

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel
Faculté des Sciences et de la Technologie



جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل
كلية العلوم والتكنولوجيا

Département D'Électrotechnique

Mémoire

présenté en vue de l'obtention du diplôme

Master en Electromécanique

Option : Electromécanique

Thème

**Etude et simulation de l'asservissement de vitesse dans l'association
moteur à courant continue-hacheur série**

par :

Mr kedjbour Abdelhamid

et

Mr Boukouicem Zoubir

Travail proposé et dirigé par :

Mr Antar Bourouina

Promotion 2019

Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel
PB 98, Ouled Aissa. 18000. Algérie. Tél : +213 34 50 11 89
<http://www.univ-jijel.dz>

Dédicaces

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail à :

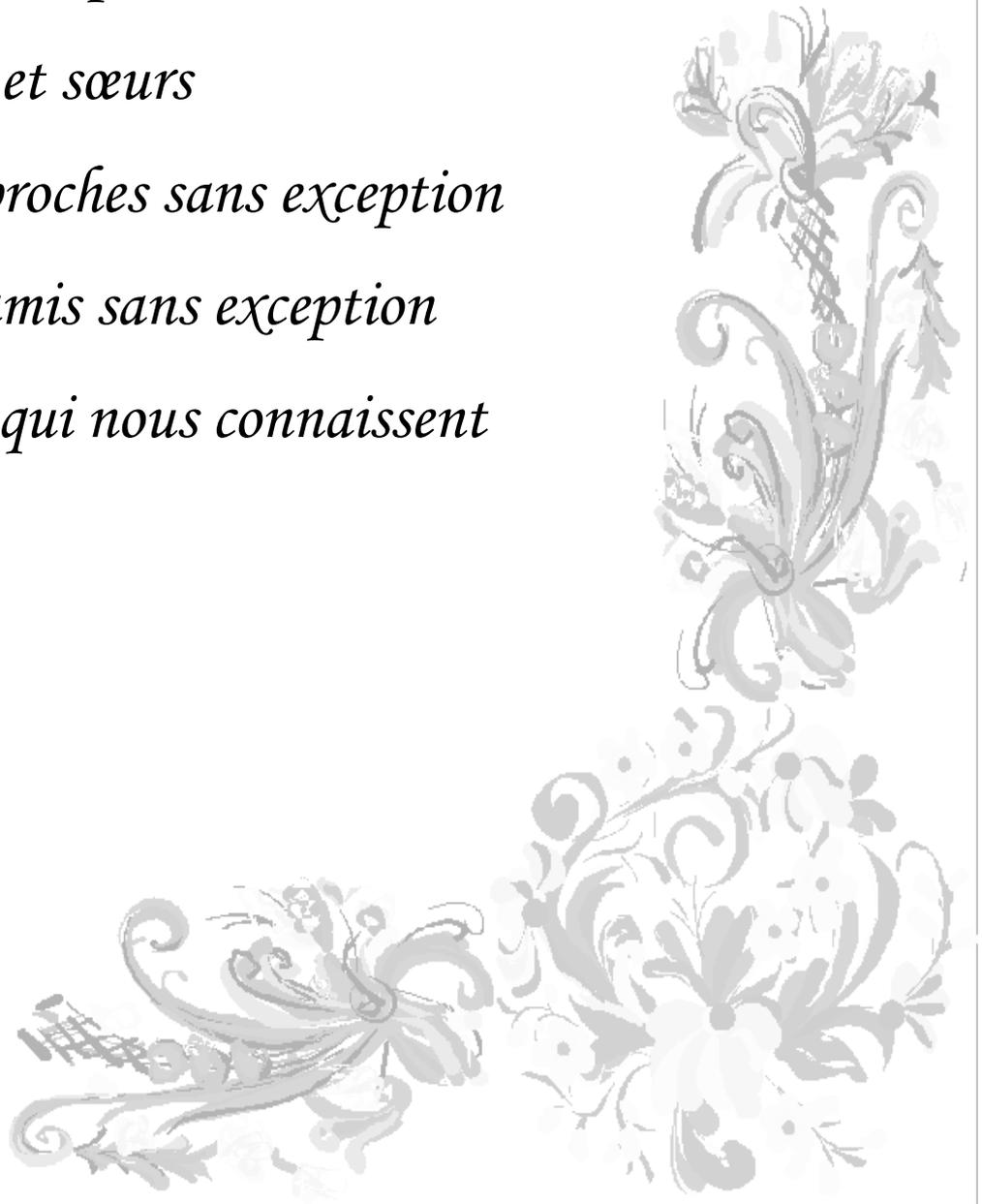
À nos très chers parents

À nos frères et sœurs

À tous nos proches sans exception

À tous nos amis sans exception

À tous ceux qui nous connaissent



Remerciements

Remerciements

Nous remercions ALLAH notre Dieu le tout puissant de nous avoir donné patience, santé et volonté tout au long de nos études.

Nous tenons à remercier tout particulièrement notre promoteur Mr. Antar Bourouina pour ces conseils qui nous ont été précieux ainsi que toutes les suggestions et remarques qu'ils ont formulé tout au long de ce travail.

Nos remerciements s'adressent également à toutes les personnes qui ont collaboré à la réalisation de ce travail.

Nous exprimons toute notre reconnaissance à tous les enseignants de l'ELM qui ont contribué de près ou de loin à notre formation.

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I : Machines à courant continu

Figure (I.01) : Fonctionnement d'une machine à courant continu.....	3
Figure (I.02) : Description de la machine à courant continu	3
Figure (I.03) : Inducteur de la machine à courant continu.....	4
Figure (I.04) : Rotor de la machine à courant continu	4
Figure (I.05) : Collecteur	5
Figure (I.06) : Balai.....	5
Figure (I.07) : Principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu	6
Figure (I.08) : Moteur à aimant permanent.....	7
Figure (I.09) : Différents modes d'excitations.....	8
Figure (I.10) : Schéma du MCC à excitation série	8
Figure (I.11) : Schéma équivalent du MCC à excitation série.....	8
Figure (I.12) : Schéma de MCC à excitation shunt.....	9
Figure (I.13) : Schéma de MCC à excitation compound	10
Figure (I.14) : Schéma équivalent du moteur à excitation séparée.....	11
Figure (I.15) : Bilan de la puissance	12
Figure (I.16) : Réglage de la vitesse par variation de résistance d'induit	14
Figure (I.17) : Caractéristique de réglage par la variation du flux magnétique	14
Figure (I.18) : Caractéristique de réglage par variation de la tension d'induit	15
Figure (I.19) : Grue de chantier naval et des ponts de levage.....	16
Figure (I.20) : Remontées mécaniques	16
Figure (I.21) : Chaîne de tréfilage de câbles	16
Figure (I.22) : Machine d'enroulage pour film plastique transparent.....	16

chapitre II : Convertisseur continue-continue

Figure (II.01) : Diode de puissance.....	18
Figure (II.02) : Symbole diode de puissance	19
Figure (II.03) : Caractéristique de la diode parfaite.....	19
Figure (II.04) : Caractéristique de la diode réelle	20
Figure (II.05) : Symbole du thyristor	20
Figure (II.06) : Différent formes du thyristor	21
Figure (II.07) : Caractéristique du thyristor	21
Figure (II.08) : Évolution du courant I_{AK} à l'amorçage	22
Figure (II.09) : Évolution du courant I_{AK} au blocage.....	22

Liste des figures

Figure (II.10) : Transistor bipolaire (PNP et NPN)	23
Figure (II.11) : Transistor MOSFET à canal N.....	24
Figure (II.12) : Transistor MOSFET à canal P	24
Figure (II.13) : Caractéristique statiques du MOSFET.....	25
Figure (II.14) : Transistor IGBT	25
Figure (II.15) : Caractéristique statiques de l'IGBT	26
Figure (II.16) : Familles des convertisseurs statiques.....	27
Figure (II.17) : Redresseur	27
Figure (II.18) : Onduleur.....	27
Figure (II.19) : Gradateur.....	28
Figure (II.20) : Hacheur	28
Figure (II.21) : Structure d'hacheur série.....	29
Figure (II.22) : Tension de sortie V_s	29
Figure (II.23) : Tension de sortie moyenne V_s	29
Figure (II.24) : Structure d'hacheur série charge L	30
Figure (II.25) : Structure d'hacheur série charge RL.....	30
Figure (II.26) : Régime de conduction continue	32
Figure (II.27) : Régime de conduction continue	33
Figure (II.28) : Structure d'hacheur série charge RLE	33
Figure (II.29) : Passant de courant pour H fermée.....	34
Figure (II.30) : Passant de courant pour H ouvert.....	34
Figure (II.31) : Régime de conduction continue charge RLE.....	36
Figure (II.32) : Régime de conduction discontinu RLE.....	37
Figure (II.33) : Structure Hacheur parallèle.....	37
Figure (II.34) : Chronogramme de tension V	38
Figure (II.35) : Schéma d'Interrupteur réversible en courant	38
Figure (II.36) : Structure d'un hacheur série réversible en courant.	38
Figure (II.37) : Schéma de Principe d'un hacheur réversible en tension.	39
Figure (II.38) : Schéma de principe de l'hacheur réversible en tension et en courant.....	39

chapitre III:Association machine à courant continu-hacheur

Figure (III.01) : Réalisation du signal MLI Intersectée	41
Figure (III.02) : Schéma bloc d'un système avec correcteur (Boucle fermée).....	42
Figure (III.03) : Schéma bloc du correcteur PID parallèle	42
Figure (III.04) : Schéma fonctionnel moteur à courant continu en boucle ouvert.....	43

Liste des figures

Figure (III.05) : Schéma fonctionnel moteur à courant continu en boucle fermée	44
Figure (III.06) : Identification des paramètres de fonction de transfert.....	44
Figure (III.07) : Structure de boucle de courant.....	45
Figure (III.08) : Synoptique de la boucle du courant.....	46
Figure (III.10) : Capteur effet hall	46
Figure (III.11) : Montage de commande MLI.....	47
Figure (III.12) : Signal de porteuse et de référence	47
Figure (III.13) : Signal de commande MLI pour un rapport cyclique $\alpha = 0.5$	47
Figure (III.14) : Montage hacheur série avec charge R.L.....	48
Figure (III.15) : Tension aux bornes du hacheur pour charge R.L	48
Figure (III.16) : Courant aux bornes du hacheur pour charge R.L	49
Figure (III.17) : Tension aux bornes du hacheur pour charge R.L	49
Figure (III.18) : Courant aux bornes du hacheur pour charge R.L	49
Figure (III.19) : Tension aux bornes du hacheur pour charge R.L	50
Figure (III.20) : Courant aux bornes du hacheur pour charge R.L	50
Figure (III.21) : Tension aux bornes du hacheur pour charge R.L	51
Figure (III.22) : Courant aux bornes du hacheur pour charge R.L	51
Figure (III.23) : Tension aux bornes du hacheur pour charge RL	52
Figure (III.24) : Courant aux bornes du hacheur pour charge RL	52
Figure (III.25) : Montage hacheur série avec charge RLE	53
Figure (III.26) : Tension aux bornes du hacheur pour charge RLE.....	53
Figure (III.27) : Courant aux bornes du hacheur pour charge RLE.....	54
Figure (III.28) : Tension aux bornes du hacheur pour charge RLE.....	54
Figure (III.29) : Courant aux bornes du hacheur pour charge RLE.....	55
Figure (III.30) : Hacheur série associer à un moteur à courant continu.....	55
Figure (III.31) : Tension de sortie avec un rapport cyclique de 50%	56
Figure (III.32) : Vitesse de moteur à vide avec un rapport cyclique de 50 %	56
Figure (III.33) : Courant de moteur à vide avec un rapport cyclique de 50 %	56
Figure (III.34) : Le couple de moteur à vide avec un rapport cyclique de 50 %	57
Figure (III.35) : Hacheur série associer à un moteur à courant continu en charge	57
Figure (III.36) : La vitesse du moteur en charge avec un rapport cyclique de 50 %	58
Figure (III.37) : Courant du moteur en charge avec un rapport cyclique de 50 %	58
Figure (III.38) : Couple du moteur en charge avec un rapport cyclique de 50 %.....	59
Figure (III.39) : Schéma fonctionnel du système par correcteur	59
Figure (III.40) : Modélisation sous Matlab de l'effet proportionnel sur la vitesse.....	59

