})$$

II.12.8. L'onduleur :

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande [20].



. **Figure (II.17)** : Schéma de principe de l'onduleur [20].

II.13. Alimentation d'un MAS triphasé à fréquence variable :

II-13.1. Etude du couple dans le cas où $U_{moteur} = C_{ste}$:

La f.e.m. aux bornes d'un enroulement est de la forme

$$U = E = 4.44 * B_m * N * S * f \quad (\text{II.20})$$

Avec

f : Fréquence d'alimentation du moteur.

S : Section du fer (m^2).

Bm : Induction dans le moteur (T)

N : Nombre de conducteurs.

U : Tension aux bornes du moteur (V).

- Si f varie, U étant constant, Bm va varier pour garder l'égalité dans la relation.

- Si f diminue, Bm va augmenter et va saturer le circuit magnétique, provoquant un échauffement du moteur et surtout une baisse du couple moteur.

Donc si l'on souhaite garder Bm constant, tout en faisant varier la fréquence, il faut varier U pour maintenir constant le rapport U/f .

II.13.2. Etude du couple a $U/f = Cste$:

Dans ces conditions, les caractéristiques du couple moteur pour différentes fréquences d'alimentation opèrent une translation sur la gauche comme il est montré dans ci-dessous.

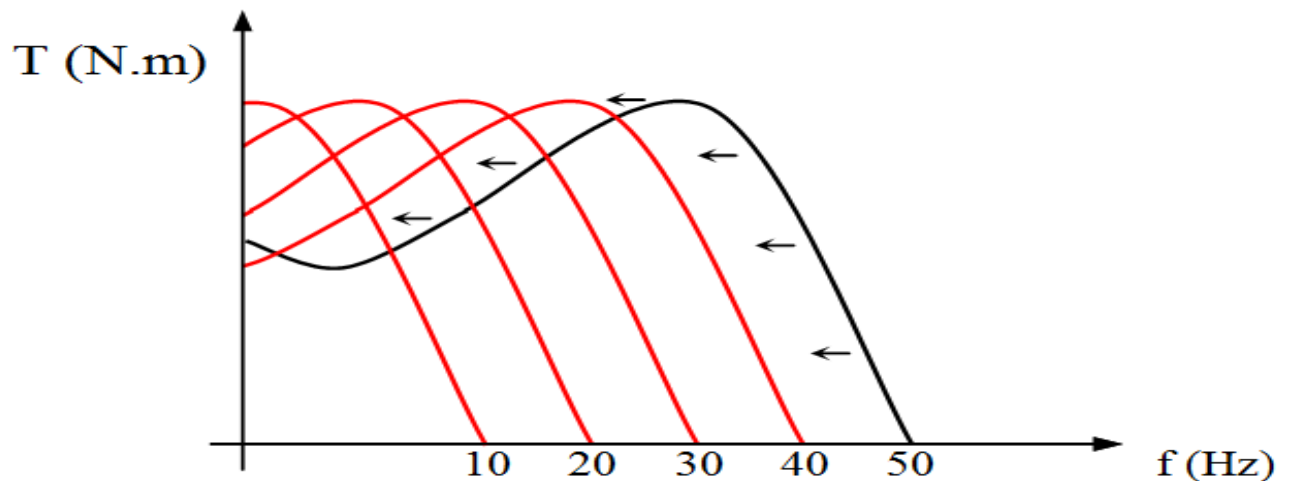


Figure (II.18) : Couple du moteur pour une fréquence variable.

La figure (II-19) délivre au moteur une tension et une fréquence proportionnelle jusqu'à la valeur de 50 Hz.

Pour des fréquences supérieures à 50hz, la tension du moteur ne pouvant plus augmenter, (l'enroulement est alimenté sous sa tension nominale) le rapport U/f diminue, le flux décroît, entraînant une diminution du couple maximum.

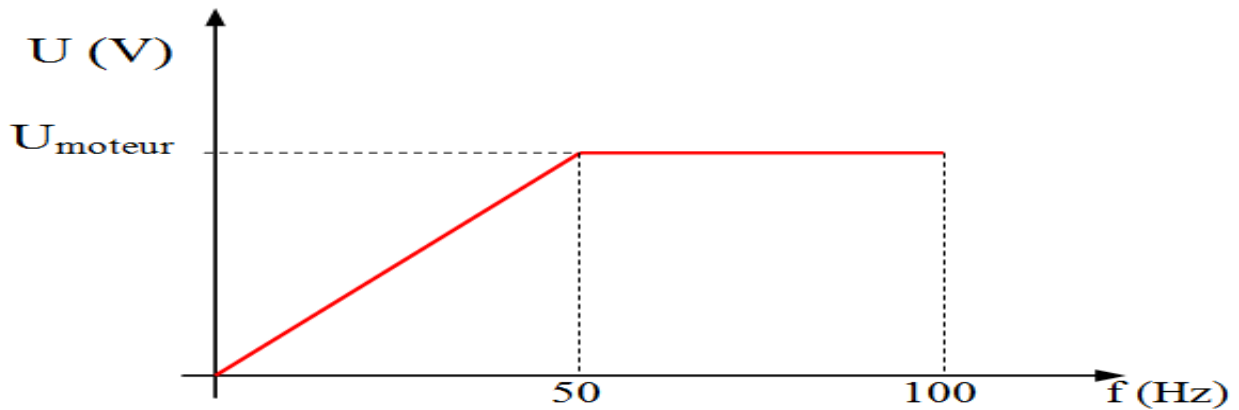


Figure (II-19) : Tension du moteur en fonction de la fréquence.

II.14. Introduction Banc d'essai de la variation de vitesse :

Un banc d'essai c'est une installation qui permet a nous de tester le fonctionnement et de qualifier un moteur et obtenir des mesures. Cette construction permet des essais à des fréquences jusqu'à 100 Hz, à une puissance de 55 kW et une tension sinusoïdale efficace jusqu'à 700 V.

Nous choisissons de faire un banc d'essai de variation de vitesse avec un moteur à courant continu.

II.14.1. L'objectif de banc d'essai :

1. De connecter les éléments de la chaine d'entrainement (variateur, moteur, charge).
2. De mesurer la tension et courant d'entrée ainsi que la tension et courant de sortie
3. De mesurer la vitesse de rotation et la puissance du moteur
4. De tester le comportement du moteur alimenté via le variateur de vitesse.

II.15. Conclusion :

Nous avons vue que la variation de la vitesse des moteurs à courant continu dépend de la tension d'alimentation d'induit, et la vitesse de moteur asynchrone dépend de sa fréquence d'alimentation.

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'objectif d'un banc d'essai de la variation de la vitesse d'un moteur asynchrone et à courant continu, et on a défini les critères du choix et les applications d'un variateur de vitesse.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons les composantes électroniques utilisés pour notre réalisation et les méthodes adaptés.

Chapitre III

MATERIELS UTILISES ET METHODES ADOPTEES



III.1. Introduction :

Dans ce chapitre on va présenter la méthode de modulation de largeur d'impulsion (MLI) et sa principe et leurs avantages et inconvénients.

Ensuite nous allons parler sur les différents éléments d'électronique de puissance utilisés dans notre réalisation.

III .2. Technique De Commande MLI [21]:

La modulation de largeur d'impulsion MLI, est une méthode qui à permettre introduire des commutations supplémentaires à fréquence plus élevées que la fréquence du fondamental, transformant la tension en une suite de créneaux d'amplitude fixe et de largeur variables.

III .2.1. Structure de commande :

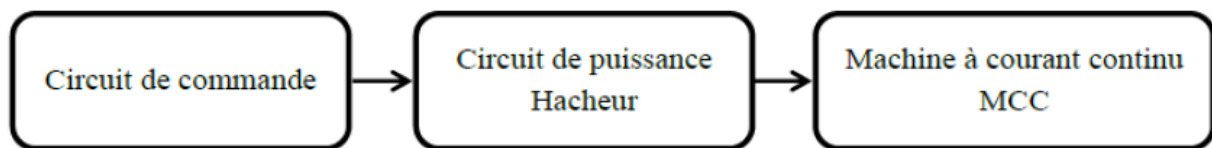


Figure (III.1): La structure de commande [21].

Pour faire varier la vitesse d'un moteur on peut faire varier la tension d'alimentation à ses bornes mais dans ce cas une partie importante de l'énergie est consommée par le dispositif d'alimentation, on préfère de façon discontinue avec un hacheur et faire ainsi varier la tension moyenne à ses bornes. On parle alors de Modulation par Largeur d'Impulsions (MLI), ou Pulse Width Modulation (PWM).

III .2.2. Principe de la commande MLI :

La commande MLI est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire.

La technique la plus réponde pour la production d'un signal MLI est de comparer entre deux signaux [25]:

- Le premier, appelé signal de modulant, est un signal continue
- Le second, appelé signal porteuse, définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques du convertisseur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence

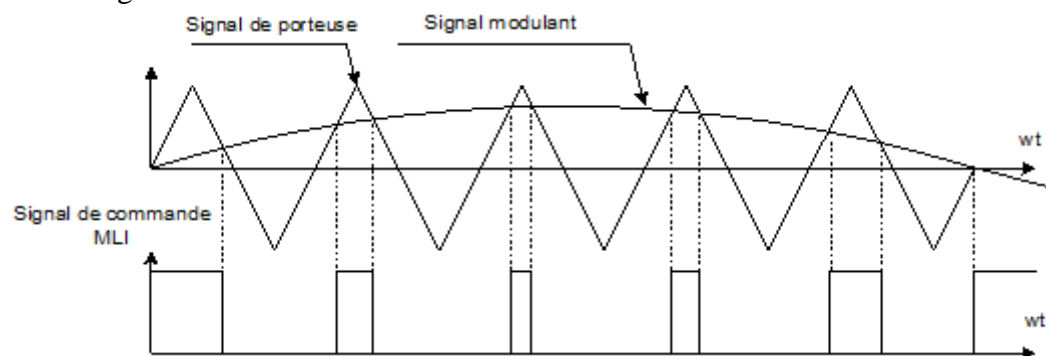


Figure (III .2) : Un signal MLI (PWM) [21].

III .2.3. Les avantages et les inconvénients :

Les avantages :

- MLI une commande très simplicité
- Le temps de réponse minimal
- repousse les harmoniques de la tension de sortie vers les fréquences élevées
- permettre de régler la l'amplitude fondamental de la tension de sortie.
- MLI permet aussi l'alimentation de plusieurs ensembles onduleurs, moteurs à partir d'une même source continue.

Les inconvénients :

- l'absence de contrôle de la fréquence de commutation des transistors
- les variations rapides de la tension génèrent des perturbations électromagnétiques ou accélèrent le vieillissement des isolants

III.3. Matériels utilisés :

III.3.1. Potentiomètre :



Figure (III .3) : potentiomètre de 10k.

Appelé aussi "Résistance variable", et parfois Rhéostat. Le potentiomètre peut être considéré comme une résistance dont on peut faire varier la valeur ohmique entre deux points, par simple action mécanique sur un axe rotatif ou rectiligne. Il est constitué d'une piste résistive sur laquelle entre en contact un curseur mobile, qui peut se promener d'une extrémité à l'autre de la piste.

III.3.1.1. Utilisation en résistance variable :

On utilise le potentiomètre comme une résistance variable afin de pouvoir modifier l'intensité du courant. Ce dispositif s'appelle un rhéostat. Certaines résistances qui sont conçues pour cette application sont bobinées d'une manière particulière : la section du conducteur est plus importante à une extrémité du potentiomètre

III.3.1.2. Types de potentiomètres :

Un potentiomètre peut être :

- Potentiomètre rotatif
- Potentiomètre ajustable
- Potentiomètre linéaire

III.3.2. Transistor de puissance BD244 (PNP) :



Figure (III .4) : transistor BD244c.

Le transistor de puissance existe essentiellement dans la première catégorie. C'est un composant totalement commandé à la fermeture et à l'ouverture. Il n'est pas réversible en courant, ne laissant passer que des courants de collecteur I_c positifs. Il n'est pas réversible en tension, n'acceptant que des tensions VCE positives lorsqu'il est bloqué.

III.3.2.1. Présentation :

Le transistor MOS est un composant très facile à commandé à la fermeture et à l'ouverture. Il est le plus rapide à se fermer et à s'ouvrir et est utilisé jusqu'à 300 kHz, voire 1 MHz. Il est rendu passant grâce à une tension VGS positive (de l'ordre de 7 V à 10 V). La grille est isolée du reste du transistor, ce qui procure une impédance grille-source très élevée. La grille n'absorbe aucun courant en régime permanent. Cela n'est pas vrai lors des commutations et c'est pour cela que les microprocesseurs (Pentium ou Athlone) chauffent autant. La jonction drain-source est alors assimilable à une résistance très faible : $R_{D_{son}}$ de quelques m Ω .

III.3.2.2. Choix d'un transistor [23]:

Après avoir établi les chronogrammes de fonctionnement (VCE et I_c), on calcule les valeurs extrêmes prises par :

- la tension (à l'état bloqué).
- le courant maxi (à l'état saturé).

Par sécurité de dimensionnement, on applique un coefficient de sécurité (1,2 à 2) à ces valeurs. Elles doivent être supportées par le composant choisi. On doit ensuite déterminer le courant $I_B > I_C$ que doit délivrer la commande.

III.3.2.3. Transistor IGBT :

Les transistors IGBT sont très utilisés dans le domaine des moyennes et grandes puissances, et on rencontre également dans ce composant les deux types de pertes évoquées plus haut.

En ce qui concerne les pertes par conduction, l'important à savoir est qu'un transistor IGBT est analogue à un transistor bipolaire en ce qui concerne sa jonction collecteur/émetteur (CE). Il est ainsi, comme le transistor bipolaire, utilisé en commutation en mode « saturé/bloqué », ce qui signifie qu'il ne conduit du courant qu'en état de saturation. En conséquence, la jonction collecteur/émetteur est le siège d'une minime, mais non négligeable, tension à l'état passant nommée V_{CE} . La valeur de cette tension, donnée par les documentations techniques, permettant d'écrire facilement les pertes par conduction [23]:

$$P_{IGBT\ cond} = V_{CE\ sat} \cdot I_{C\ moyen} \quad (III.1)$$

III.3.3. Capacité :

Le condensateur électrolytique, qui est également appelé condensateur électrochimique, se retrouve présent partout dans les applications en basses fréquences ou en courant continu.



Figure (III .5) :condensateur électrolytique 470nf.

III.3.4. Batterie 9V :

Est une pile électrique de neuf volts. Elle est régulièrement appelée pile à transistor en raison de sa grande utilisation dans les premiers postes à transistors. La pile a la forme d'un prisme rectangulaire aux arêtes arrondies avec un connecteur possédant une borne positive et une négative sur un de ses côtés.

III.3.5. Moteur à courant continu :



Figure (III .6) : Moteur DC 12v.

- Numéro de modèle: EM-529 RS445PA14233R
- Tension d'alimentation: 12-42V

- Courant, alimentation: 60mA - 1.5A
- Puissance: 7.78W
- Couple: 81,8 m.Nm
- Diamètre de l'arbre: 3.17mm
- Diamètre du moteur: 30mm
- La longueur du moteur: 67mm

III.4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons montrés la méthode de commande de modulation de largeur d'impulsion (MLI) avec son principe et leurs avantages et inconvénients.

Ensuite, nous avons présenté les différents éléments d'électronique de puissance utilisés dans notre réalisation.

Dans le chapitre suivant, nous allons procéder à une simulation avec MATLAB /SIMULINK et ISIS PROTEUS, et une validation expérimentale de tous les composants présentés dans ce chapitre.

Chapitre IV

SIMULATION ET REALISATION



IV.1. Introduction :

Notre objectif par ce travail, c'est montrer la variation de vitesse des moteurs à courant continu et asynchrone.

Pour faire varier la vitesse d'un moteur à courant continu, nous allons varier la tension d'alimentation à ses bornes. Et on utilise un hacheur pour le faire,

Pour faire varier la vitesse du moteur asynchrone, nous allons changer la fréquence de rotation.

Dans ce chapitre, nous allons simuler par MATLAB SIMULINK des hacheurs à un seul quadrant et quatre quadrants d'un moteur à courant continu et d'un moteur asynchrone pour varier la vitesse, et nous présentons une réalisation de circuit de variateur de vitesse par moteur à courant continu et nous présentons les résultats de simulation.

IV.2. MATLAB-SIMULINK :

Le logiciel MATLAB/SIMULINK, est un bon moyen pour simuler les moteurs à courant continu et asynchrone et les autres types et étudier leur fonctionnement. Il nous permet d'obtenir facilement des résultats (couple, vitesse, courant),

IV.3. Simulation D'un Moteur A Courant Continu A Excitation Séparée :

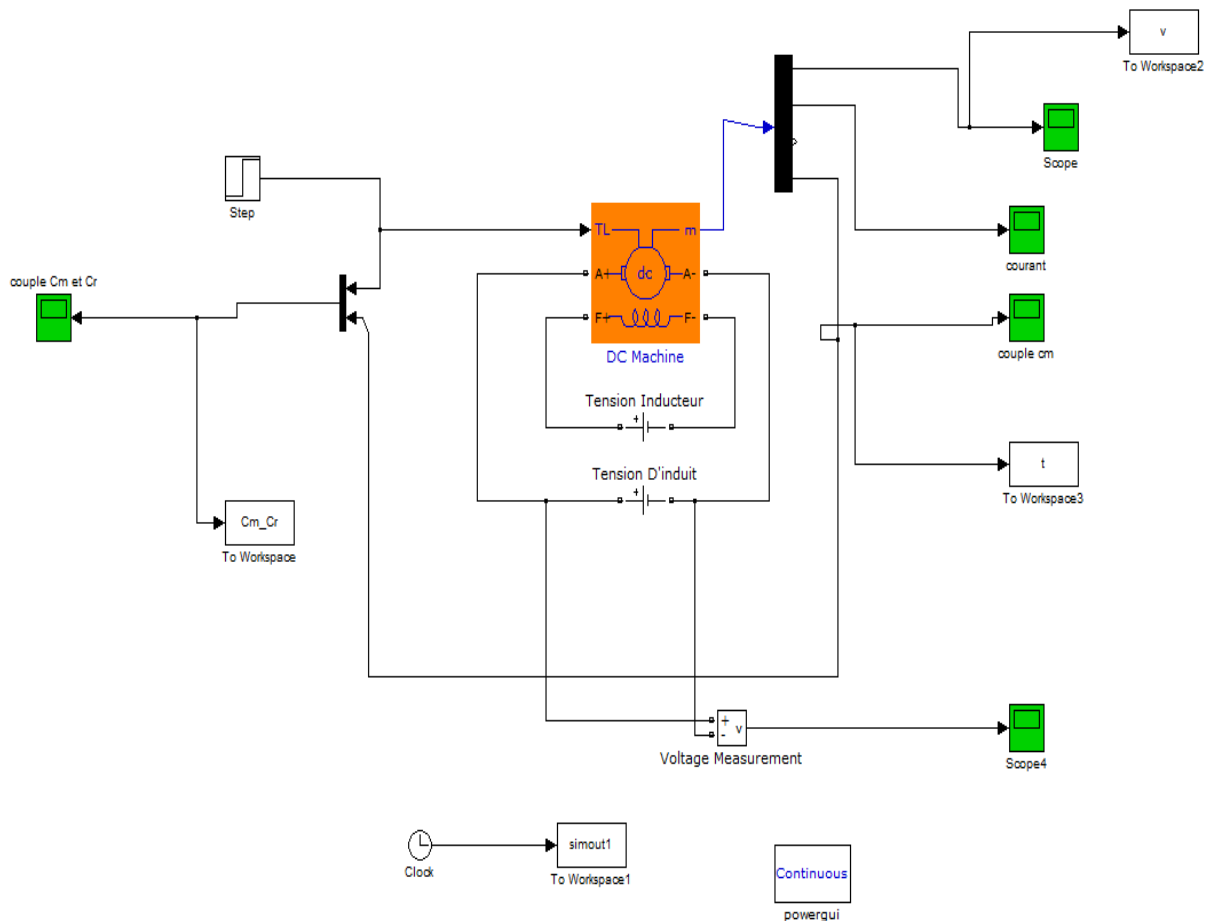


Figure (IV.1) : montage d'une machine à courant continu à excitation séparée.

IV.4. Simulation d'un hacheur à un seul quadrant commande un moteur à courant continu à excitation séparée :

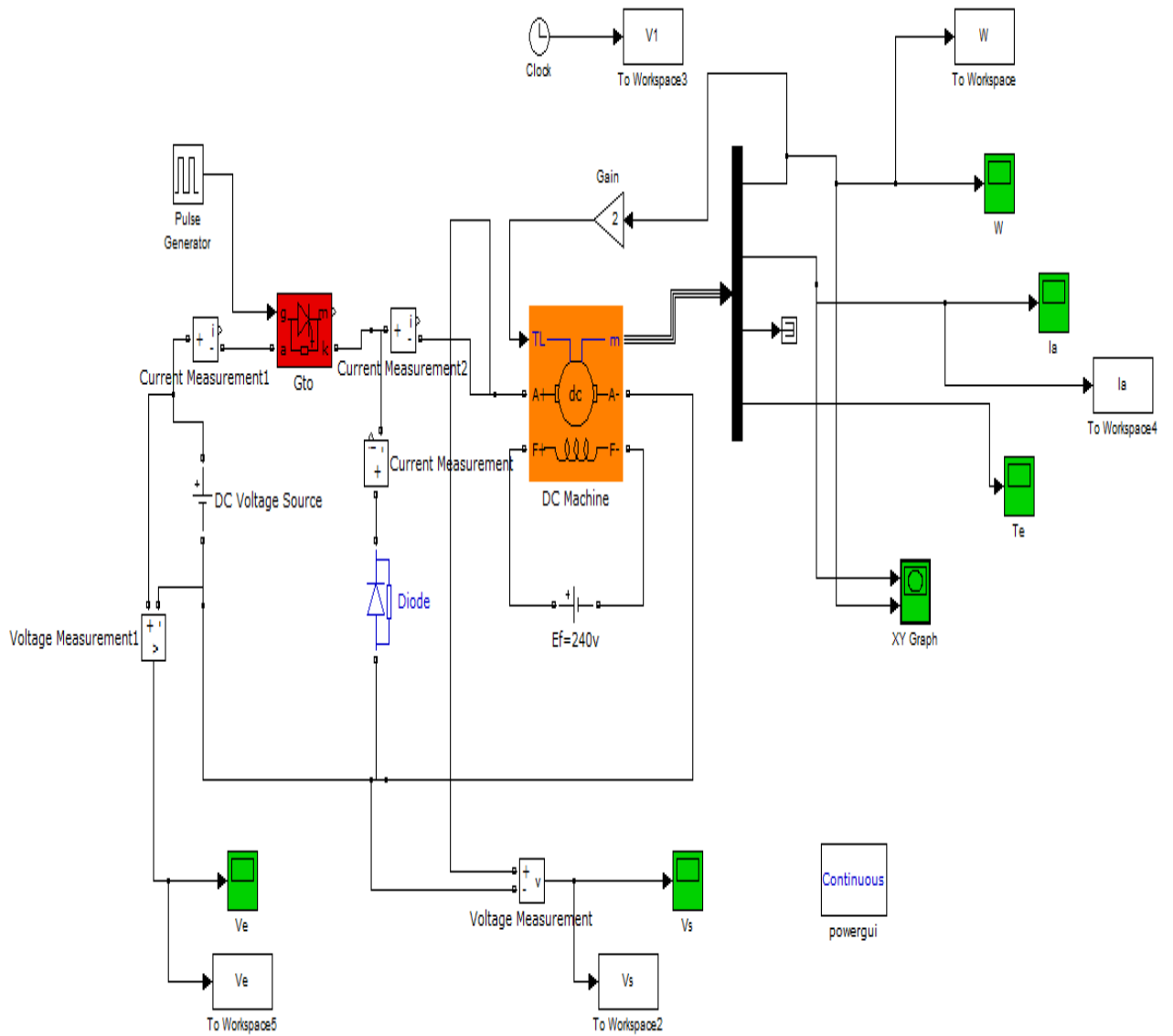


Figure (IV.2) : Hacheur série commande un moteur à courant continu.

IV.4.1. Paramètre du moteur à courant continu :

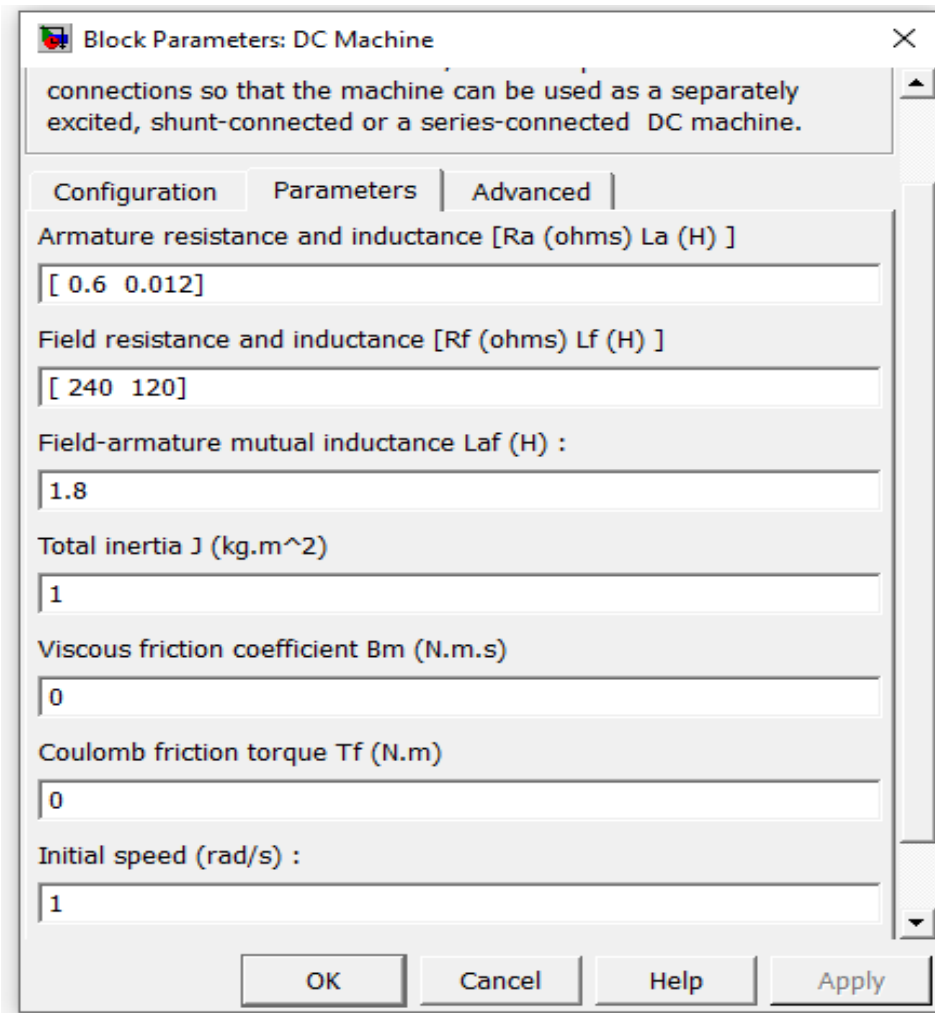


Figure (IV.3) : Fenêtre de réglage des paramètres du moteur à courant continu.

IV.4.2 Les courbes et résultats de simulation :

Pour montre l'importance de la variation de rapport cyclique sur la variation de la vitesse on prend deux rapport différents.