Liste des figures

Figure (III.41) : Modélisation sous Matlab de l'effet intégral du correcteur PI sur la vitesse.....	60
Figure (III.42) : Modélisation sous Matlab de l'effet dérivé du correcteur PID sur la vitesse	60
Figure (III.43) : Schéma de simulation de l'association MCC-Convertisseur en introduisant la boucle de régulation de vitesse	61
Figure (III.44) : Vitesse de moteur avec régulateur de vitesse	61
Figure (III.45) : Courant de moteur avec régulateur de vitesse	62
Figure (III.46) : Couple de moteur avec régulateur de vitesse.....	62
Figure (III.47) : Schéma de simulation de l'association inductance de lissage au MCC avec la régulation de vitesse.....	63
Figure (III.48) : Vitesse de moteur avec application d'un couple de charge à l'instant 0.8S.....	63
Figure (III.49) : Courant de moteur avec application d'un couple de charge à l'instant 0.8S.....	64
Figure (III.50) : Couple de moteur avec application d'un couple de charge à l'instant 0.8S	64
Figure (III.51) : Association MCC en boucle de régulation de vitesse et de courant.....	64
Figure (III.52) : Vitesse de moteur avec application d'un couple de charge à l'instant 0.8S.....	65
Figure (III.53) : Courant de moteur avec application d'un couple de charge à l'instant 0.8S.....	65
Figure (III.54) : Couple de moteur avec application d'un couple de charge à l'instant 0.8S	66

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre I : Machines à courant continu

Tableau (I.01) : Domaine d'application et caractéristiques du MCC à excitation série	9
Tableau (I.02) : Domaine d'application du MCC à excitation shunt.....	10
Tableau (I.03) : Domaine d'application du MCC à excitation compound.....	10
Tableau (I.04) : Domaine d'application du MCC à excitation séparée	12
Tableau (I.05) : Différents Applications des machines à courant continu.....	16

Chapitre III : Association machine à courant continu-hacheur série

Tableau (III.01) : Récapitulatif des paramètres PID	43
Tableau (III.02) : Paramètre du moteur à courant continu.....	44
Tableau (III.03) : Paramètres du régulateur par la méthode courbe de réaction de Ziegler-Nichols.....	45

Nomenclature

Nomenclature

Chapitre I : machines à courant continu

F : Force électromagnétique(N)
B : Champ magnétique(T)
L : Longueur de tige(cm)
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(tr/s)
 Φ : Flux sous un pôle de la machine(webers)
E : Force contre électromotrice(v)
K :Cst de la machine
 Ω : Vitesse angulaire(rad/s)
 R_t : Résistance totale du moteur(Ω)
R : Résistance d'induit(Ω)
r : Résistance d'inducteur(Ω)
 R_{add} : Résistance de rhéostat(Ω)
C : Couple électromagnétique (N.m)

Chapitre II : Convertisseurs continu-continu

V_{AK} : Tension aux borne de diode(v)
 I_{AK} : Courant aux borne de diode(A)
 V_{DS} : Tension aux borne de thyristor(v)
 V_K : Tension aux borne de transistor IGBT(v)
 I_K : Courant aux borne de transistor IGBT(A)
B : Base
E : Emetteur
C : Collecteur
 K_1, K_2, D, H et S : Interrupteur électronique
 i_e : Courant de source (A)
 i_s, i_c : Courant de sortie(A)
 v_s : Tension de sortie(v)
 U_0, U_e : Tension de source(v)

Nomenclature

a : Rapport cyclique

T : Période(s)

V_s : Tension moyenne(v)

I_{\min} : Courant minimal(A)

I_{\max} : Courant maximal(A)

τ : Cst de temps(s)

Chapitre III : Association machine Courant Continu-Hacheur série

ε : Erreur

Θ : Temps de retard(s)



Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Machines à courant continu	
I.1. Introduction.....	2
I.2. Constitution.....	3
I.2.1. Inducteur	4
I.2.1.1. Pôles principaux	4
I.2.1.2. Pôles auxiliaires.....	4
I.2.2. Induit (Le rotor).	4
I.2.3. Collecteur	5
I.2.4. Balai	5
I.3. Principe de fonctionnement en moteur	6
I.4. Force contre électromotrice.....	6
I.5. Différents types de moteurs selon l'inducteur	7
I.5.1. Moteurs à inducteur à aimant permanent.....	7
I.5.2. Moteurs à inducteur bobiné.....	7
I.5.2.1. Différents modes d'excitation d'un moteur à courant continu.....	7
I.6. Bilan de la puissance.....	12
I.7. Rendement.	13
I.8. Variation de vitesse	13
I.8.1. Différents modes de réglage de la vitesse d'un moteur à courant continu	13
I.8.1.1. Réglage rhéostatique	13
I.8.1.2. Réglage par flux	14
I.8.1.3. Par variation de la tension d'induit.....	15
I.8.1.4. Par action sur le courant d'excitation	15
I.9. Applications industrielles des machines à courant continu	16
I.10. Avantages et les inconvénients.....	17
Conclusion.....	17

Chapitre II : Convertisseurs continue-continue

II.1. Introduction.....	18
II.2. Quelques interrupteurs en électronique de puissance.....	18
II.2.1. Diode.....	18
II.2.1.1. Principe de fonctionnement (composant parfait).....	19
II.2.1.2. Composant réel et ses imperfections.....	19

Sommaire

II.2.2. Thyristor	20
II .2.2.1. Principe de fonctionnement	21
II.2.3. Transistor	23
II.2.3.1. Transistor bipolaire	23
II.2.3.2. Transistors MOSFET	23
II.2.3.3. Transistors IGBT.....	25
II.3. Convertisseurs statiques	26
II.3.1. Redresseurs	27
II.3.2. Onduleurs.....	27
II.3.3. Gradateurs.....	28
II.3.4. Hacheurs	28
II.4. Types des hacheurs.....	28
II.4.1. Hacheur non réversible	28
II.4.1.1. Hacheur série.....	28
II.4.1.2. Hacheur parallèle	37
II.4.2 Hacheurs réversibles	38
II.4.2.1. Hacheur série réversible en courant	38
II.4.2.2. Hacheur réversible en tension	39
II.4.2.3. Hacheur réversible en tension et en courant	39
Conclusion	40

Chapitre III : Association machine à courant continu- hacheur série

III.1. Introduction	41
III.2. Partie théorique	41
III.2.1. Commande MLI Intersectée	41
III.2.2. Régulation PID en de vitesse.....	41
III.2.2.1. Réglage des paramètres	43
III.2.3. Etude de la boucle en courant (régulation du courant).....	45
III.2.3.1. Mesure du courant	46
III.3. Partie de simulation	46
III.3.1. Simulation de la commande MLI Intersectée.....	47
III.3.2. Simulation d'un hacheur série	48
III.3.2.1. Hacheur série avec charge R.L	48
III.3.2.2 Hacheur série avec charge R.L.E.....	53
III.3.2.3 Hacheur série-MCC à vide	55

Sommaire

III.3.2.4. Hacheur série-MCC en charge.....	57
III.3.3. Régulateur PID parallèle	59
III.3.4. Association MCC avec la boucle de régulation de vitesse.....	61
III.3.5. Effet de l'association d'une inductance de lissage en série avec le MCC	63
III.3.6. Effet de la boucle de régulation de courant sur le courant	64
Conclusion	66
Conclusion générale	67

Introduction générale

Introduction générale

L'industrie au sens le plus large du terme, et les transports ont de plus en plus besoin de système à vitesse variable douée de souplesse et de précision. Pour cette raison Les machines électriques sont utilisées dans un très grand nombre de procédés industriels notamment la fabrication, la traction électrique (trains, tramways, véhicules électriques) et la génération d'énergie. En fonction de ces applications, les moteurs à courant continu (MCC) sont de divers types et les exigences sont déverses. Par conséquent, ces moteurs doivent répondre de manière efficace à des variations de consignes (vitesse, position, couple) et cela, dans une large gamme de variations du point de fonctionnement.

Le réglage de la vitesse de ces moteurs demeure cependant difficile quand on dispose d'une tension fixe. C'est pourquoi on est amené à les alimenter par des variateurs de tension (comme les convertisseurs statiques).

Actuellement ces variateurs de vitesse (comme l'hacheur série) sont des dispositifs à interrupteur électroniques (des composants à semi-conducteur comme les diodes et les IGBT).

L'objectif de notre travail est l'étude de l'association d'un hacheur série avec un moteur à courant continu et d'implémenter une commande MLI avec des régulateur PID pour asservir la vitesse du moteur à courant continu et voir l'influence des régulateurs est des perturbations sur les grandeurs du moteur (vitesse, courant, couple...). La modélisation de la commande et du système est simulé sous l'environnement *MATLAB*.

Pour cela Nous avons décomposé ce travail en trois chapitres.

Dans le premier chapitre on a présenté la structure et les types des machines à courant continu et leur principe de fonctionnement.

Le deuxième chapitre est consacré la représentation de quelques interrupteurs en électronique de puissance et leur mode de fonctionnement, ainsi la représentation de quelques convertisseurs très utilisé comme variateur de vitesse avec une étude plus détaillée pour les hacheurs série.

Dans le dernier chapitre on a présenté l'association du moteur au hacheur série, ainsi que le principe de la commande MLI et la régulation de la vitesse par des régulateurs classiques de type PI, PID sont analysées. Ou on a simulé l'ensemble en utilisant *MATLAB*

Enfin, nous terminant par une conclusion générale qui présente l'intérêt de notre travail.

Chapitre I

Machines à courant
continu

I.1. Introduction

Les moteurs à courant continu sont très utilisés dans les systèmes automatiques qui nécessitent une variation précise de la vitesse de rotation.

En 1870 un Bricoleur chez l'orfèvre Christofle, Zénobe Gramme (1826-1901), après avoir observé les faiblesses des machines Alliance de son employeur, met au point la première dynamo Industrielle. En 1871, il fonde la Société des machines magnétoélectriques Gramme avec son ami Hippolyte Fontaine [1].

En 1879 Ernst Werner Siemens développe un premier tramway sur rail à Berlin (une locomotive, 3 petits wagons chacun chargés de 6 personnes).

En 1899 La voiture électrique du belge Jenatzy décroche le record du monde de vitesse et atteint les 105,9 km/h à Achères le 6 mai 1899. Son nom restera également associé à la conception de plusieurs voitures électriques ou mixtes.

Au cours du XXe siècle, la machine à courant continu est restée incontournable dans de nombreuses applications :

- La traction qui demande un fort couple à très basse vitesse.
- Le domaine de la vitesse variable.
- Les systèmes embarqués alimentés par batteries.

Actuellement, la machine à courant continu tend à être remplacée par des machines alternatives, (elle a quasiment disparu des entraînements de forte puissance, sauf en remplacement dans une installation existante), mais elle reste présente dans les petites puissances et la robotique : elle est par exemple très utilisée en automobile, pour des actionneurs enfouis (climatisation, sièges, rétroviseurs...).

Les machines à courant continu sont des convertisseurs électromécaniques d'énergie : Soit elles convertissent l'énergie électrique absorbée en énergie mécanique. On dit alors qu'ils ont un fonctionnement en moteur. Soit-elle convertis l'énergie mécanique reçue en énergie électrique. On dit alors qu'ils ont un fonctionnement en générateur [2].

Dans ce chapitre, On va présenter la constitution de la machine à courant continu et son principe de fonctionnement. Ainsi les différents types des moteurs à courant continu. Ensuite nous donnerons leurs avantages et inconvénients et le domaine d'utilisation.

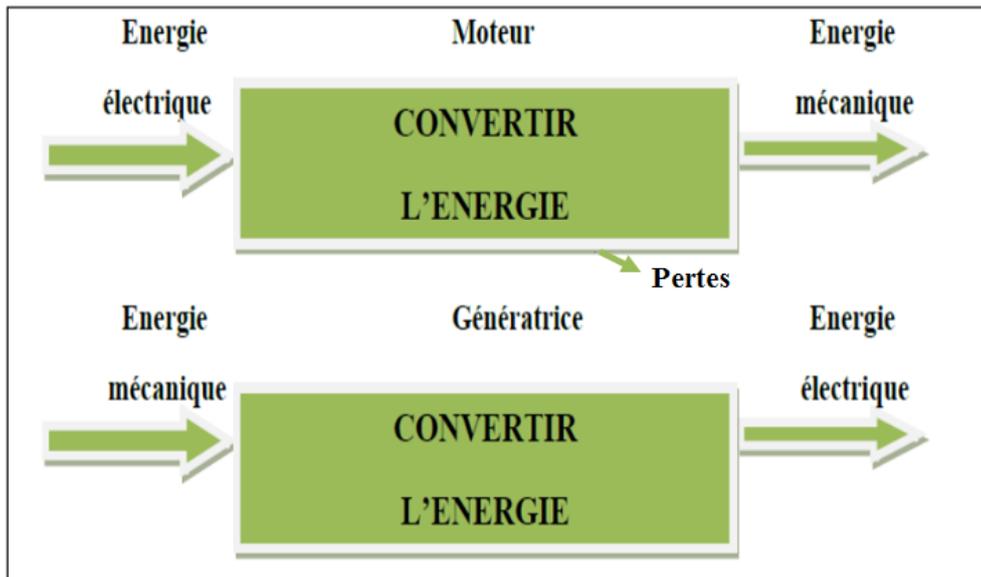


Figure (I.01) : Fonctionnement d'une machine à courant continu

I.2. Constitution

La machine à courant continu est constituée de trois parties principales :

- L'inducteur.
- L'induit.
- Le dispositif collecteur / balais.