- $\alpha = 0.4$:

➤ Tension d'entrée :

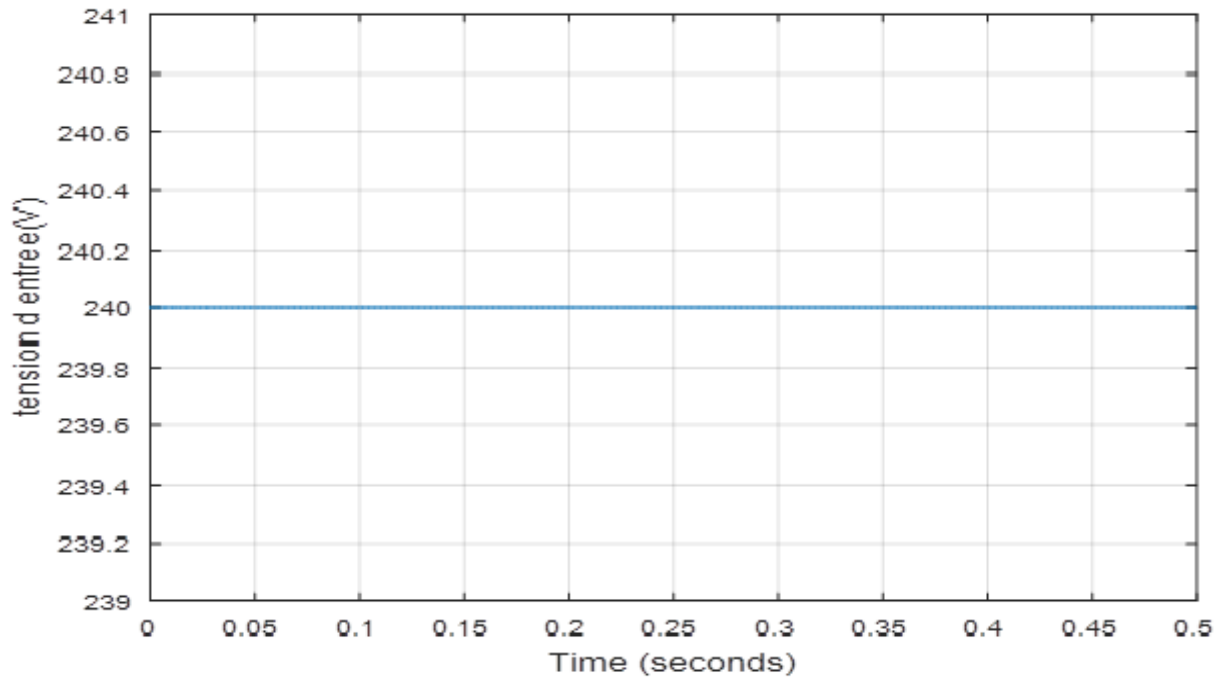


Figure (IV.4) : La tension d'entrée d'hacheur.

➤ Tension de sortie :

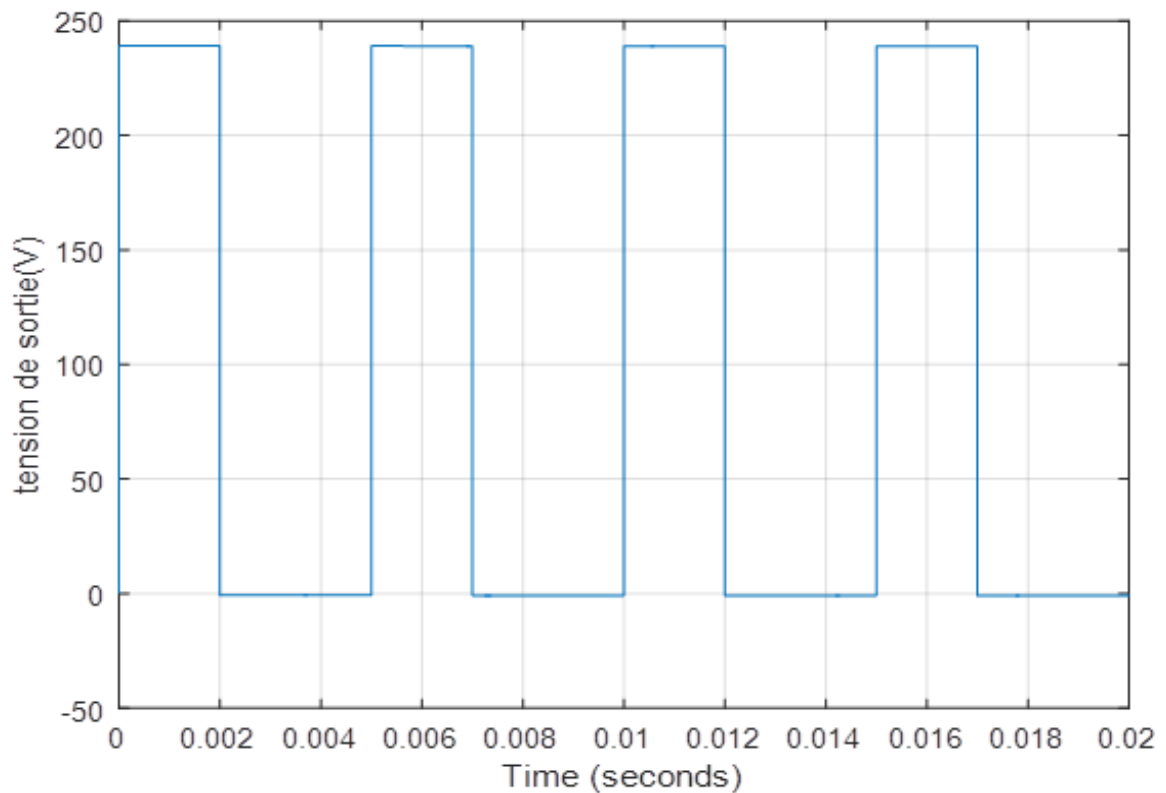


Figure (IV.5) : La tension de Sortie avec un rapport cyclique de 40 %.

➤ **La vitesse :**

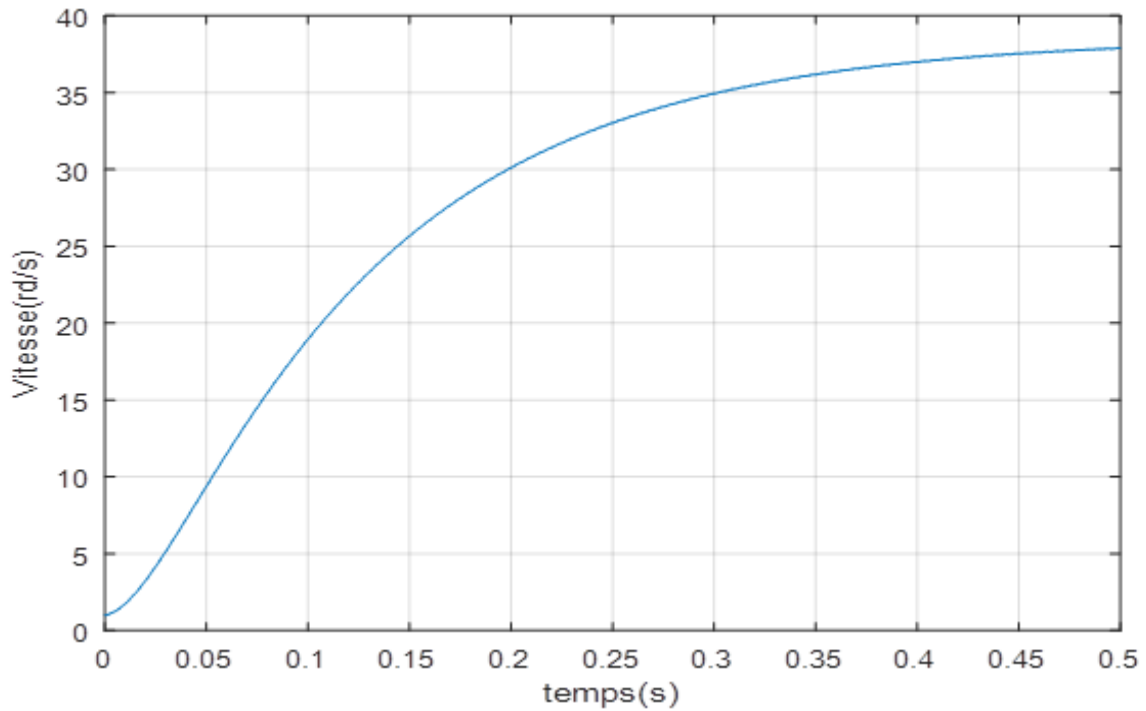


Figure (IV.6) : La vitesse de moteur avec un rapport cyclique de 40 %.

Interprétation :

On observe que le moteur démarre de vitesse de zéro (rad/s) pour se stabiliser de 38.97 rad/s, qui est la vitesse en régime établie. La courbe à une forme exponentielle, à cause de la présence de phénomènes transitoires dans les enroulements de la machine.

➤ **L'intensité de Courant :**

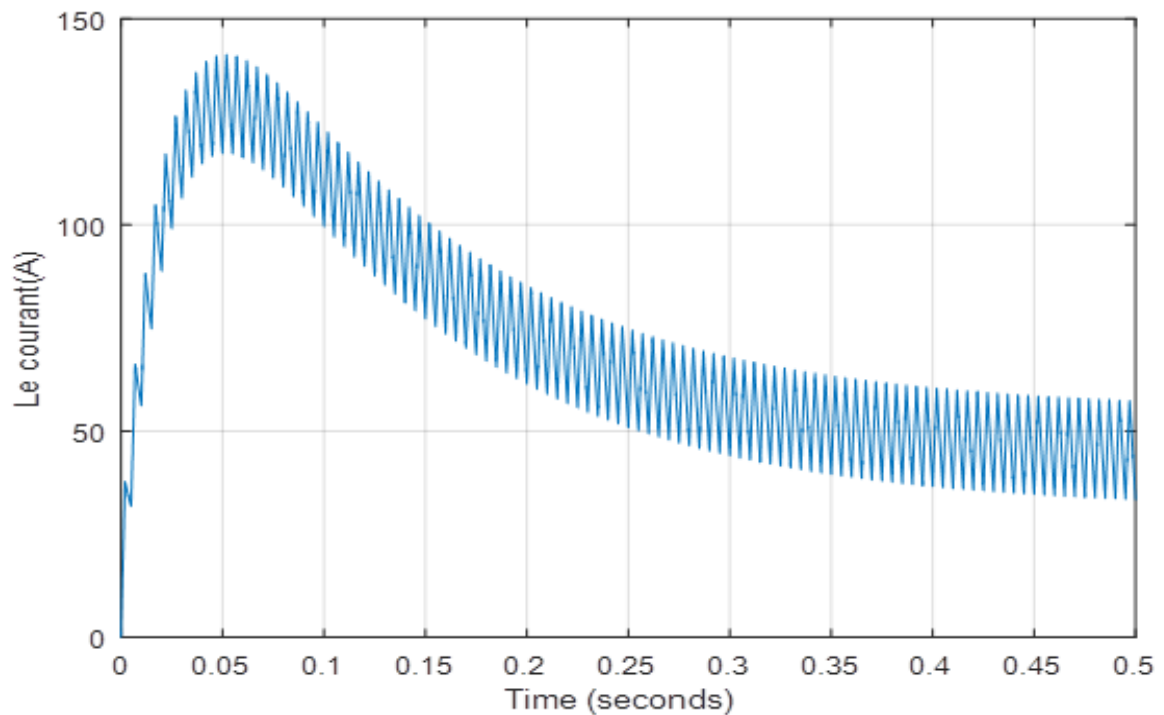


Figure (IV.7) : Le courant de moteur avec un rapport cyclique de 40 %.

Interprétation :

On remarque le moteur démarre avec un courant de démarrage important de l'ordre 143.5 A, puis le courant passe du régime transitoire au régime établi pour se stabiliser autour de 38.04 A.

- $\alpha = 0.9$:

➤ **Tension de sortie :**

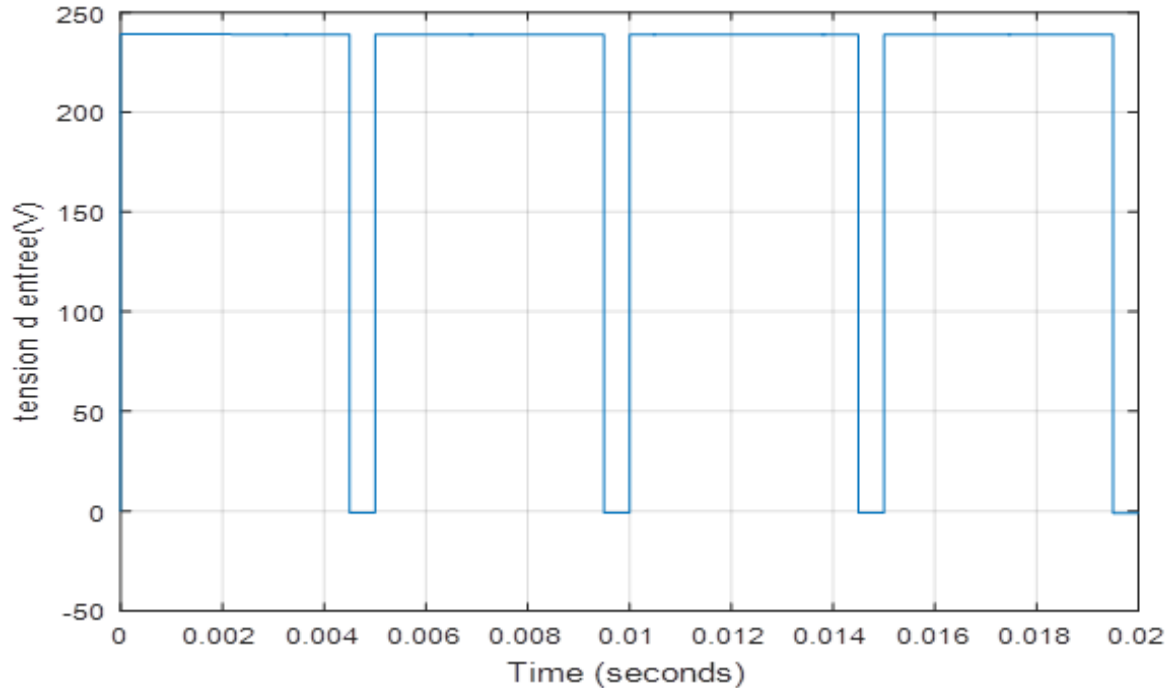


Figure (IV.8) : La tension de Sortie avec un rapport cyclique de 90 %.