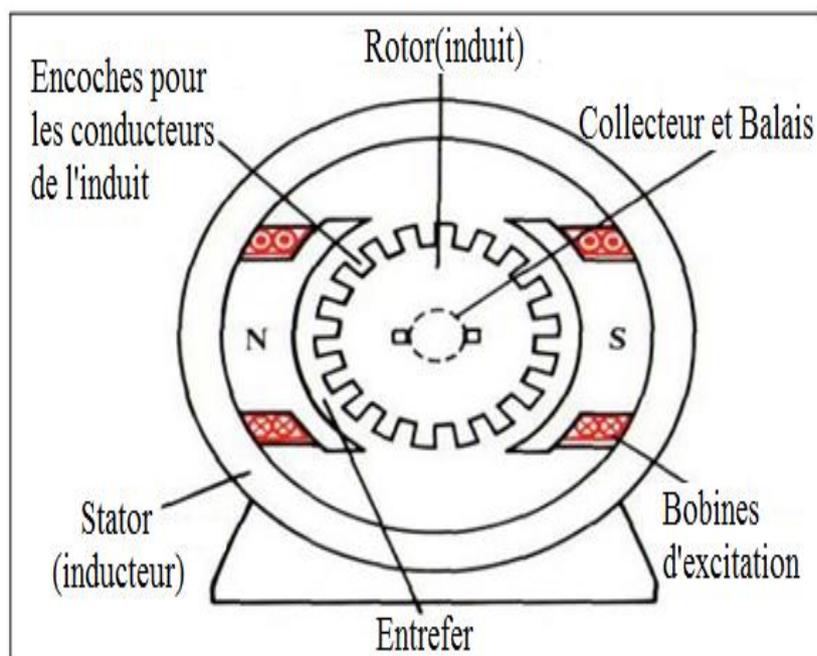


Figure (I.02) : Description de la machine à courant continu

I.2.1. Inducteur

L'inducteur est la partie fixe du moteur, il est constitué :

I.2.1.1. Pôles principaux

Destinés à créer le flux magnétique principal, qui peuvent être constitués d'aimants permanents ou de pièces polaires associées des enroulements inducteurs par un courant continu [3].

I.2.1.2. Pôles auxiliaires

Ils sont placés entre les pôles principaux selon les axes inter polaires dits axes neutres, le flux qu'ils produisent améliore la commutation. Ils réduisent les étincelles aux balais, ces étincelles étant produites par le renversement du sens de courant dans les sections court circuitées par les balais. L'enroulement de ces pôles est en série avec l'enroulement d'induit [4].

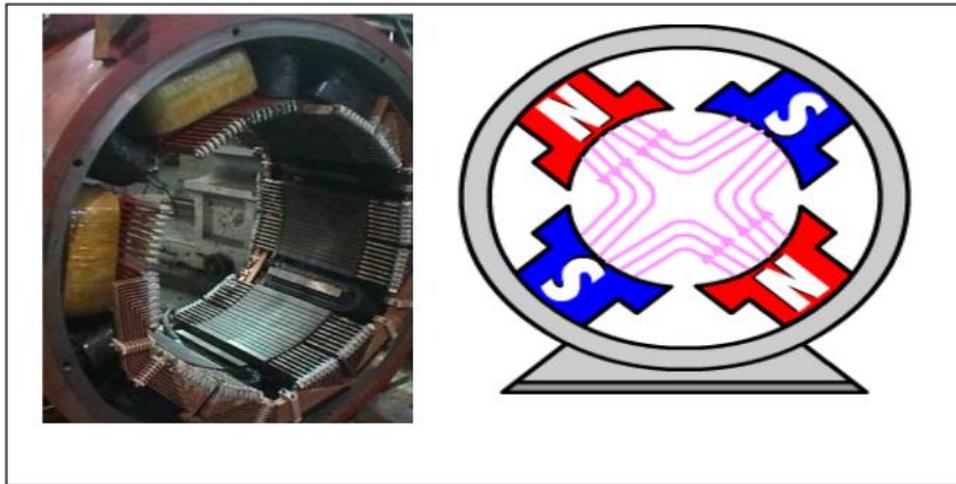


Figure (I.03) : Inducteur de la machine à courant continu

I.2.2. Induit (Le rotor)

Le rotor est constitué d'encoches dans les quelles est enroulé un bobinage de (N) conducteurs alimentés en courant continu (I) via le collecteur [2].

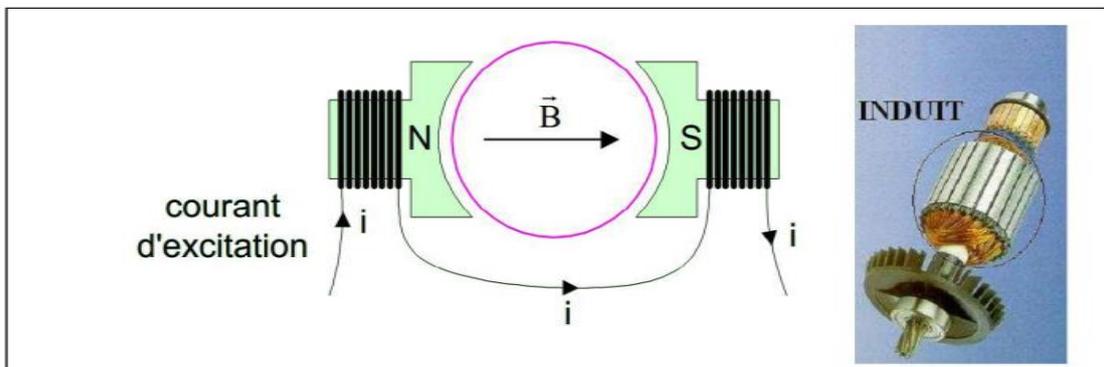


Figure (I.04) : Rotor de la machine à courant continu

I.2.3. Collecteur

Le collecteur est le constituant critique des machines à courant continu. C'est un ensemble de lames de cuivre, isolées latéralement les unes des autres et disposées suivant un cylindre, en bout de rotor. Ces lames sont réunies aux conducteurs de l'induit. Le collecteur a pour fonction d'assurer la commutation du courant d'alimentation dans les conducteurs de l'induit [5].

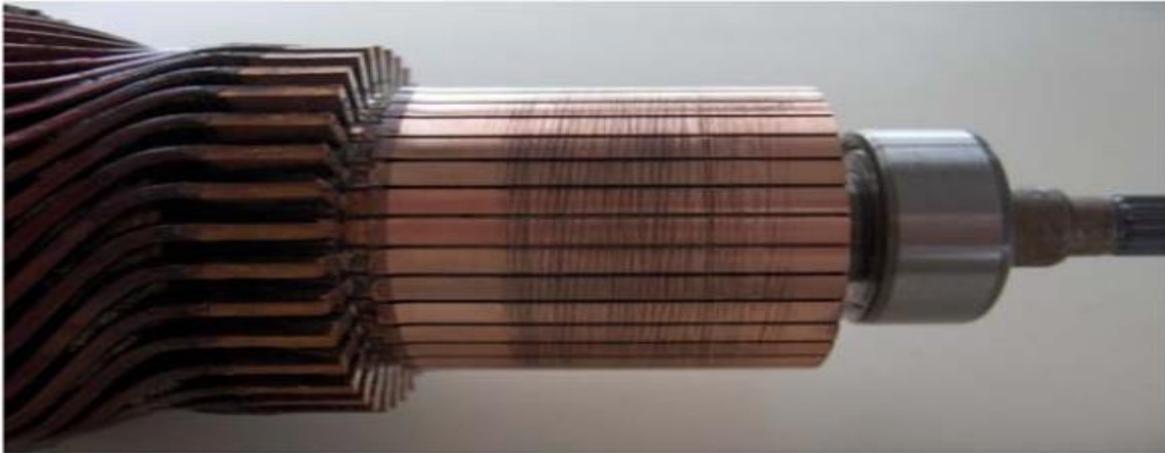


Figure (I.05) : Collecteur

I.2.4. Balai

Fixés sur la carcasse par le biais de portes balais, ils sont en carbone ou en graphite permettent l'alimentation de l'induit (partie en rotation) grâce à un contact glissant entre les lames du collecteur reliées aux conducteurs de l'induit et le circuit électrique extérieur. Ils sont constitués de petits cubes ayant une surface de contact de quelques mm^2 à quelques cm^2 , en graphite pur ou en alliage, qui doivent résister à des conditions d'utilisation sévères (courants élevés, températures élevées, frottements, arc, atmosphères chargées ou très sèches).

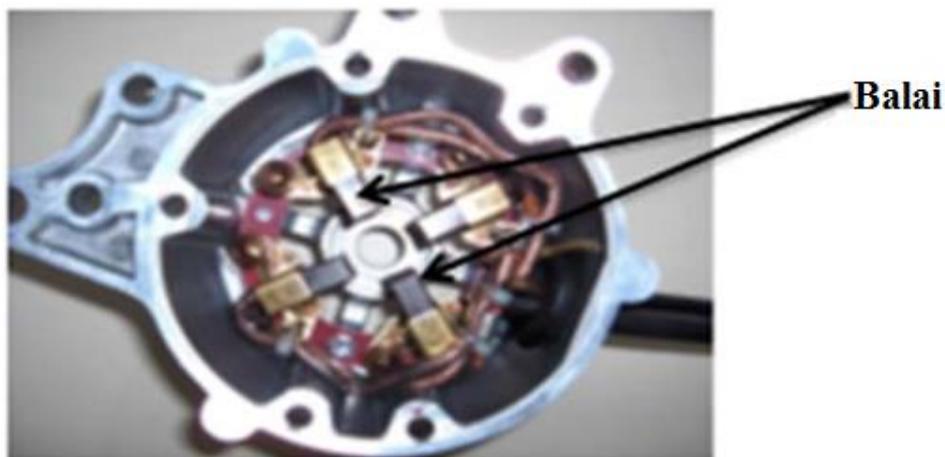


Figure (I.06) : Balai

I.3. Principe de fonctionnement en moteur

Le fonctionnement du moteur à courant continu est basé sur le principe des forces de Laplace :

Un conducteur de longueur (L), placé dans un champ magnétique et parcouru par un courant, est soumis à une force électromagnétique.

Le champ créé par l'inducteur agit sur les conducteurs de l'induit : Chacun des (N) conducteurs de longueur (L) placé dans le champ (B) et parcouru par un courant (I) est le siège d'une force électromagnétique perpendiculaire au conducteur :

$$F = B \cdot I \cdot L \cdot \sin \alpha \quad (\text{I.01})$$

Ces forces de Laplace exercent un couple proportionnel à l'intensité (I) et au flux (Φ) sur le rotor. Le moteur se met à tourner à une vitesse proportionnelle à la tension d'alimentation (V) et, inversement proportionnelle au flux (Φ).

Au passage de tout conducteur de l'induit sur la ligne neutre, le courant qui le traverse change de sens grâce au collecteur. Le moteur conserve le même sens de rotation.

Pour inverser le sens de rotation du moteur, il convient d'inverser le sens du champ produit par l'inducteur par rapport au sens du courant circulant dans l'induit :

- Soit on inverse la polarité de la tension d'alimentation de l'induit.
- Soit on inverse la polarité d'alimentation du circuit d'excitation [2].

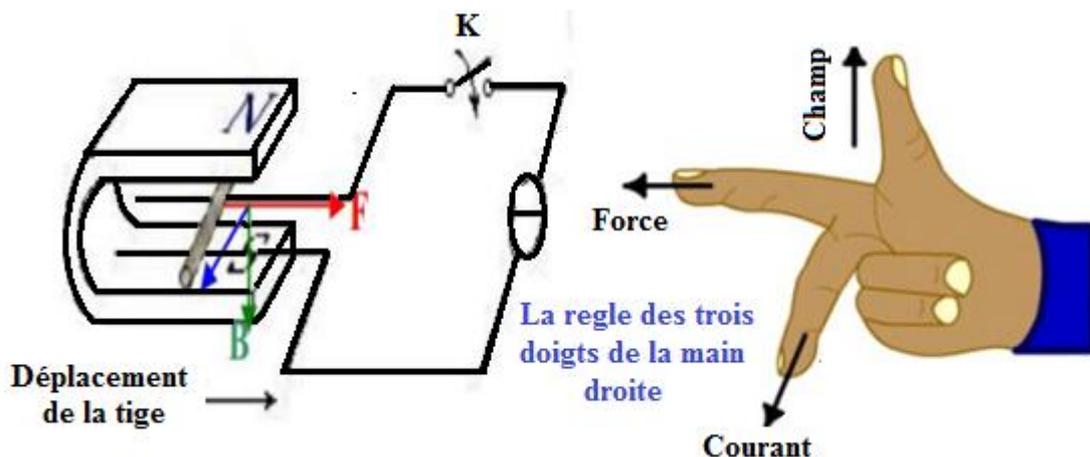


Figure (I.07) : Principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu

I.4. Force contre électromotrice

La force contre électromotrice f.c.e.m (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.

$$E = \frac{P}{a} N \cdot n \cdot \Phi \quad (\text{I.02})$$

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 tr/s).

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

Finalement :

$$E = K \cdot \Omega \cdot \Phi \quad (\text{I.03})$$

Avec :

$$K = \frac{P}{2\pi a} N \quad (\text{I.04})$$

I.5. Différents types de moteurs selon l'inducteur

On distingue deux types de moteurs à courant continu :

I.5.1. 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 à l'utilisation [3].

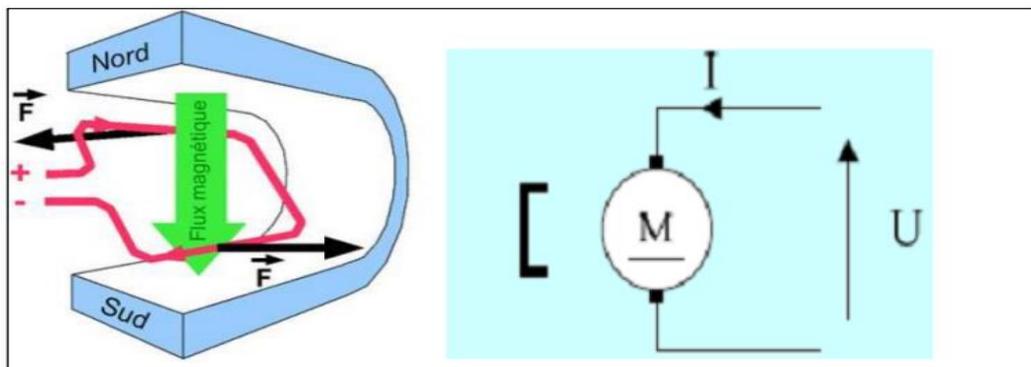


Figure (I.08) : Moteur à aimant permanent

I.5.2. Moteurs à inducteur bobiné

I.5.2.1. Différents modes d'excitation d'un moteur à courant continu

L'inducteur d'un moteur à courant continu peut être branché de diverses façons. La machine est à excitation séparée (ou indépendante) quand l'inducteur et l'induit sont reliés à des sources différentes.

La machine est à excitation liée, lorsque l'inducteur et l'induit sont alimentés à partir de la même source. Quatre possibilités existent alors [6].

- L'excitation parallèle (ou shunt).
- L'excitation série.
- L'excitation composée.
- L'excitation séparée.

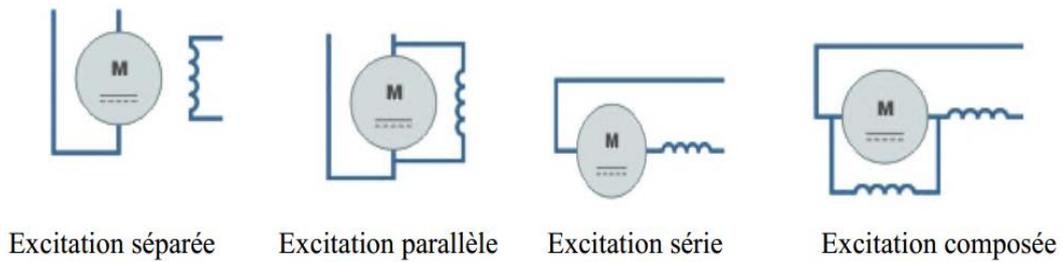


Figure (I.09) : Différents modes d'excitations

➤ **Moteur à excitation série**

Pour le moteur à courant continu à excitation série, l'induit et l'inducteur sont branchés en série, ce qui donne le schéma suivant Figure (I.10), et donc le schéma équivalent suivant (modèle de Thévenin) Figure (I.11).

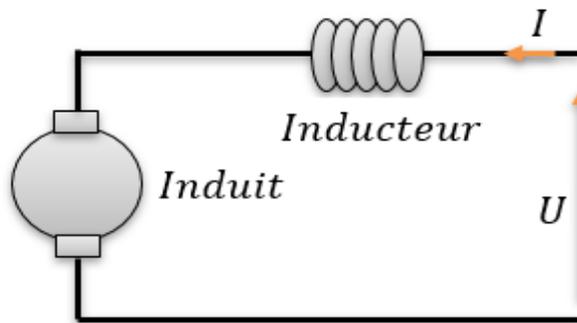


Figure (I.10) : Schéma du MCC à excitation série

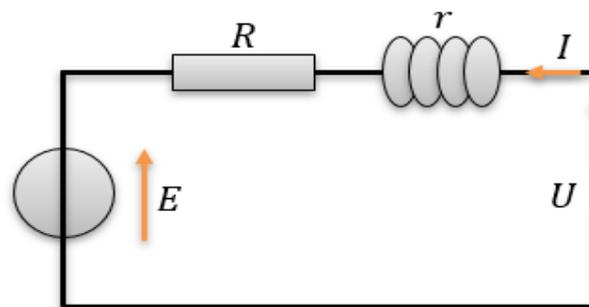


Figure (I.11) : Schéma équivalent du MCC à excitation série

R_t est la résistance totale du moteur, elle est égale à la somme des résistances d'induit R et d'inducteur r :

$$R_t = R + r \tag{I.05}$$

R_t Se mesure en mesurant r et R indépendamment l'une de l'autre.

Remarque

Le moteur à excitation série ne doit jamais fonctionner à vide car si

$$I \rightarrow 0, \Omega \rightarrow \infty$$

La machine risque l'emballement.

➤ **Domaine d'application et Caractéristiques**

Caractéristiques	Domaine d'application
<ul style="list-style-type: none"> -L'inducteur connecté en série avec l'induit. - Le moteur série est un autorégulateurs de puissance. - possède un fort couple de démarrage mais risque l'emballement à vide. - Le couple du moteur série ne dépend pas de la tension d'alimentation. -Le couple résistant croit rapidement avec la vitesse. - La vitesse décroît quand la charge augmente. -Supporte bien les surcharges. 	<ul style="list-style-type: none"> -engins de levage (grues, palans, ponts roulants). -ventilateurs. - pompes centrifuges. - traction.

Tableau (I.01) : Domaine d'application et caractéristiques du MCC à excitation série [5]

➤ **Moteur à excitation shunt**

L'enroulement d'excitation shunt est connecté en parallèle sur l'alimentation du moteur, il possède les mêmes propriétés que le moteur à excitation séparée du fait que, dans les deux cas l'inducteur constitue un circuit extérieur à celui de l'induit. Le circuit électrique est représenté par la Figure (I.12) [6].

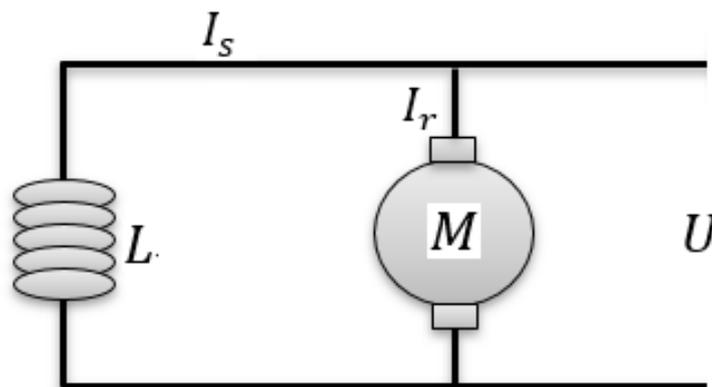


Figure (I.12) : Schéma de MCC à excitation shunt

➤ **Domaine d'application et Caractéristiques [5]**

Caractéristiques	Domaine d'application
-L'inducteur et l'induit sont branchés en parallèle. -Vitesse constante quel que soit la charge. - Le moteur shunt est un autorégulateur de vitesse.	Machines-outils, appareil de levage (ascenseur).

Tableau (I.02) : Domaine d'application du MCC à excitation shunt

➤ **Moteur à excitation Composée**

Le moteur à excitation composé, est à raccordé à avec deux excitations, excitation série et excitation shunt en même temps [6].

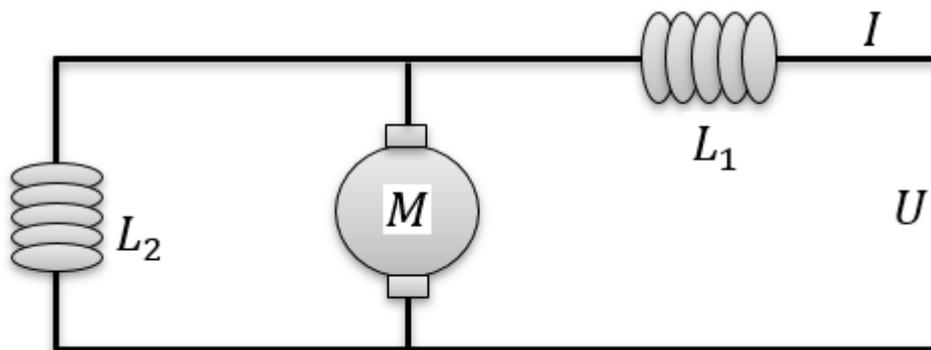


Figure (I.13) : Schéma de MCC à excitation composée

➤ **Domaine d'application et Caractéristiques [5]**

Caractéristiques	Domaine d'application
-L'inducteur est divisé en deux parties, l'une connectée en série et l'autre en parallèle. - Entraînements de grande inertie. - Couple très variable avec la vitesse.	-petit moteur à démarrage direct. -ventilateur. -pompes. -machines de laminaires. -Volants d'inertie.

Tableau (I.03) : Domaine d'application du MCC à excitation compound

➤ **Moteur à excitation séparée**

L'alimentation de l'enroulement inducteur est prise sur une source indépendante de la source de l'induit comme l'indique la Figure (I.14) [6].