➤ **La vitesse :**

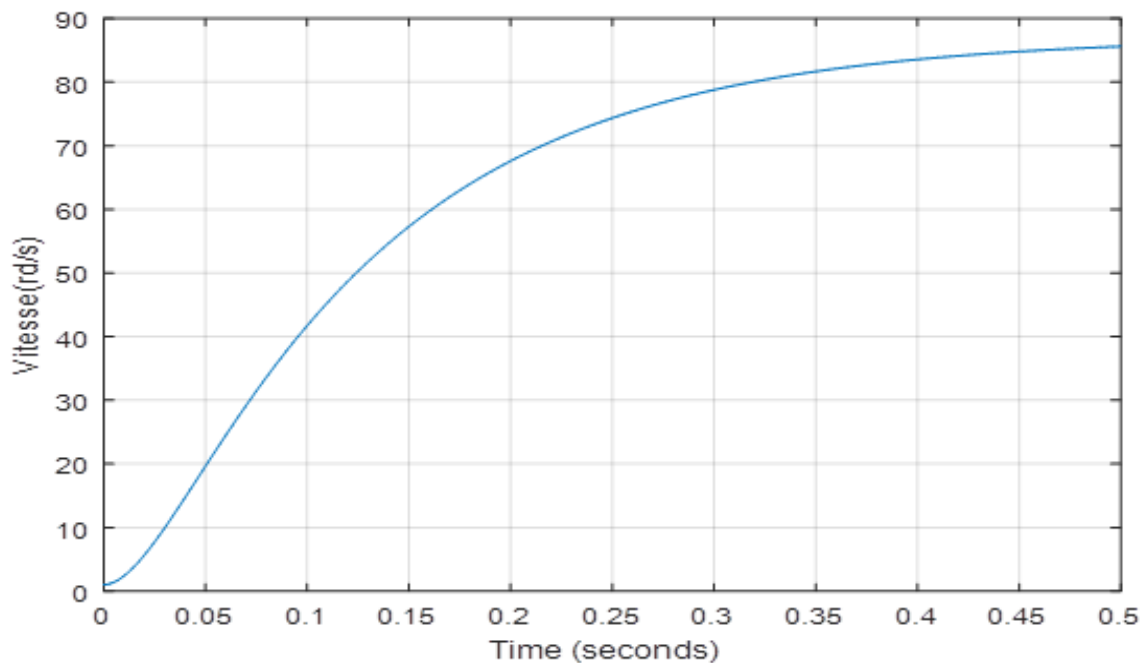


Figure (IV.9) : La vitesse de moteur avec un rapport cyclique de 90 %.

Interprétation :

La vitesse part de zéro pour se stabiliser autour de 86.5 rad/s, qui est la vitesse en régime établie. Le graphe à une forme exponentielle ce qui signifie la présence de phénomènes transitoires dans les enroulements de la machine.

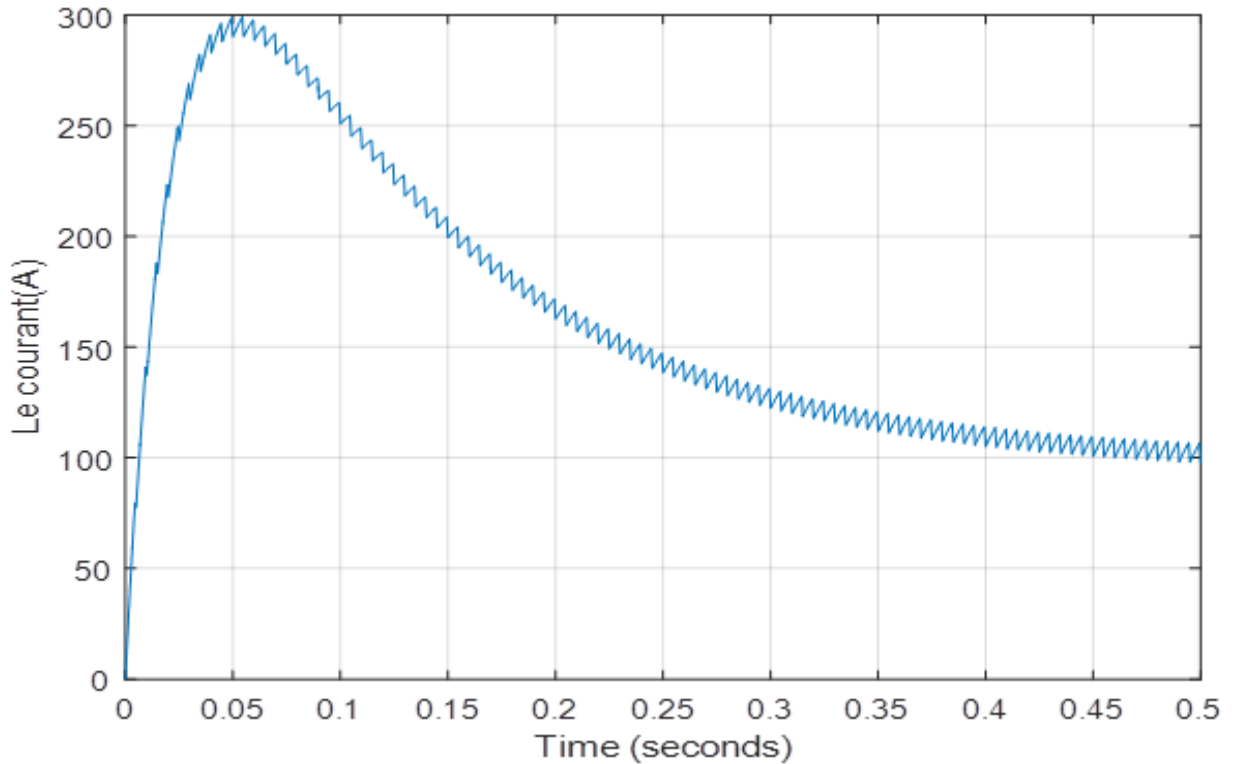
➤ L'intensité de Courant :

Figure (IV.10) : Le courant de moteur avec un rapport cyclique de 90 %.

Interprétation :

Le moteur démarre avec un courant de démarrage important de l'ordre 298.9 A, puis passe du régime transitoire ou régime établi pour se stabiliser autour de 100 A.

IV.5. Simulation d'un hacheur quatre quadrants commande un moteur à courant continu à excitation séparée :

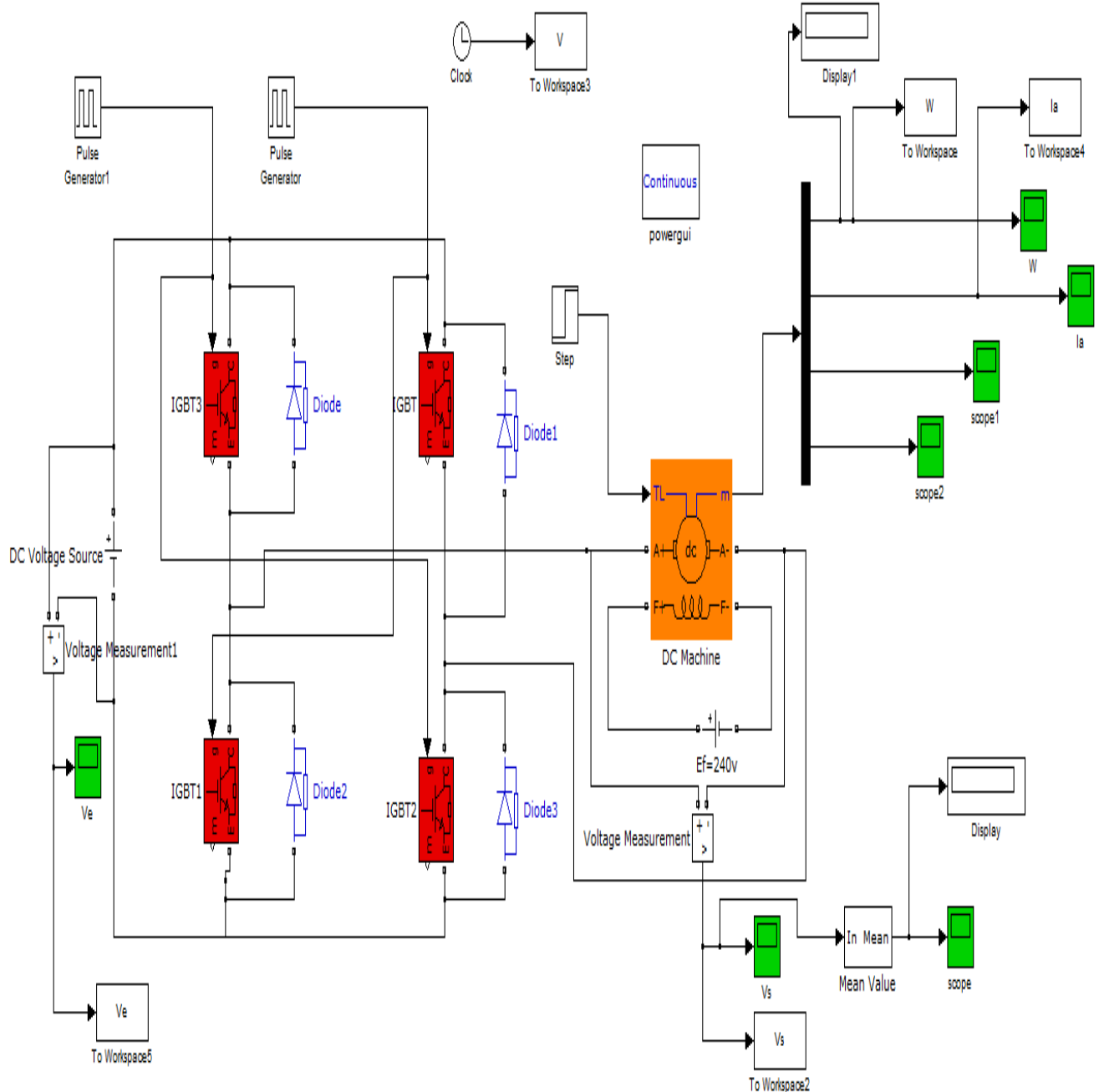


Figure (IV.11) : Hacheur quatre quadrants commande un moteur à courant continu.

IV.5.1. Les courbes et résultats de simulation :

- $\alpha = 0.6$:

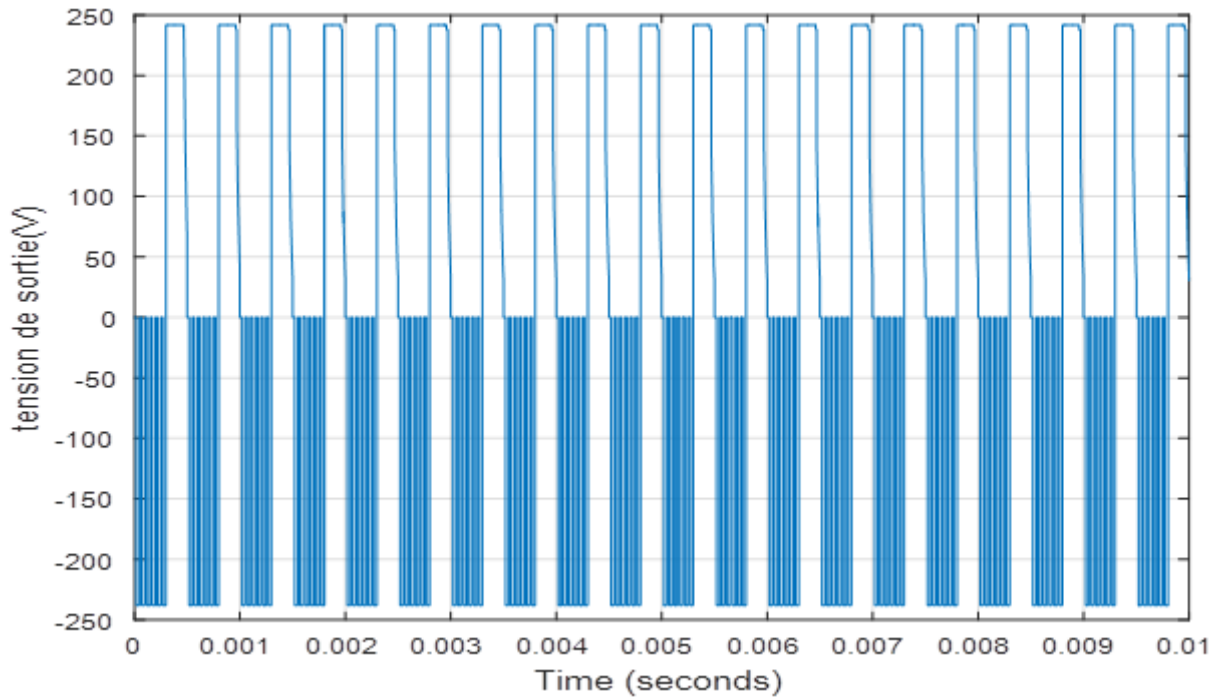
➤ Tension de sortie :

Figure (IV.12) : La tension de sortie avec un rapport cyclique de 60 %.

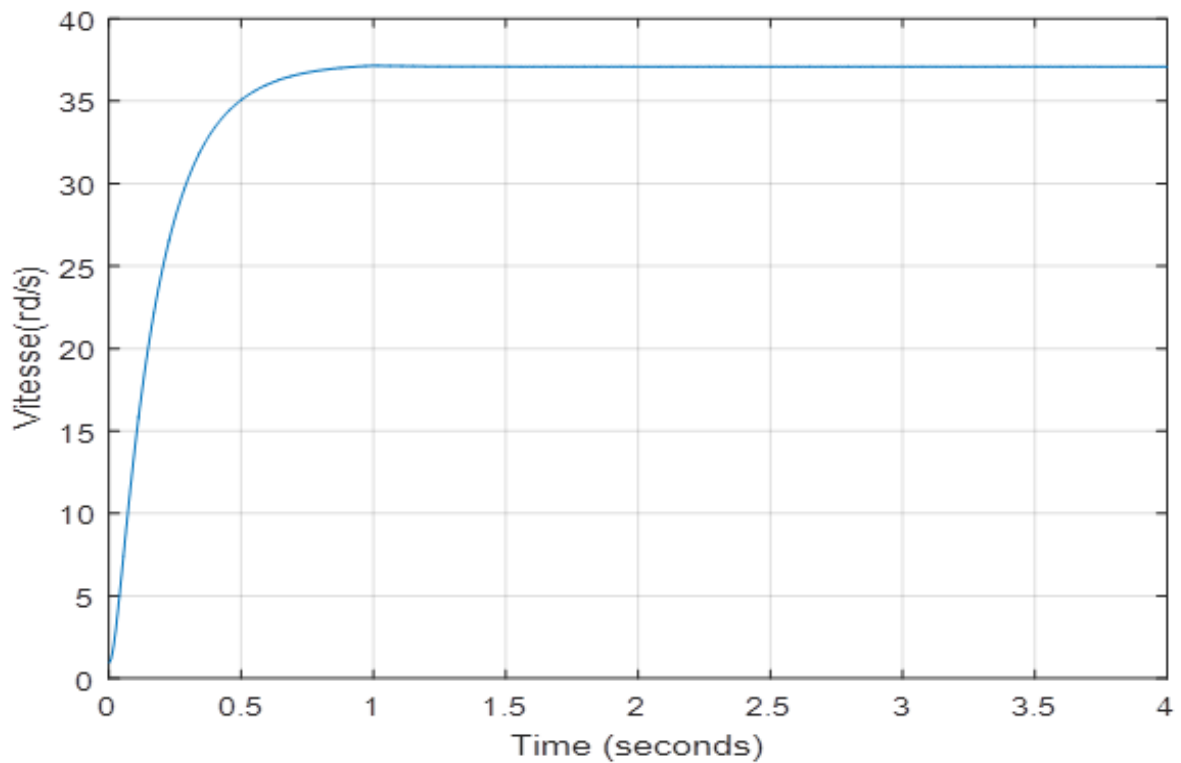
➤ La vitesse :

Figure (IV.13) : La vitesse de moteur avec un rapport cyclique de 60 %.

Interprétation :

La Vitesse part de zéro pour se stabiliser autour de 37.8 rad/s, qui est la vitesse en régime établie. Le graphe à une forme exponentielle, ce qui correspond à la présence de phénomènes transitoires dans les enroulements de la machine.

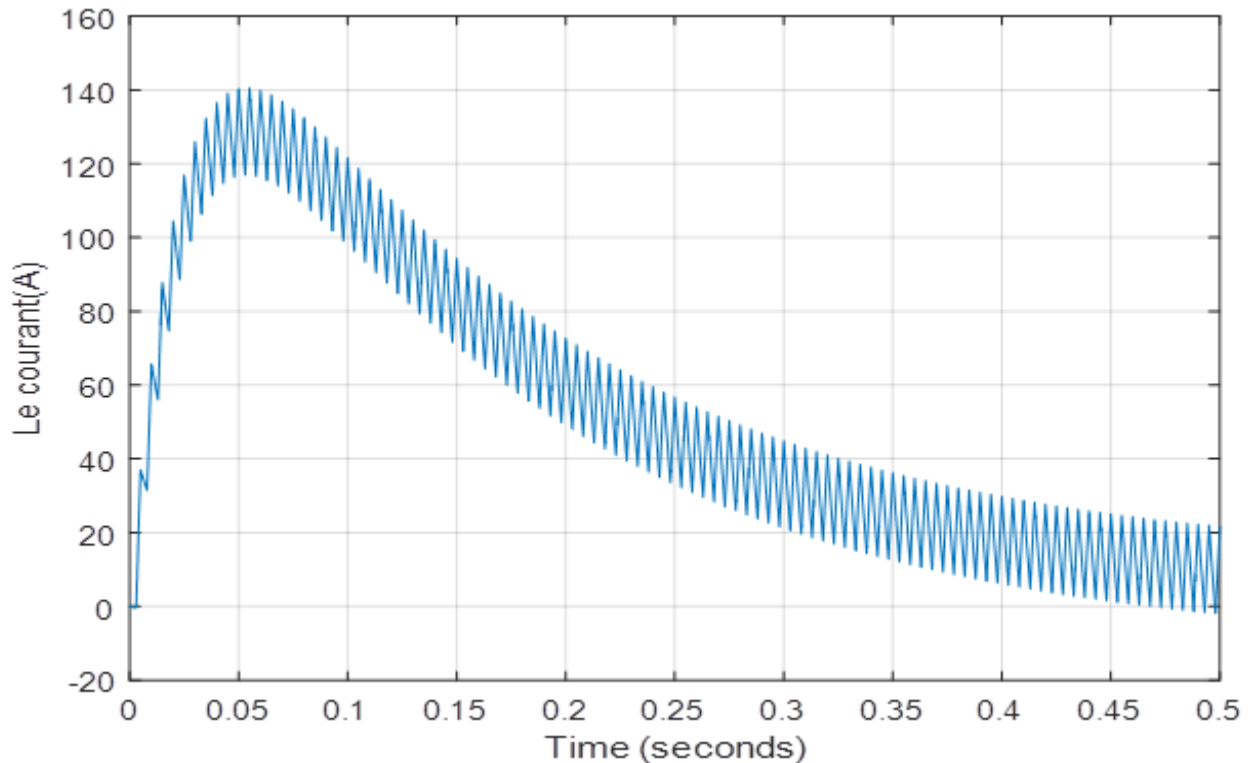
➤ **L'intensité de Courant:**

Figure (IV.14) : Le courant de moteur avec un rapport cyclique de 60 %.

IV.5.2. Analyse des résultats obtenus :

Nous observons sur cette simulation :

- ❖ La variation du rapport cyclique varie la vitesse de moteur à courant continu.
- ❖ La vitesse de rotation d'un moteur à courant continu dépend et suit sa tension d'alimentation.
- ❖ Nous pouvons d'inverser le sens de rotation du moteur on utilise un hacheur quatre quadrants.

VI.6. Simulation de variation de vitesse de MAS sur MATLAB/SIMULINK :

La figure (VI-15) représente un modèle de SIMULINK pour variateur de vitesse du moteur asynchrone,

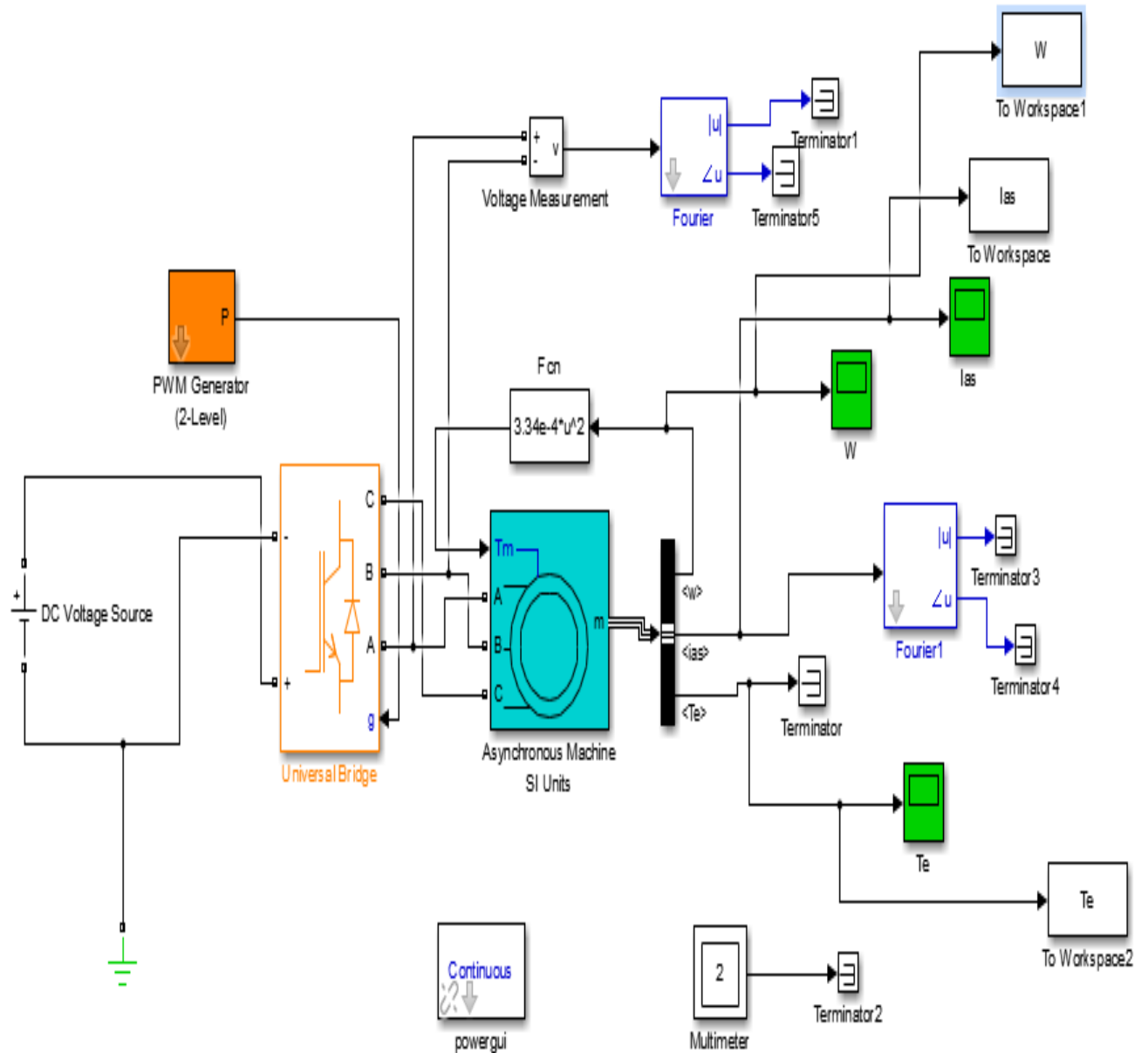


Figure (IV.15) : programme de simulation de MAS sur MATLAB/SIMULINK.

IV.6.1. Paramètre du MAS :

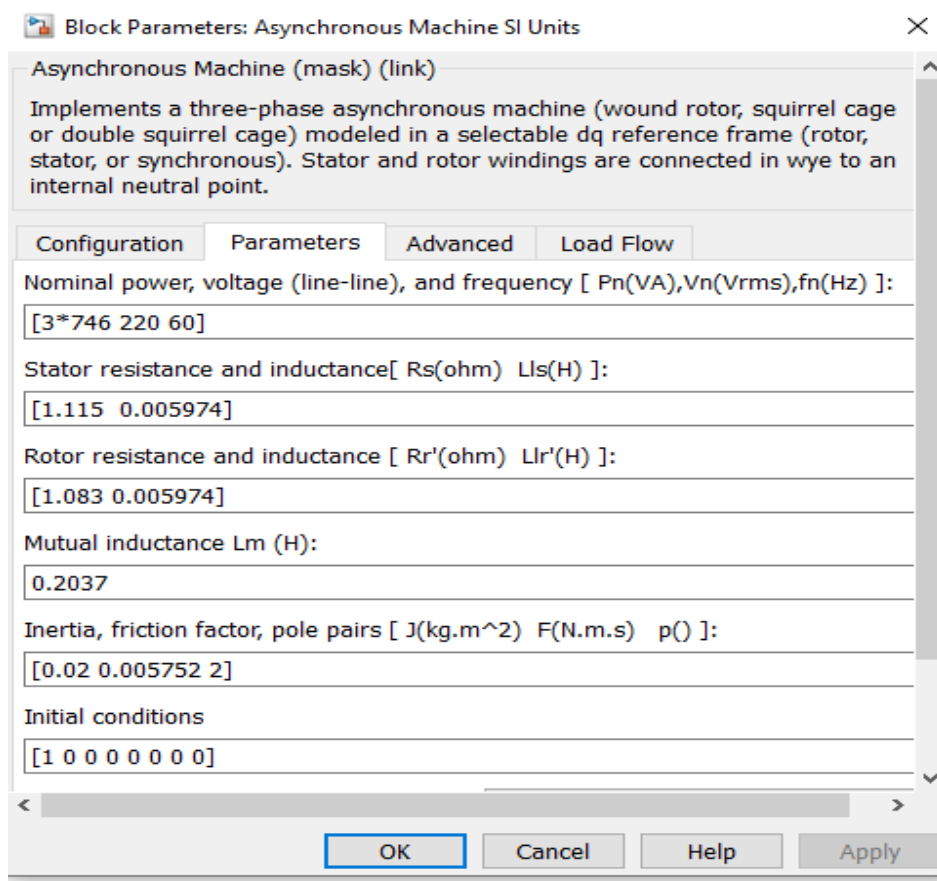


Figure (IV.16) : fenêtre de réglage du moteur asynchrone.

IV.6.2. Résultats de simulation :

Les résultats de simulation obtenus pour le changement de la référence de la fréquence d'alimentation d'un Moteur asynchrone de 60Hz et 50Hz.

- $f=60\text{ Hz}$

Les figures (IV.17, 18, 19) représente les grandeurs (Vitesse, courant et Couple).