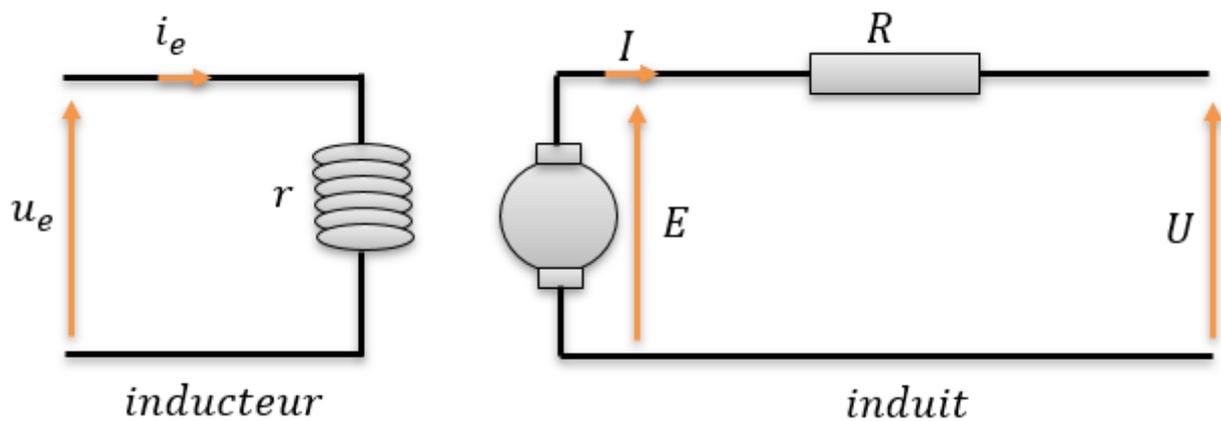


Figure (I.14) : Schéma équivalent du moteur à excitation séparée

Régime transitoire (pour l'induit)

- L'équation électrique :

$$U_a(t) = R_a I_a(t) + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + e(t) \quad (\text{I.06})$$

$$e(t) = K_e \cdot \omega(t) \quad (\text{I.07})$$

Régime permanent (pour l'induit)

- Équation électrique à l'induit :

$$U = e + R \cdot I_a \quad (\text{I.08})$$

- Équation électrique à l'inducteur :

$$U_e = r \cdot i_e \quad (\text{I.09})$$

- L'équation mécanique :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_m(t) - C_f(t) - C_r(t) \quad (\text{I.10})$$

$$C_m(t) = K_c I(t) \quad (\text{I.11})$$

$$C_f(t) = a \cdot \omega(t) \quad (\text{I.12})$$

Avec les notations suivantes :

U : tension aux bornes de l'induit en V

U_e : tension aux bornes de l'inducteur en V

I : courant dans l'induit en A

i_e : courant dans l'inducteur en A

R : résistance aux bornes de l'induit en Ω

r : résistance aux bornes de l'inducteur en Ω

E : force électro-motrice en V

J : moment d'inertie en kg.m^2

C_f : couple de frottement en N.m

a : coefficient de frottement visqueux en $\text{m.N.rad}^{-1}.\text{s}$

C_m : couple moteur en N.m

C_r : couple résistant en N.m

K_e : constante de f.e.m en V/rad/s

K_c : constante de couple en N.m/A

ω : pulsation de rotation du moteur en rad.s-1

➤ **Domaine d'application et Caractéristiques** [5]

Caractéristiques	Domaine d'application
-L'inducteur est alimenté par une source indépendante. -Grande souplesse de commande. -Large gamme de vitesse. Utilisé en milieu industriel, associé avec un variateur électronique de vitesse et surtout sous la forme moteur d'asservissement.	-Machines-outils. -moteur de broche, d'axe. -Machines spéciales.

Tableau (I.04) : Domaine d'application du MCC à excitation séparée

I.6. 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 [7].

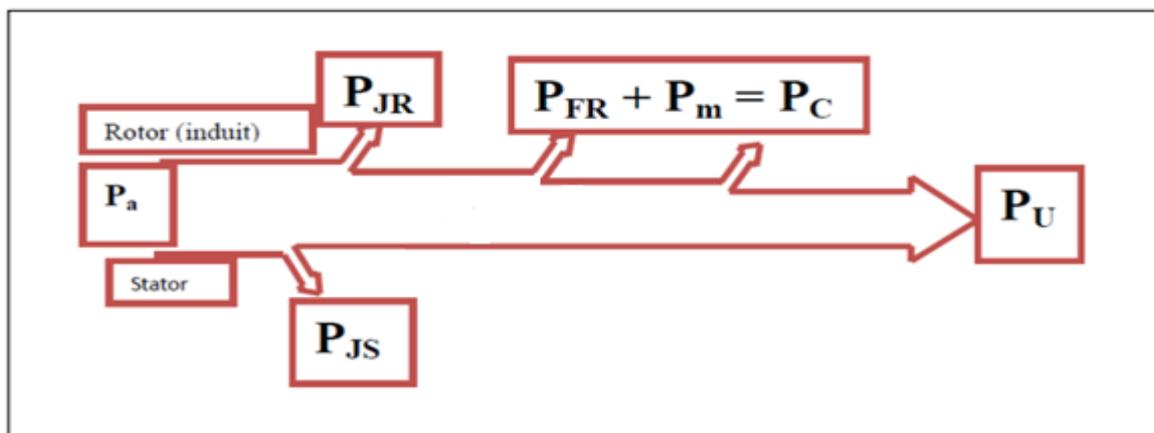


Figure (I.15) : Bilan de la puissance

P_a : Puissance absorbée.

P_u : Puissance utile.

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

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

P_c : Pertes fer + pertes mécaniques.

I.7. 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.

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad (\text{I.13})$$

P_u : puissance utile.

P_a : puissance absorbée.

I.8. Variation de vitesse

Pour faire varier la vitesse d'un moteur à courant continu, on peut agir sur la tension aux bornes de l'induit. La tension d'induit est directement proportionnelle à la vitesse de rotation. La puissance varie mais le couple reste constant. On dit alors que l'on fait de la variation de vitesse à couple constant.

I.8.1. Différents modes de réglage de la vitesse d'un moteur à courant continu

La relation de la vitesse d'un moteur à courant continu (à excitation shunt ou séparée) est donnée par :

$$n = \frac{U - R_a I_a}{K\Phi} \quad (\text{I.14})$$

En explorant cette relation, il apparait clairement quatre possibilités pour le réglage de la vitesse :

- ✓ Action sur R_a (réglage rhéostatique).
- ✓ Action sur Φ (réglage par le flux).
- ✓ Action sur U_a (réglage par la tension).
- ✓ Action sur le courant d'excitation.

I.8.1.1. Réglage rhéostatique

La tension et le flux sont fixés à leurs valeurs minimales, on peut réduire la vitesse en augmentant la résistance du circuit d'induit avec un rhéostat branché en série avec l'induit.

L'expression de la vitesse est :

$$n = \frac{U - (R_a - R_{add})I_a}{K} \quad (\text{I.15})$$

Pour :

$C = 0, I = 0$ On obtienne :

$$n = \frac{U}{K} \quad (\text{I.16})$$

Ainsi on obtient un faisceau de droites comme la montre figure (I.16).

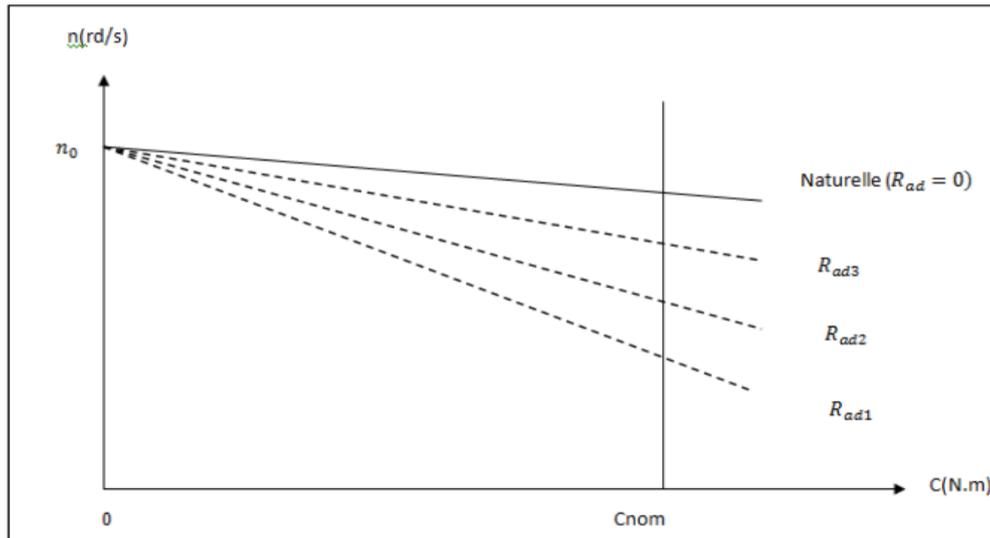


Figure (I.16) : Réglage de la vitesse par variation de résistance d’induit

I.8.1.2. Réglage par flux

Le démarrage de ce type de moteur doit être assuré à flux maximal. Une fois la vitesse est nominale, il sera possible de réduire le flux en utilisant des résistances variables appelées rhéostat d’excitation. Mais plus le flux est faible le couple que peut développer la machine à courant continu est faible.

$$n_1 = \frac{U}{K\Phi_1} - \frac{R_a I_a}{K\Phi_1} \tag{I.17}$$

$$\Phi_N > \Phi_1 > \Phi_2$$

$$n_2 = \frac{U}{K\Phi_2} - \frac{R_a I_a}{K\Phi_2} \tag{I.18}$$

$$n_N < n_1 < n_2$$

$$n_N = \frac{U}{K\Phi} - \frac{R_a I_a}{K\Phi} \tag{I.19}$$

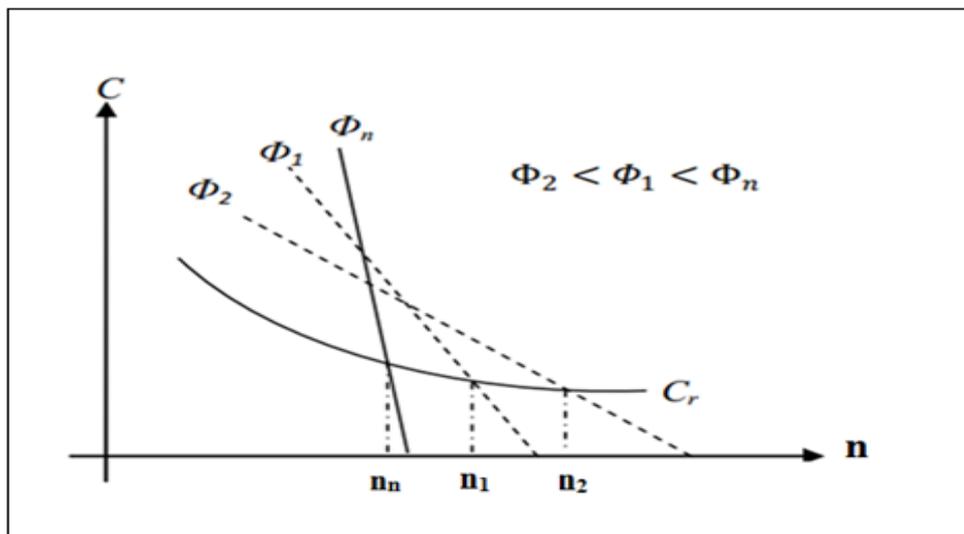


Figure (I.17) : Caractéristique de réglage par la variation du flux magnétique [8]

Avec ce procédé on ne peut qu'augmenter la vitesse du moteur par rapport à sa vitesse nominale.

I.8.1.3. Par variation de la tension d'induit

Le flux est mis à sa valeur nominale. En appliquant des tensions faibles par rapport à la tension nominale, on obtient une famille de caractéristique parallèles [7].

Ce mode de réglage permet de réduire la vitesse et il est excellent du point de vue technique et économique, car aucune énergie n'est gaspillée.

Ce mode de réglage a fait l'objet de notre étude. Pour varier la tension on utilisera un hacheur.

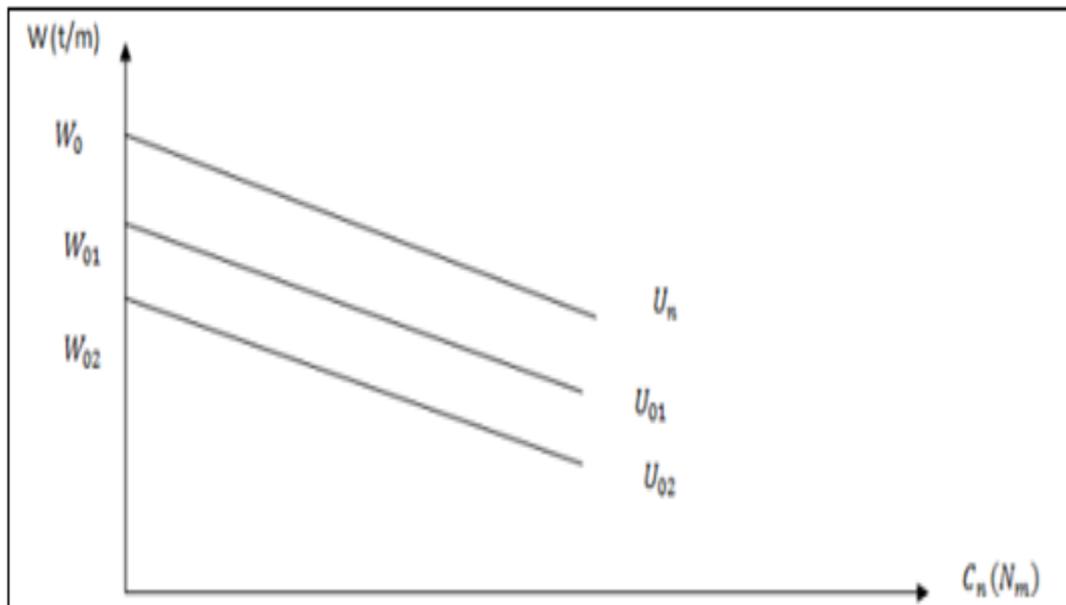


Figure (I.18) : Caractéristique de réglage par variation de la tension d'induit

I.8.1.4. Par action sur le courant d'excitation

A tension U constante, la vitesse du moteur est inversement proportionnelle au flux et donc au courant d'excitation (i_e). L'action sur le courant d'excitation permet donc essentiellement d'accroître la vitesse à partir du point de fonctionnement nominal jusqu'à la vitesse maximale supportable par le moteur [9].