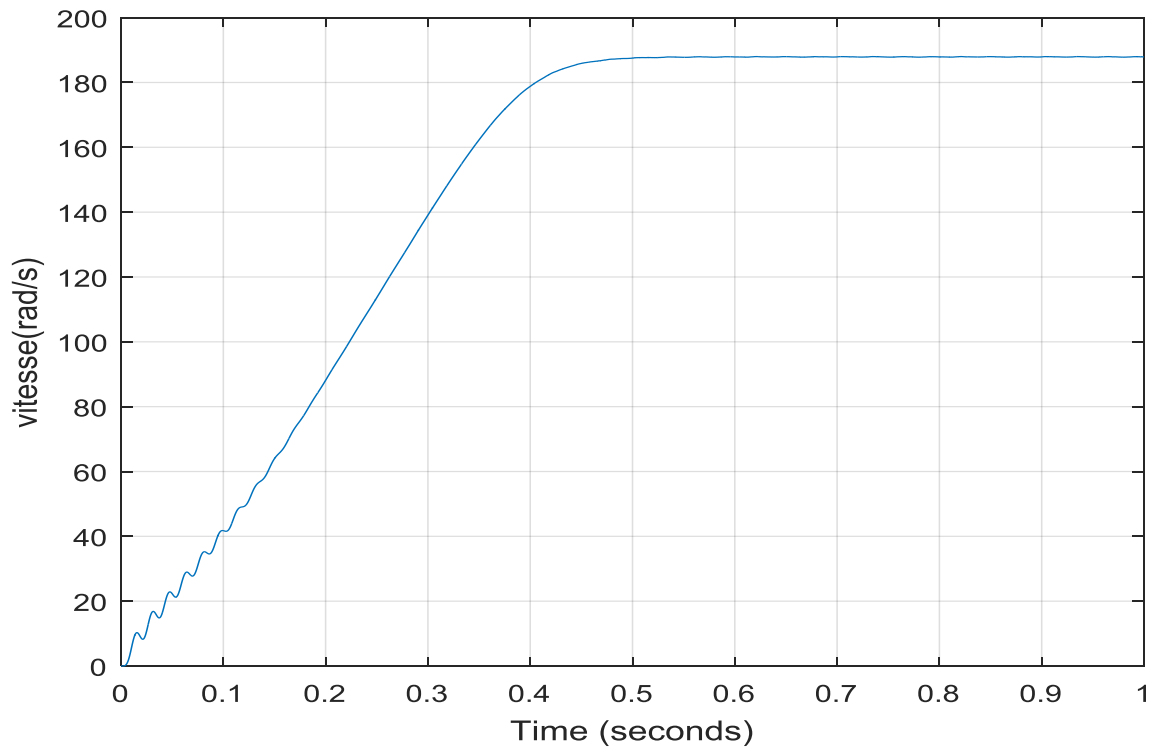


Figure (IV.17) : courbe de variation de vitesse à $f=60\text{Hz}$.

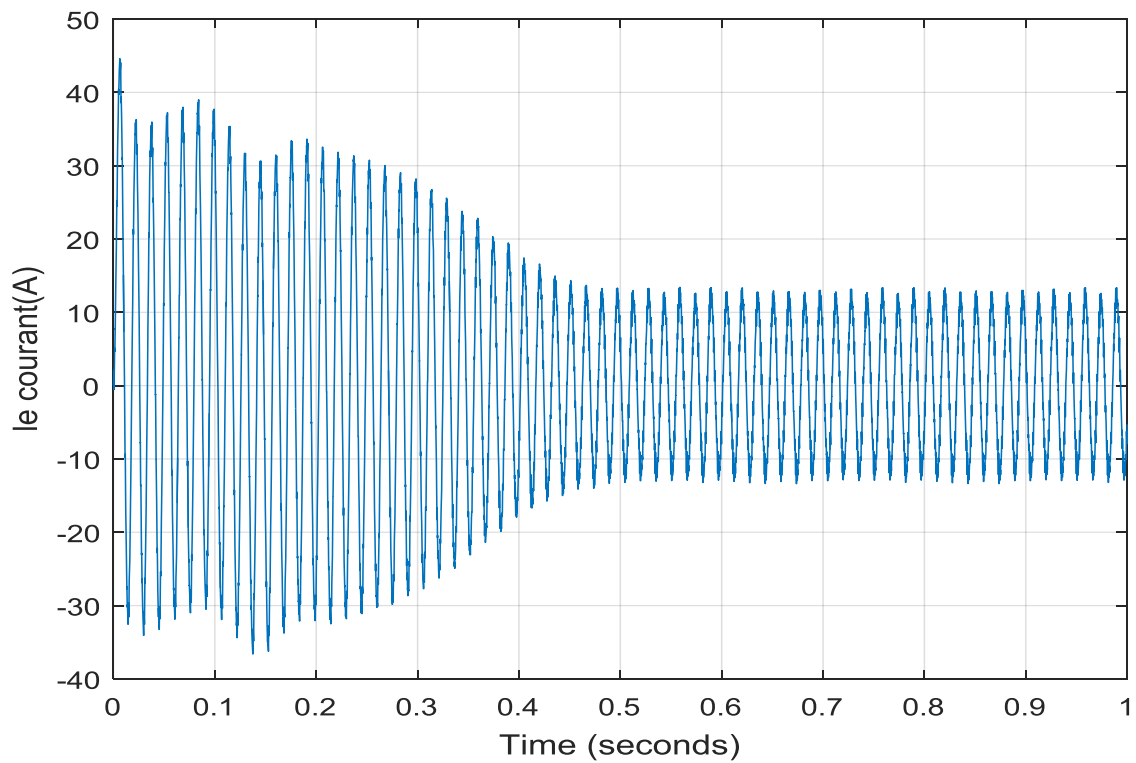


Figure (IV.18) : courbe de variation de courant à $f=60\text{Hz}$.

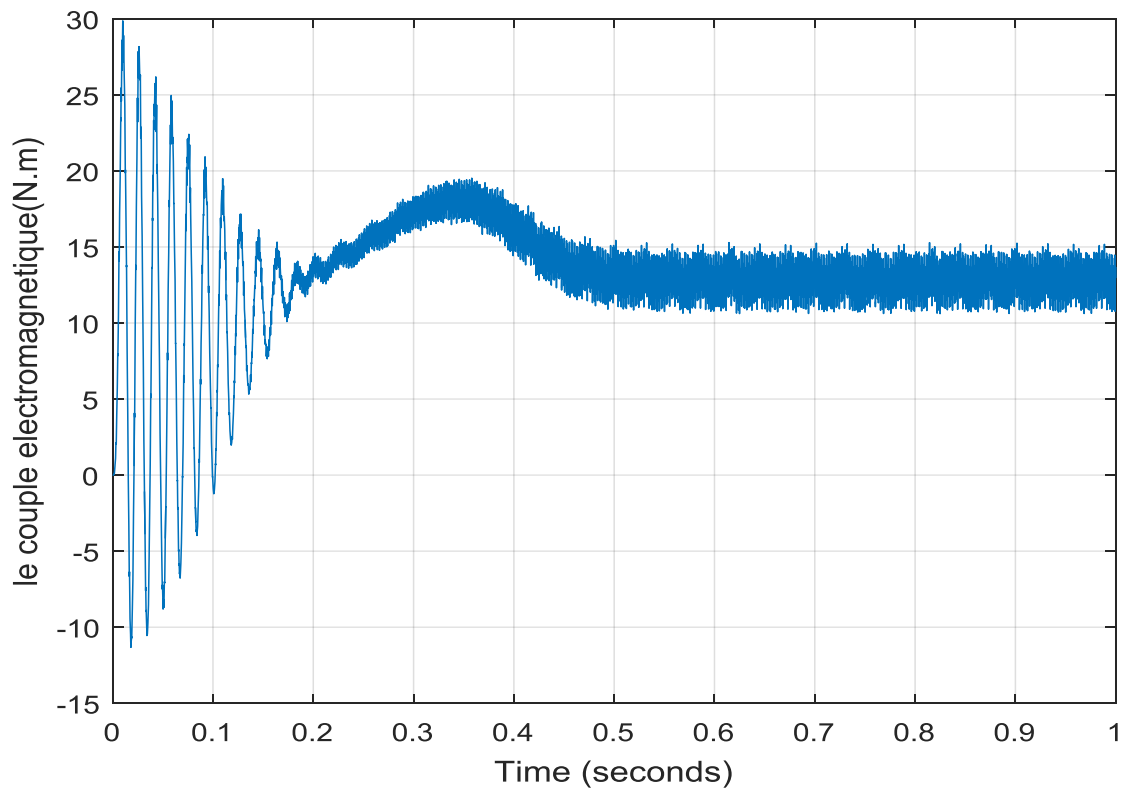


Figure (IV.19) : courbe de variation de couple électromagnétique à $f=60\text{Hz}$.

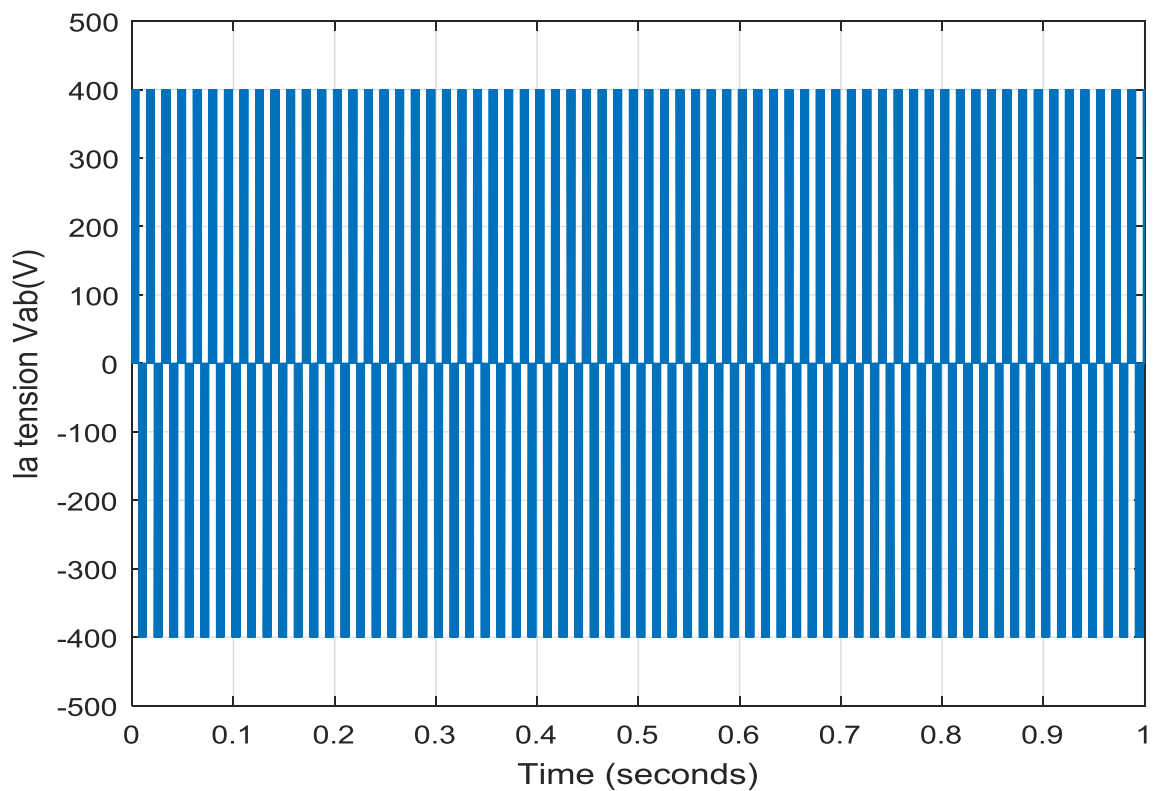


Figure (IV.20) : variation de fréquence de la tension d'alimentation.

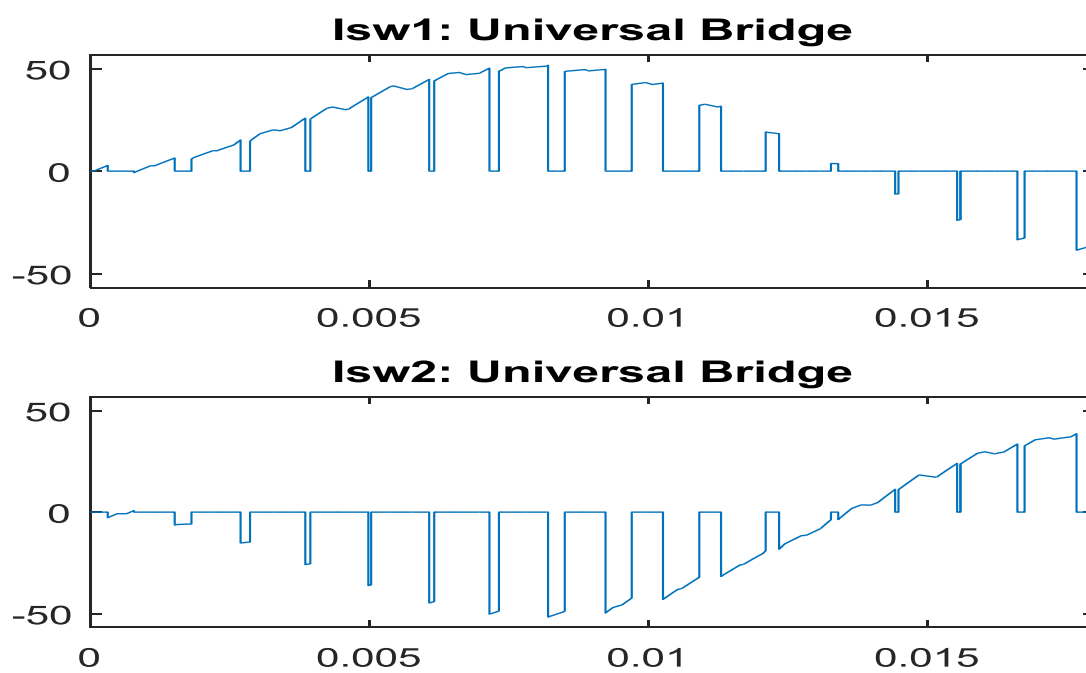


Figure (IV.21) : signaux du courant de l'IGBT.

- $f=50$ Hz

Les figures (IV.22, 23, 24) représente les grandeurs (Vitesse, courant et Couple).