I.9. Applications industrielles des machines à courant continu [5]

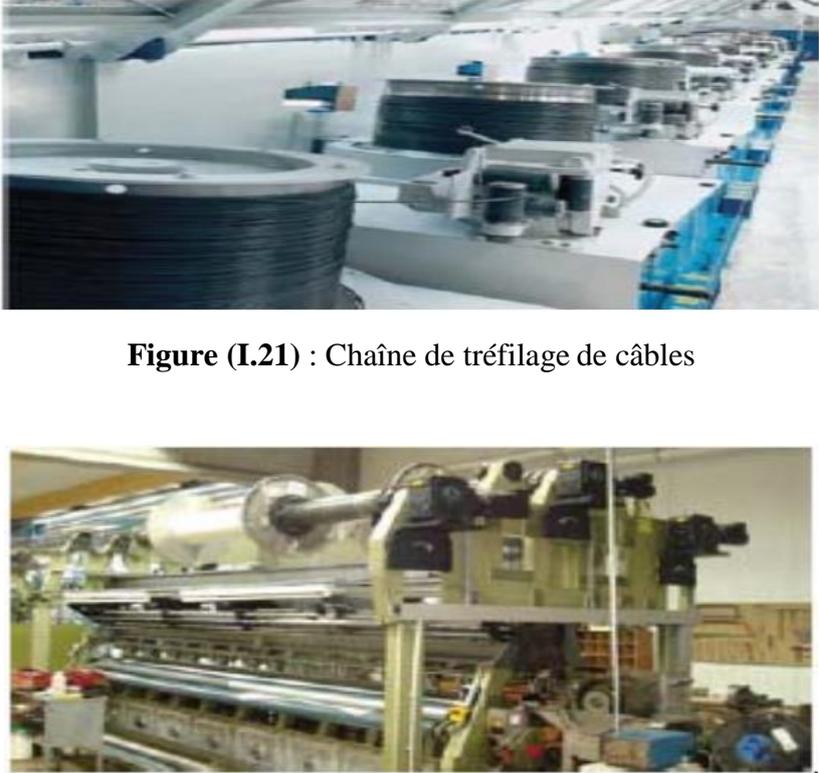
<p>Application nécessitant des puissances et des couples beaucoup plus élevés (Moteur à Excitation série, Moteur à Excitation composée).</p>	 <p>Figure (I.19) : Grue de chantier naval et des ponts de levage</p>
<p>Application Nécessitant couple de démarrage Important et capacité de freinage (Moteur à Excitation parallèle(shunt)).</p>	 <p>Figure (I.20) : Remontées mécaniques</p>
<p>Trois exemples d'applications typiques de la variation de vitesse à courant continu (Moteur à Excitation séparée, Moteur à Excitation parallèle (shunt)).</p>	 <p>Figure (I.21) : Chaîne de tréfilage de câbles</p> <p>Figure (I.22) : Machine d'enroulage pour film plastique transparent</p>

Tableau (I.05) : Différents Applications des machines à courant continu

I.10. Avantages et les inconvénients

L'avantage principal, qui a fait le succès des moteurs à courant continu réside dans leur adaptation simple aux moyens permettant de régler ou de faire varier leur vitesse, leur couple et leur sens de rotation ' les variateurs de vitesse', voir leur raccordement direct à la source d'énergie 'batteries d'accumulateur, piles, etc....'.

Le principal problème de ces machines vient de la liaison entre les balais, ou « charbons » et le collecteur rotatif. De plus il faut signaler que :

- Plus la vitesse de rotation est élevée, plus la pression des balais doit augmenter pour rester en contact avec le collecteur donc plus le frottement est important.
- Aux vitesses élevées les balais doivent donc être remplacés très régulièrement.
- Le collecteur imposant des ruptures de contact provoque des arcs, qui usent rapidement le commutateur et génèrent des parasites dans le circuit d'alimentation, ainsi que par rayonnement électromagnétique [6].

Conclusion

Ce chapitre a permis de rappeler les différents éléments qui constituent une machine à courant continu et le principe de fonctionnement. Après notre étude nous avons constaté que les moteurs à excitation séparée et à aimant permanent sont les plus adaptés pour la variation de vitesse. Dans le chapitre suivant, nous allons voir les convertisseurs statiques.

Chapitre II

Convertisseurs
continue-continue

II.1. Introduction

L'électronique de puissance étudie les convertisseurs statiques d'énergie électrique. Ils utilisent des composants de l'électronique à semi-conducteurs et des éléments linéaires.

Pour contrôler des puissances électriques importantes, les composants sont parcourus par des courants élevés atteignant des sous des tensions importantes.

Toutes ces contraintes leur imposent de dissiper une puissance minimale durant leur fonctionnement. Pour assurer cette particularité, les composants à semi-conducteurs fonctionnent en commutation (ils se comportent comme des commutateurs (interrupteurs) aussi parfaits que possible.

Dans un convertisseur, le choix d'un type de composant est basé sur sa commandabilité à l'ouverture et à la fermeture, en tension ou en courant, et sa réversibilité. La réversibilité en tension est l'aptitude à supporter des tensions directes et inverses à l'état bloqué, tandis qu'en courant, il s'agit de l'aptitude à laisser passer des courants directs ou inverses à l'état passant.

L'étude des convertisseurs statiques est d'abord réalisée en considérant les commutateurs parfaits, puis vient l'approfondissement en tenant compte des imperfections des composants.

II.2. Quelques interrupteurs en électronique de puissance

Le principe des convertisseurs consiste à faire commuter des courants, ce qui nécessite l'emploi de composants permettant de réaliser la fonction Interrupteur.

Idéalement, l'interrupteur fermé aura une tension pratiquement nulle à ses bornes alors que le courant sera fixé par le reste du circuit. En revanche, l'interrupteur ouvert aura une tension imposée à ses bornes, mais ne sera traversé par aucun courant.

On distinguera les actions (blocage ou amorçage) commandées (grâce à un signal [12]).

II.2.1. Diode

La diode de puissance est un composant non commandable (ni à la fermeture ni à l'ouverture).



Figure (II.01) : Diode de puissance [22]

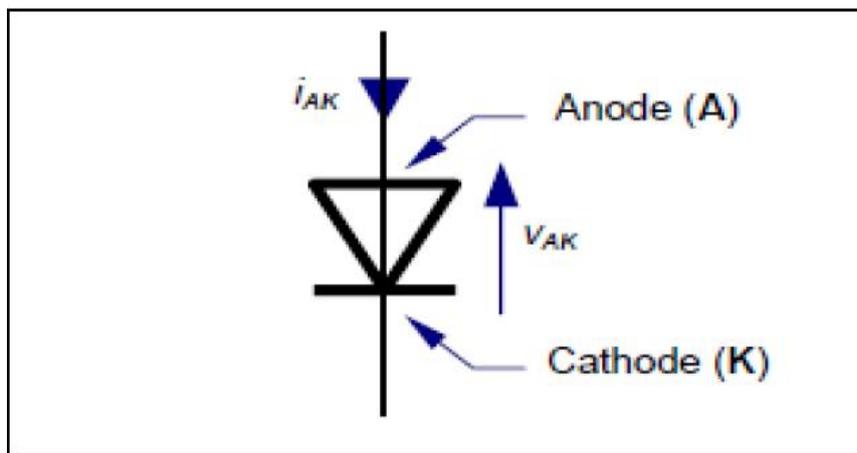


Figure (II.02) : Symbole diode de puissance

II.2.1.1. Principe de fonctionnement (composant parfait)

Le fonctionnement de la diode s'opère suivant deux modes :

- Diode passante (ou *ON*), tension $V_{AK} = 0$ pour $I_{AK} > 0$
- Diode bloquée (ou *OFF*), courant $I_{AK} = 0$ pour $V_{AK} < 0$

C'est un interrupteur automatique se ferme dès que $V_{AK} > 0$ et s'ouvre dès que $I_{AK} = 0$ [12].

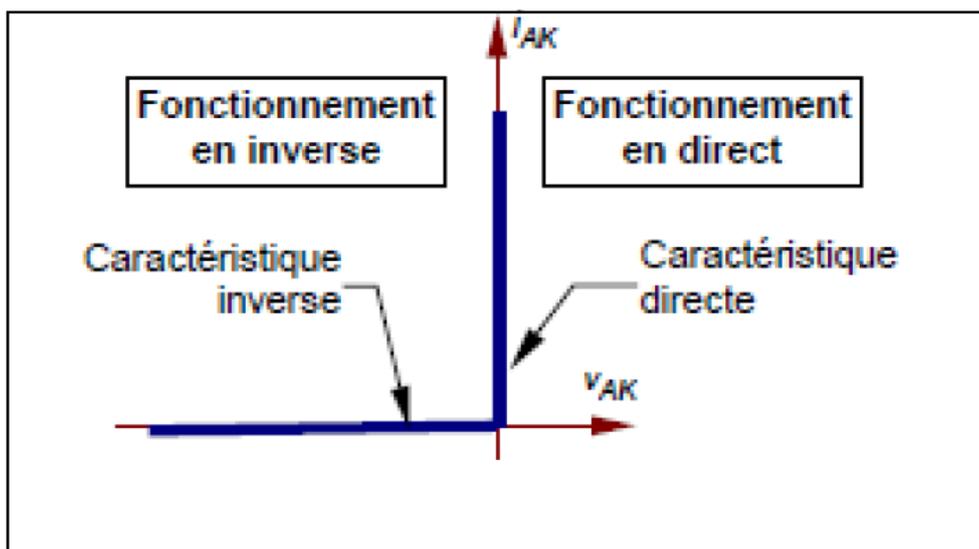


Figure (II.03) : Caractéristique de la diode parfaite

II.2.1.2. Composant réel et ses imperfections

Le fonctionnement réel est toujours caractérisé par ses deux états :

- ✓ **A l'état passant** : I_{AK} , le courant direct est limité au courant direct maximal.
- ✓ **A l'état bloqué** : V_{AK} , la tension inverse est limitée (phénomène de claquage par avalanche) à la tension inverse maximale.

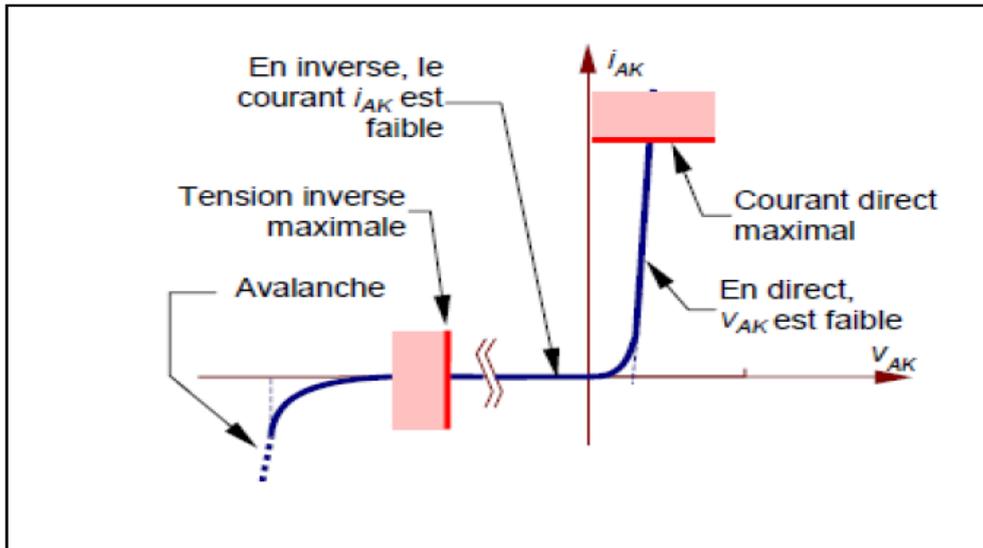


Figure (II.04) : Caractéristique de la diode réelle

II.2.2. Thyristor

Le thyristor est un composant commandé à la fermeture, mais pas à l'ouverture. Il est réversible en tension et supporte des tensions V_{AK} aussi bien positives que négatives, lorsqu'il est bloqué. Il n'est pas réversible en courant et ne permet que des courants I_{AK} positifs, c'est-à-dire dans le sens anode cathode, à l'état passant.

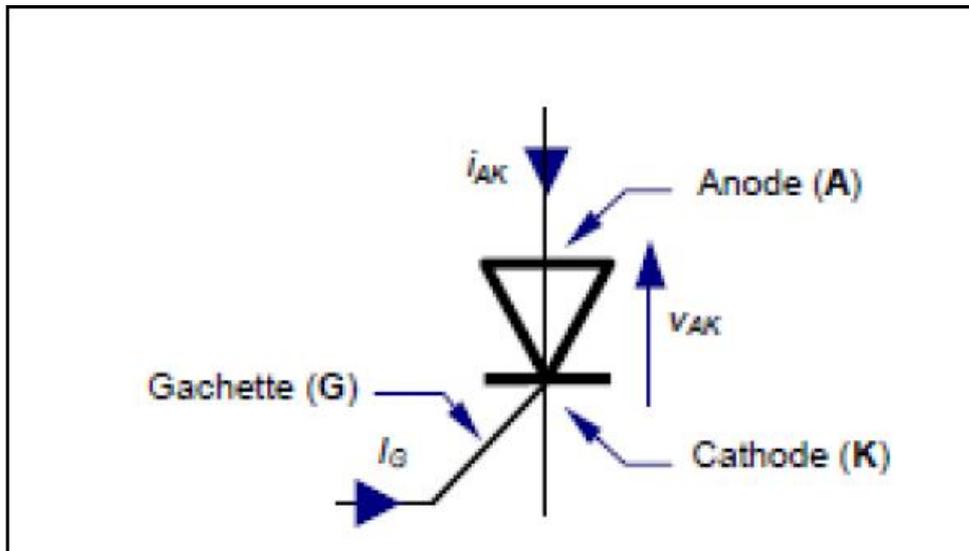


Figure (II.05) : Symbole du thyristor



Figure (II.06) : Différentes formes du thyristor [22]

II.2.2.1. Principe de fonctionnement

Le composant est bloqué (*OFF*) si le courant I_{AK} est nul (quel que soit la tension V_{AK}). Si la tension V_{AK} est positive, le thyristor est amorçable. L'amorçage (*A*) est obtenu par un courant de gâchette I_G positif d'amplitude suffisante alors que la tension V_{AK} est positive. L'état passant (*ON*) est caractérisé par une tension V_{AK} nulle et un courant I_{AK} positif. Le blocage (*B*) apparaît dès annulation du courant I_{AK} . On ne peut pas commander ce changement. On peut remarquer que le thyristor, à la différence de la diode, a une caractéristique à trois segments, c'est à dire qu'une des grandeurs est bidirectionnelle (ici la tension) [12].

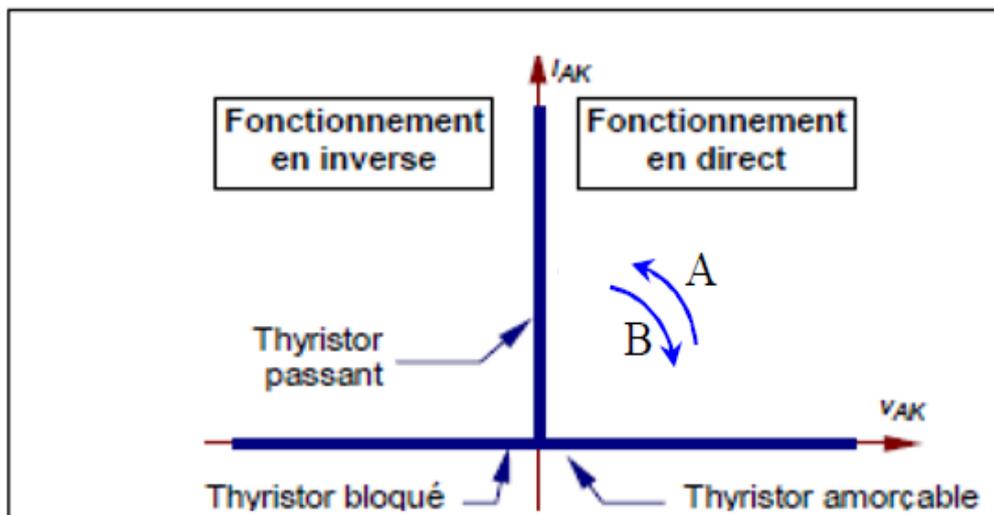


Figure (II.07) : Caractéristique du thyristor

- **Amorçage**

Pour assurer l'amorçage du composant, l'impulsion de gâchette doit se maintenir tant que le courant d'anode n'a pas atteint le courant de maintien I_H . La largeur de l'impulsion de gâchette dépend donc du type de la charge.

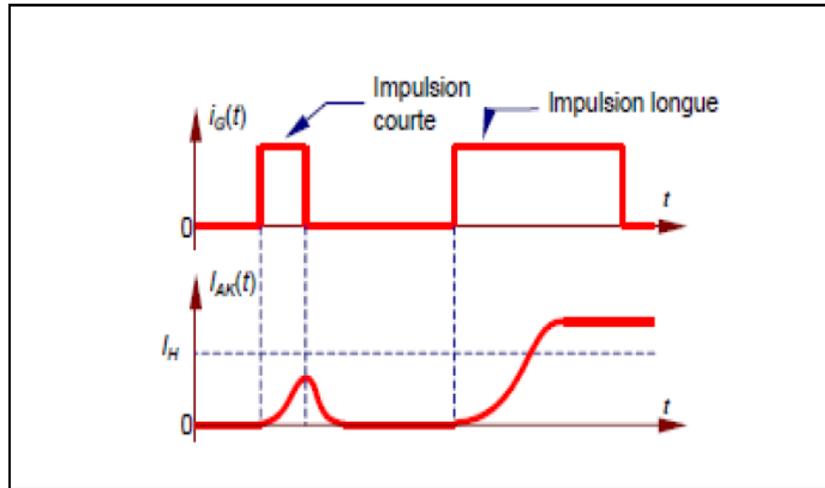


Figure (II.08) : Évolution du courant I_{AK} à l'amorçage

- **Blocage**

Après annulation du courant I_{AK} Figure (II.09), V_{AK} doit devenir négative pendant un temps au moins égal au temps d'application de tension inverse t_q . Si ce temps n'est pas respecté, le thyristor risque de se réamorcer spontanément et I_{AK} tend à redevenir positive, même durant un court instant.

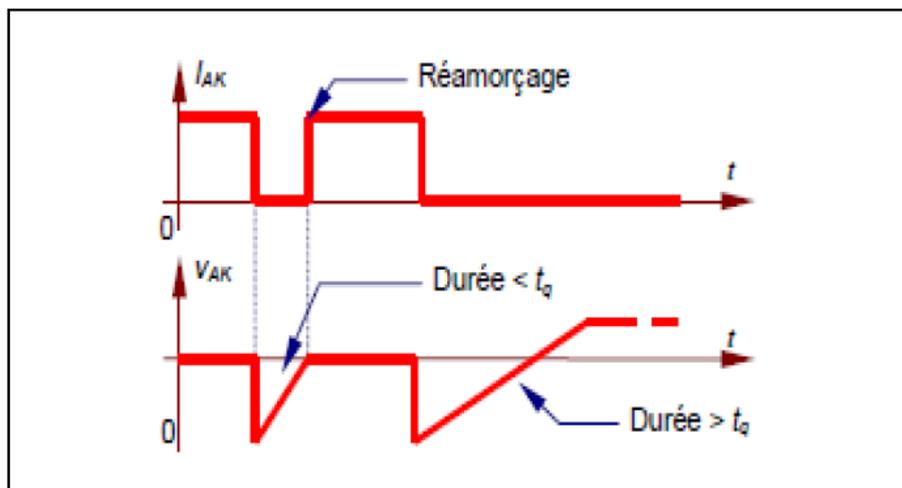


Figure (II.09) : Évolution du courant I_{AK} au blocage

II.2.3. Transistor

II.2.3.1. Transistor bipolaire

Essentiellement, un transistor est un amplificateur de de courant : c'est un générateur de courant (en sortie E) commandé par un faible courant de base positive dans le sens de la flèche et négatif à contresens.

On distingue deux sortes de transistors bipolaires (PNP et NPN) et c'est le sens du courant, qu'ils laissent passer dans une direction et bloquent dans l'autre, qui les différencie [14].

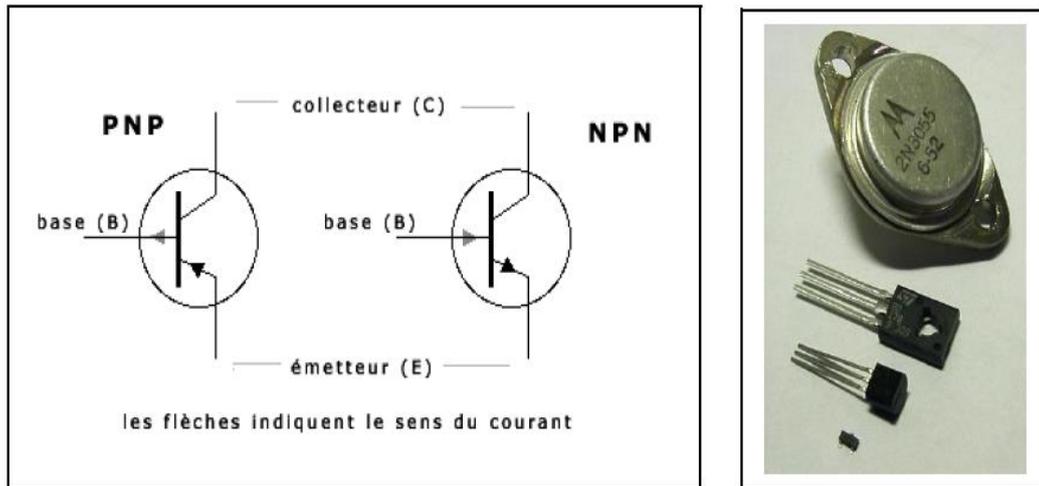


Figure (II.10) : Transistor bipolaire (PNP et NPN)

On distingue trois états de fonctionnement d'un transistor :

✓ **Etat passant**

Un courant (modulé ou fixe) sur la Base (B) permet de laisser passer plus ou moins de courant (qui sera également modulé ou fixe) entre C et E.

✓ **Etat de saturation maximale (ou clip)**

Une fois atteint son maximum, le transistor agira comme simple interrupteur fermé et laissera donc passer la totalité du courant d'alimentation ($I_B \geq I_{Bsat}$).

✓ **Etat bloqué**

S'il n'y a pas de courant à la base (B), rien ne passe dans le transistor et il agira comme un interrupteur ouvert ($I_B=0$).

II.2.3.2. Transistors MOSFET

La grille métallique est isolée du substrat semi-conducteur par une couche d'oxyde d'où le nom de MOS (métal oxyde semi-conducteur). Par action sur la tension de commande V_{GS} , on varie le passage de courant « I_D » du drain vers la source.

Quelques types Transistors MOSFET [21]

- **Transistor MOSFET à canal N**

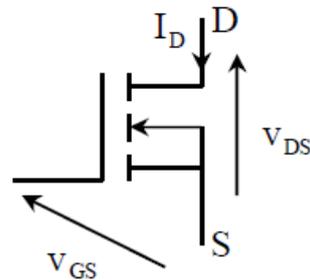


Figure (II.11) : Transistor MOSFET à canal N

- **Transistor canal N (Courants et tensions positifs)**

- Commandé à la fermeture (OFF-ON) à l'ouverture (ON-OFF).
- Non réversible en courant.
- Courant de drain positif exclusivement.
- Non réversible en tension.
- Tension V_{DS} positive seulement est supportée.

- **Transistor MOSFET à canal P**

Transistor MOSFET à canal P il y a toujours Courants et tensions négatives.