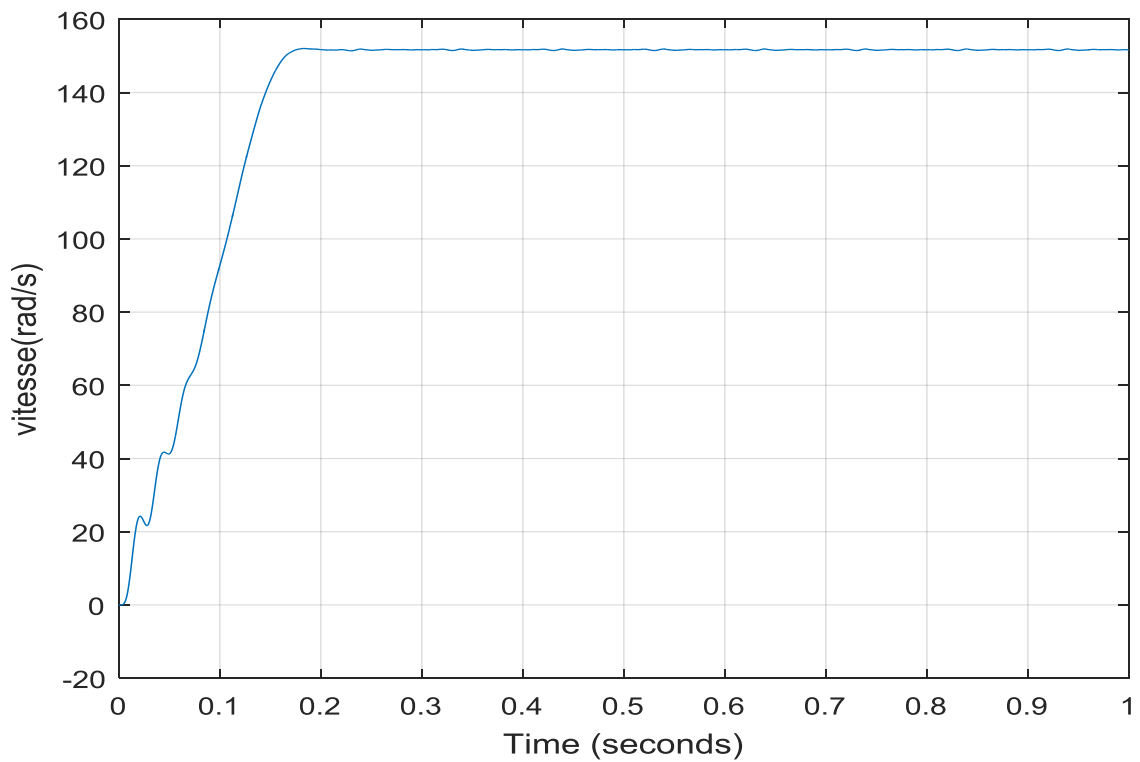


Figure (IV.22) : courbe de variation de vitesse à $f=50$ Hz.

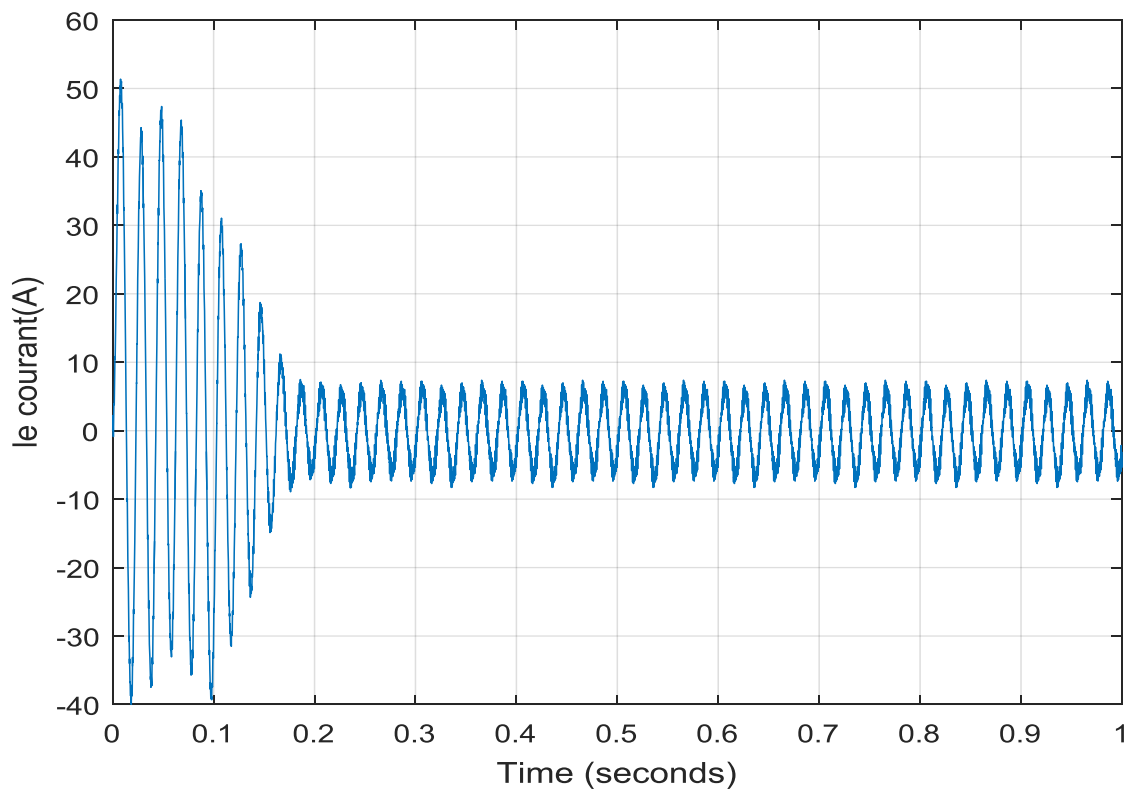


Figure (IV.23) : courbe de variation du courant (I_{as}) à $f=50$ Hz.

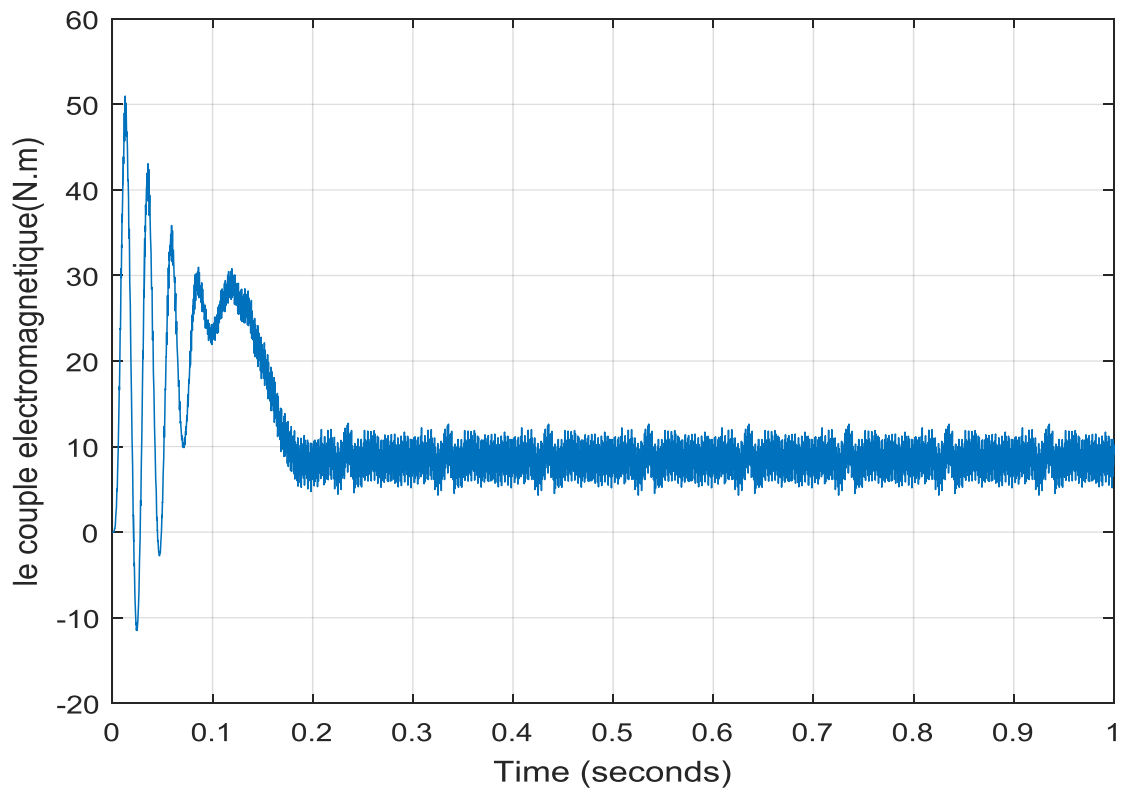


Figure (IV.24) : courbe de variation de couple électromagnétique à $f=50\text{Hz}$.

IV.6.3. Interprétations des Résultats de Simulation :

On remarque que la variation de la fréquence 60Hz à 50Hz varie la vitesse du moteur asynchrone de $n=188\text{ rad/s}$ (1800tr/min) à $n=157\text{ rad/s}$ (1500tr/min).

Nous avons observé également que lors de la variation de la fréquence, les réponses des grandeurs (vitesse, couple, courant statorique et tension), se varié avec la variation de la tension du variateur, ce qui va implique que ces gradeurs (la vitesse, le courant) sont proportionnelle à la variation de la fréquence. et bien que la réponse de couple se comporte en fonction de la vitesse de moteur, le courant suivie toujours le couple ce qui justifie le découplage entre le flux et le couple, donc le courant est l'image du couple.

Comme prévu, les courants dans le commutateur 1 et 2 sont complémentaires. Un courant positif indique un courant circulant dans l'IGBT, alors qu'un courant négatif indique un courant dans la diode antiparallèle.

VI.7. Introduction sur logiciel Isis PROTEUS :

PROTEUS est une suite logicielle permettant la CAO électronique éditée par la société LABCENTER ELECTRONICS. Le but de ISIS c'est de dessiner, simuler des circuits électronique et création des schémas et tracé les courbes.

Dans notre simulation, on va dessiner notre circuit dans l'environnement de ce logiciel et obtenir les résultats.

VI.7.1. Simulation sur logiciel ISIS PROTEUS :

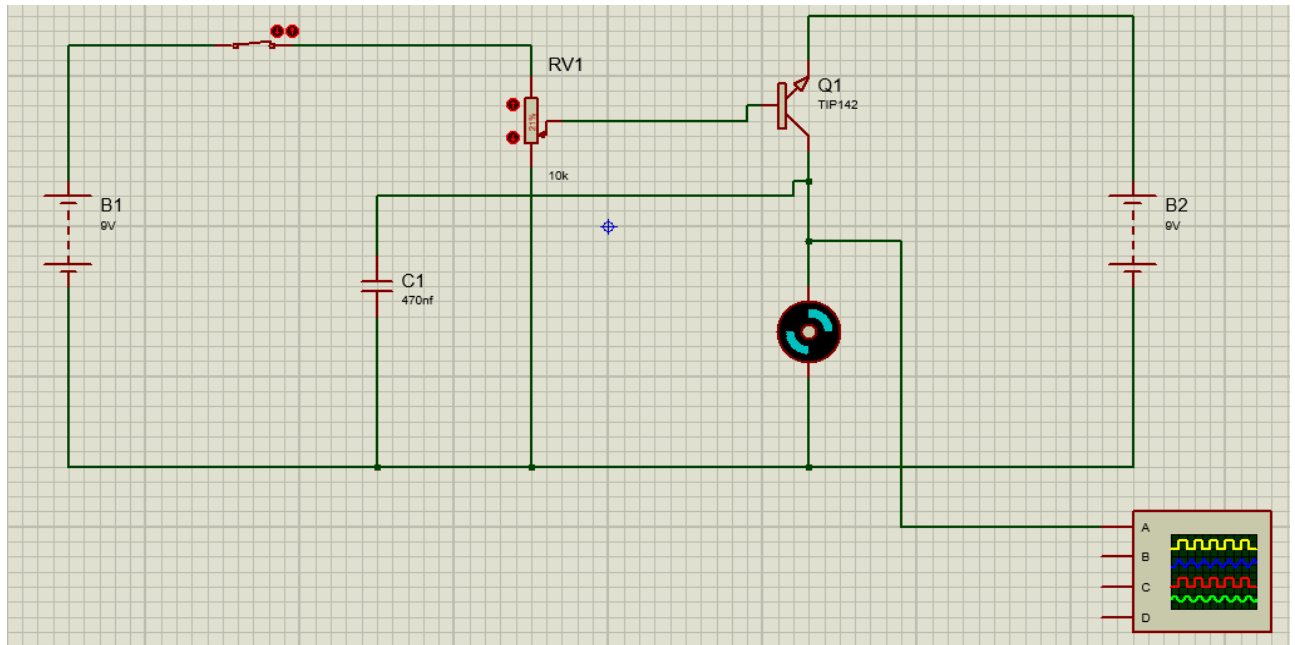


Figure (IV.25): Simulation de variateur de vitesse de MCC sur ISIS PROTEUS.

VI.7.2. Résultats de Simulation :

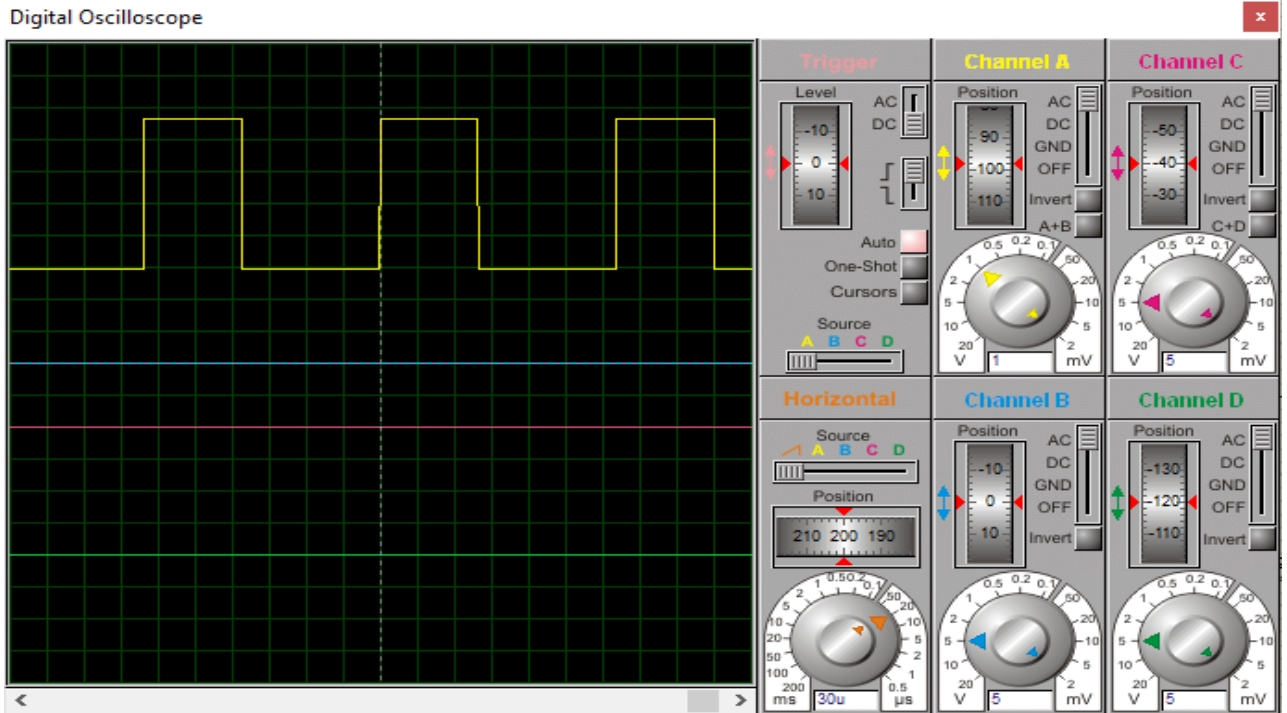


Figure (IV.26): Signal de sortie.

VI.8 La réalisation de variateur de vitesse:

Après l'étude théorique de l'ensemble des étages du montage électronique de notre Réalisation, Nous allons présenter le circuit électrique du montage, les mesures pratiques aux Différents points.

La photo du banc d'essais expérimentaux présenté sur la Figure (IV.28):

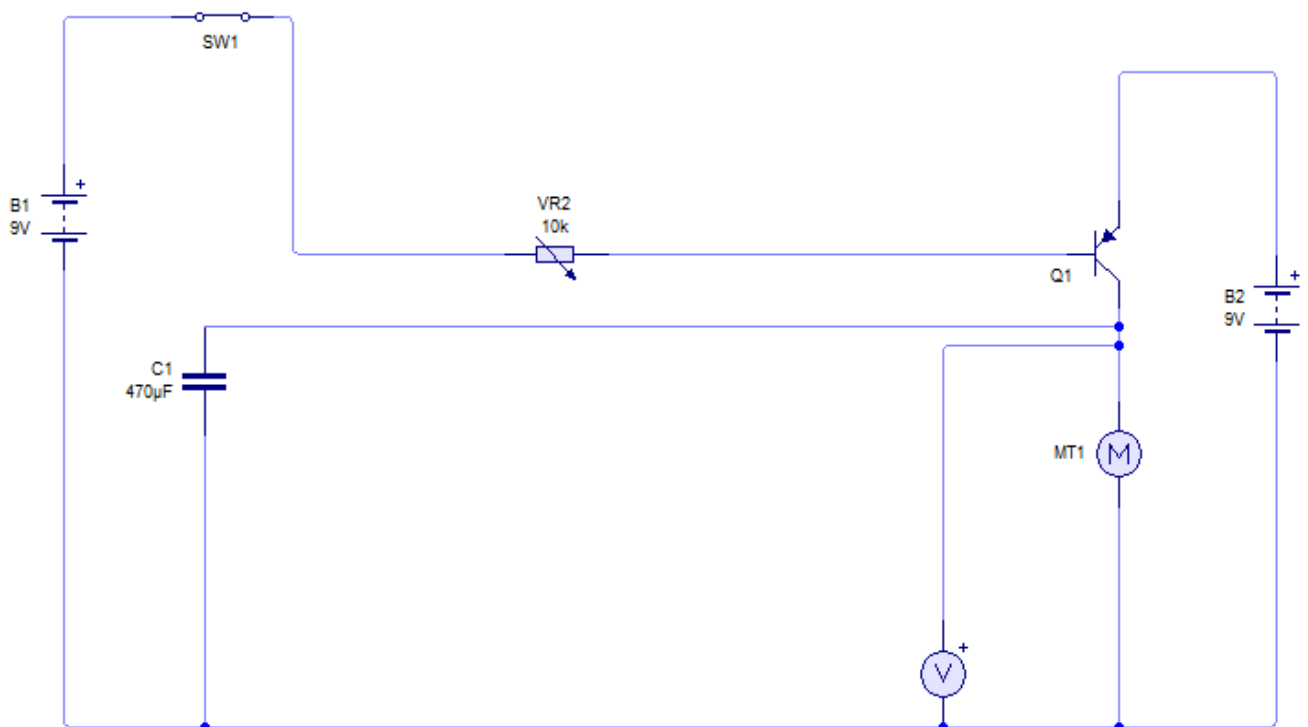


Figure (IV.27): Circuit de réalisation par CIRCUIT WIZARD.

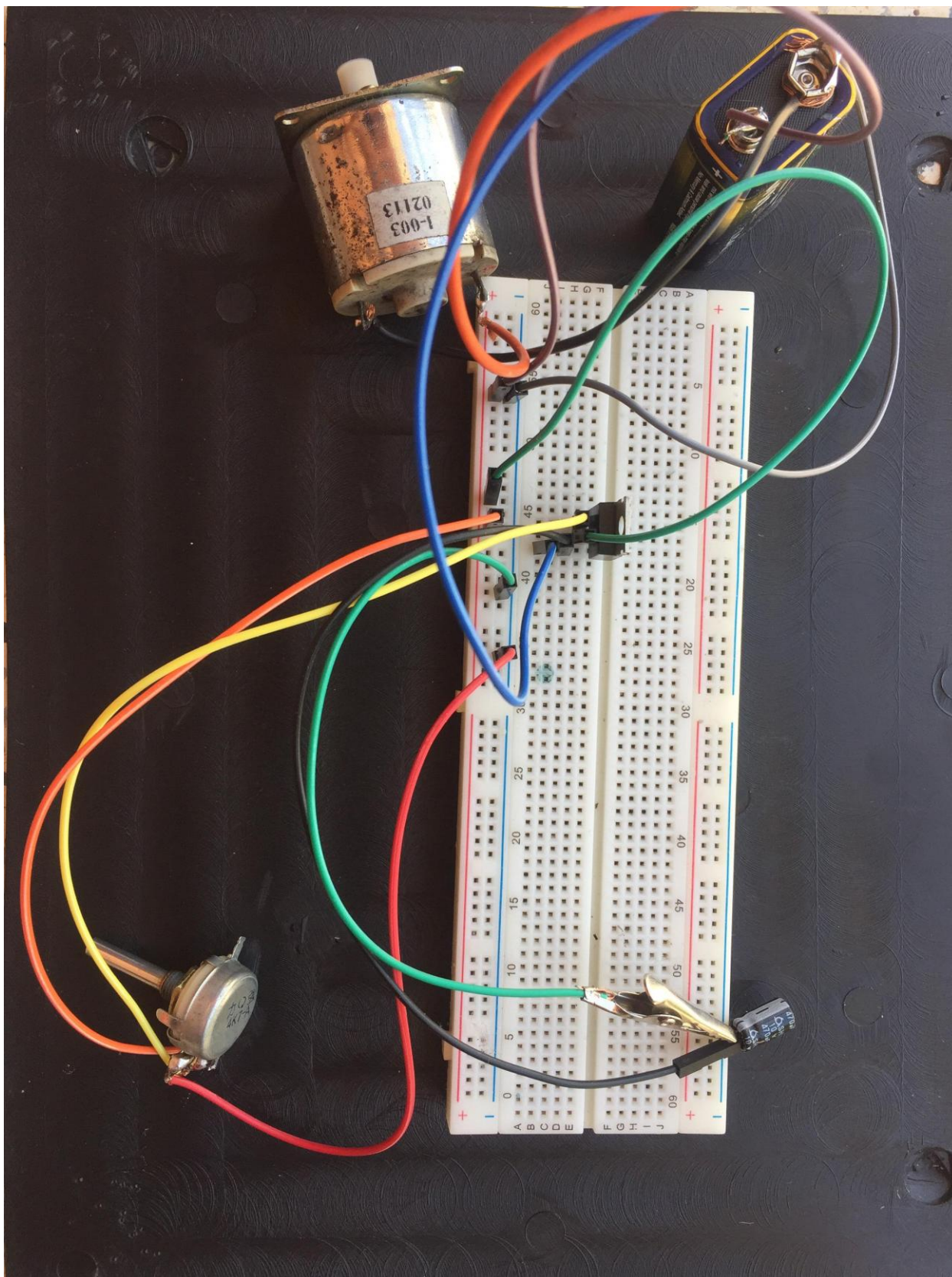


Figure (IV.28):Banc d'essai du variateur de vitesse de MCC.

VI.9. Conclusion :

Nous avons montré dans ce chapitre la variation de vitesse de moteur à courant continu par varier le rapport cyclique et de moteur asynchrone par varier la fréquence de rotation.

Ensuite, on a présentés notre simulation de variateur de vitesse avec le moteur à courant continu et le moteur asynchrone par MATLAB /SIMULINK, avec les résultats.

Par la suite on a fait la réalisation pratique du variateur de vitesse par un moteur à courant continu et sa simulation avec logiciel ISIS PROTEUS et nous montrons les résultats.

Conclusion Générale



Conclusion générale :

Ce travail a été pour nous, le premier pas vers un monde nouveau et complexe, mais très intéressant notre recherche bibliographique dans les domaines de l'électronique, de l'électrotechnique et de l'informatique tel que « les interrupteurs électronique, les hacheurs, les moteurs à courant continu et asynchrone », nous a permis d'enrichir notre connaissance et de développer notre base théorique. Dans ce travail nous avons essayé d'apporter d'utilisé et d'employer les possibilités offertes dans les domaines des machines. Notre objectif principal était donc de fournir à la fois un outil moins couteux et d'une utilité.

Notre travail à présente une étude théorique, simulation et réalisation pratique de variateur de vitesse avec moteur à courant continu basé essentiellement sur un banc d'essai et nous avons organisé ce mémoire en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous avons montré une étude théorique générale sur les moteurs à courant continu et asynchrone avec leurs descriptions, et les structures et les principes de fonctionnement des machines sont bien connus, on a vu que le moteur à courant continu à excitation séparée c'est lui qui s'adapte pour notre projet, il est fonctionné par une vitesse réglable. Et on a montré que le moteur asynchrone dans le cas générale nous ne pouvons pas de faire varie ça vitesse, par contre si on associe ce moteur avec un variateur de vitesse nous pouvons de faire varier et commander ce moteur facilement.

Le deuxième chapitre présente une étude sur les techniques des variateurs et ces différents types et leurs critères de choix, et le principe de fonctionnement de variateur de vitesse et sa constitution et on fait une modélisation sur les moteurs à courant continu et asynchrone et on a parlé sur les quadrants de fonctionnement et sur les différents convertisseurs électroniques.

Dans le troisième chapitre, nous sommes bien expliqués la méthode de largeur d'impulsion (MLI) et leurs avantages et inconvénients, ensuite nous avons présenté et cité les différentes composantes électroniques de puissance pour notre réalisation.

Le quatrième chapitre traite la simulation des moteurs à courant continu et asynchrone avec MATLAB/SIMULINK et discuter les résultats que nous les avons acquises, ensuite on a réalisé un variateur de vitesse associé à un moteur à courant continu et nous avons simulé avec logiciel PROTEUS avec les résultats.

Références et bibliographies

- [1] : SADEG, Mohamed Amine, YAHIATENE, Faysal «Etude Et Réalisation De La Commande Par Retour D'état Adaptive D'un Moteur A Courant Continu » .Université de SIDI BEL ABBES 2016.
- [2] : BOUSSEKSOU, radouane « Modélisation Analytique Des Machines Asynchrone Application Au Diagnostic » Université MENTOURI CONSTANTINE 2007.
- [3] : TIR, Zouheir. « Modélisation et simulation de la machine à courant continu ‘ Mémoire magister en électrotechnique 2008.
- [4] MICHAEL, Pinard, « Commande électronique des moteurs électrique ».édition Dunod. Paris 2004.
- [5] : BAPINO, Bayala, « Machine à Courant Continu ».Edition Ellipse.2010.
- [6] : FRANCIS, Milsant. « Asservissement linéaire ».4^{ème} Edition Eyrolles. Paris 1983.
- [7] : PHILIPPE, Baret. « Machine électrique », théorie de mise en œuvre. Edition Dunod. Paris 2002.
- [8] www.elec.jbd.free.fr, « Machine électromagnétique », Chapitre 13.
- [9] : E.SCHAEFFER. « Diagnostic des machines asynchrones, modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection des défauts. “ Thèse de doctorat” »École centrale de Nantes 1999.
- [10] : J.CARON –J. HAUTIER, «Modélisation et commande de la machine asynchrone» Edition Technip –PARIS 1995.
- [11] Dr. BENDAOUD- Université de SIDI BEL ABBES Machines électriques à courant alternatif 2011.
- [12] : <https://docplayer.fr/20916416-Le-variateur-de-vitesse.html>.
- [13] Cour Communication technique MLC, variateur de vitesse .page 87.
- [14] Mr. ZEMOURI Azzedine, « Etudes expérimentales d'un convertisseur DC/DC contrôler par une commande robuste », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2014.
- [15] <https://fr.calameo.com/read/0046004894787c19ed801>.

[16] : T.ROCACHER « Introduction aux hacheurs approche fonctionnelle.
<https://studylibfr.com/doc/2349826/t---insa-Toulouse>.

[17] : Mr. PERNOT. Cycle 5, « Etude et modélisation des chaines de conversion électromécanique ».page 12.

[18] : MAS - le Moteur Asynchrone.odt, version du 15 avr. 2012.

[19]: QRAICHE. Hafida, https://www.academia.edu/25063636/Cour_De_Redresseur.

[20] : HADJIYASSER GADI, Younes. « Détection de défauts dans le convertisseur À MLI d'une machine asynchrone »Université d'Ouargla 2014.

[21] : AYAD, Amine, « Etude et réalisation d'une commande MLI pilotant un hacheur série», Mémoire de Master, Université ABOU BEKR BELKAID Tlemcen, 2014.

[22] : DEMANE, Oussama. « Simulation et étude expérimentale d'un hacheur dévolteur à base d'un MOSFET » (Métal Oxyde Semi-conducteur Field Effect Transistor) Université de Batna - Master en génie électrique 2011.

[23] AGREBI, youssef & ZORGANI, hichem zayani, note de cours : Commande Electrique des Machines, Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Sfax 2013/2014.

Annexe



Annexe (A)

Le schéma de commande et de puissance de variateur de vitesse