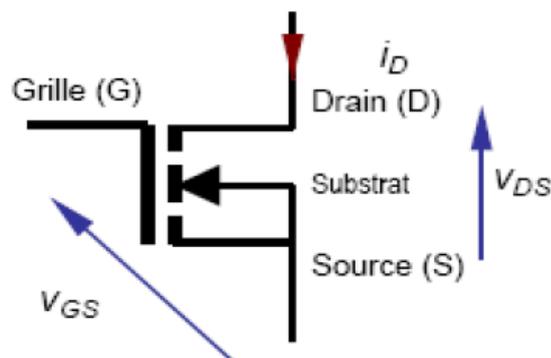


Figure (II.12) : Transistor MOSFET à canal P

Fonctionnement en commutation : deux états

Transistor ouvert (OFF)

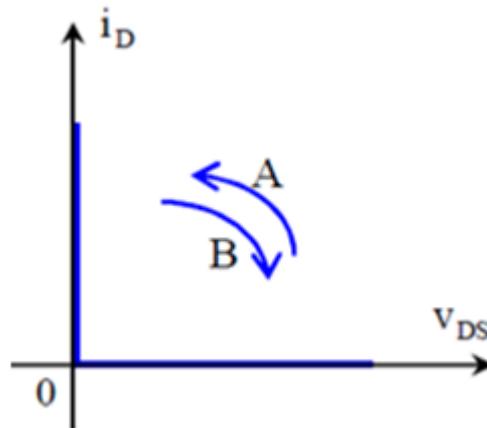
- $I_D = 0$ et V_{DS} existe
- Interrupteur ouvert

Transistor fermé (ON)

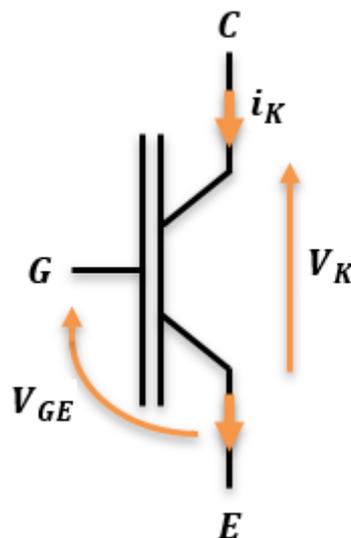
- $I_D = i_{Dmax}$ et $V_{DS} = 0$
- Interrupteur fermé

Changements d'états : Transitions

- OFF-ON : Mise en conduction
- $V_{GS} > 0$
- ON-OFF : Ouverture
- $V_{GS} = 0$

✓ **Caractéristiques statiques****Figure (II.13) :** Caractéristique statiques du MOSFET**II.2.3.3. Transistors IGBT**

Le transistor IGBT (Insulated Gate Bipolaire Transistor) désigne un transistor bipolaire à grille isolée. Il est formé par l'association d'un transistor MOSFET en commande et d'un transistor bipolaire en étage puissance. Le passage de l'état bloqué à l'état passant de l'IGBT est réalisé par polarisation de la grille. Ce transistor associe les avantages du transistor bipolaire pour le $V_{ce,sat}$ et les avantages du MOSFET pour la commande [15].

**Figure (II.14) :** Transistor IGBT

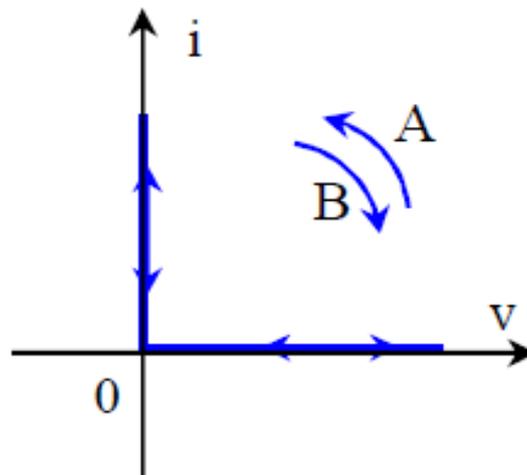
✓ **Caractéristiques statiques**

Figure (II.15) : Caractéristique statiques de l'IGBT

✓ **Le principe de fonctionnement (composant parfait) [16]**

Condition d'amorçage : tension de commande $V_{GS} > 0$ et $V_K > 0$.

Condition de blocage : tension de commande $V_{GS} = 0$.

II.3. Convertisseurs statiques

Les éléments de puissance (tel que transistor, diode, thyristor etc...) nous permettent de réaliser des montages concrets pour convertir une tension ou un courant d'une forme à une autre. Appelés convertisseur statique [12].

Les convertisseurs statiques ne sont que des composants électroniques à base de semi-conducteurs.

Il y a quatre types de convertisseurs :

- Convertisseur alternatif-continu : Redresseur.
- Convertisseur continu-continu : Hacheur.
- Convertisseur continu-alternatif : Onduleur.
- Convertisseur alternatif-alternatif : Gradateur.

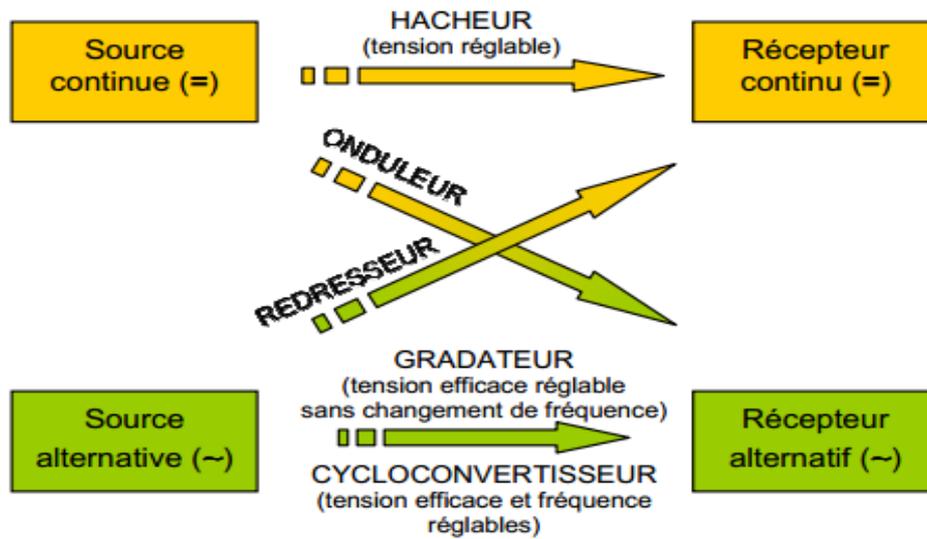


Figure (II.16) : Familles des convertisseurs statiques

II.3.1. Redresseurs

Ce sont des convertisseurs alternatif-continu qui permettent de convertir une tension alternative en une tension continue unidirectionnelle, s'ils sont commandés la valeur moyenne de la tension obtenue est alors réglable [10].

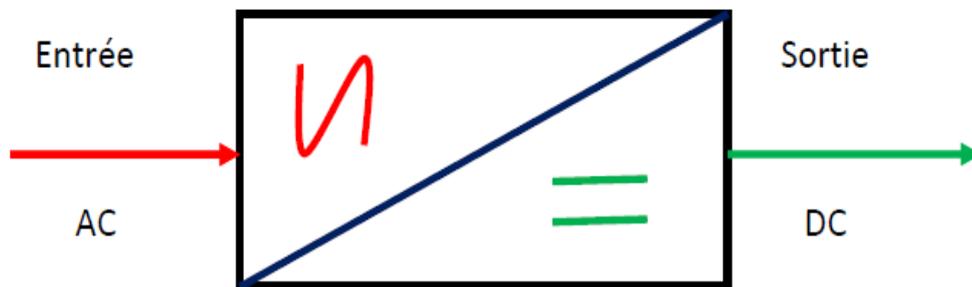


Figure (II.17) : Redresseur

II.3.2. Onduleurs

Les onduleurs sont les convertisseurs statiques continu-alternatif permettant de fabriquer une source de tension alternative à partir d'une source de tension continue.

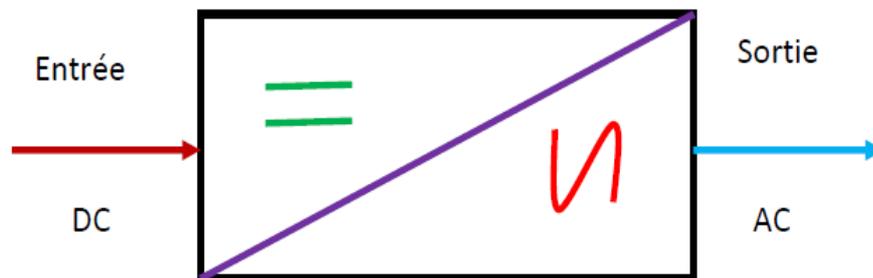


Figure (II.18) : Onduleur

La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW) [13].

II.3.3. Gradateurs

Le gradateur est un appareil qui permet de convertir une tension alternative sinusoïdale à fréquence fixe et de valeur efficace constante en une tension alternative de valeur efficace réglable.

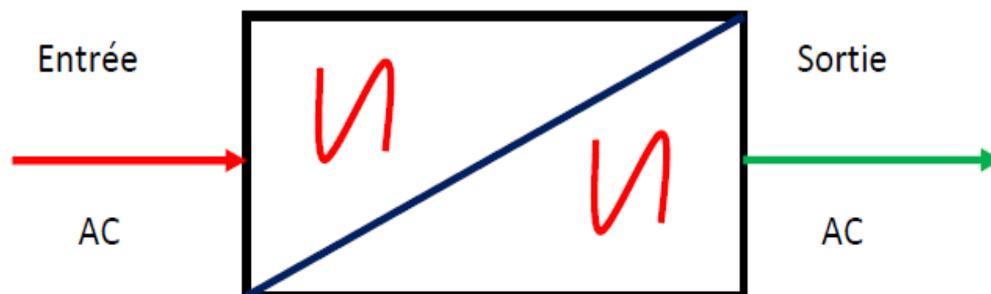


Figure (II.19) : Gradateur

II.3.4. Hacheurs

L'hacheur est un dispositif permettant d'obtenir une tension continue de valeur moyenne réglable à partir d'une source de tension continue fixe (batterie d'accumulateurs ou bien pont redresseur-alimenté par le réseau de distribution).

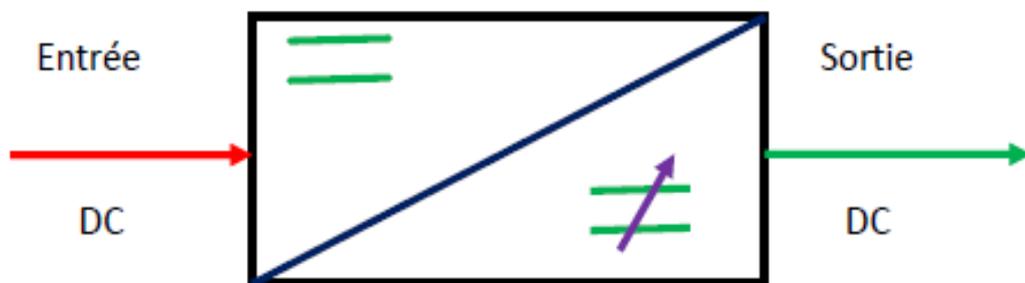


Figure (II.20) : Hacheur

Un hacheur peut être réalisé à l'aide des interrupteurs électroniques commandables à la fermeture et à l'ouverture telle que les transistors bipolaires ou IGBT ou les thyristors GTO.

II.4. Types des hacheurs

II.4.1. Hacheur non réversible

II.4.1.1. Hacheur série

➤ Principe de l'hacheur série

Pour faire varier la valeur moyenne de la tension v_s aux bornes du récepteur, on réalise l'équivalent du montage simplifié suivant [11].

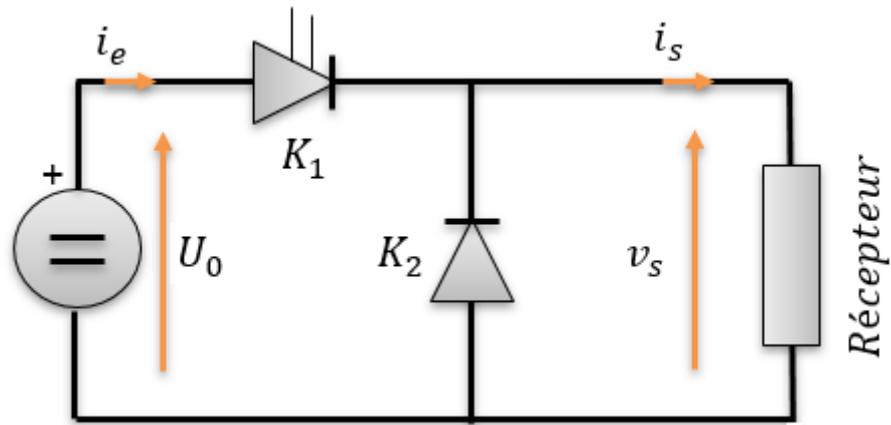


Figure (II.21) : Structure d'hacheur série

Les interrupteurs K_1 et K_2 sont complémentaires :

- K_1 ferme, K_2 ouvert : $v_s = U_0$
- K_1 ouvert, K_2 ferme : $v_s = 0$

Ils sont actionnés périodiquement : sur une période T de fonctionnement de l'hacheur, K_1 est ferme durant αT .

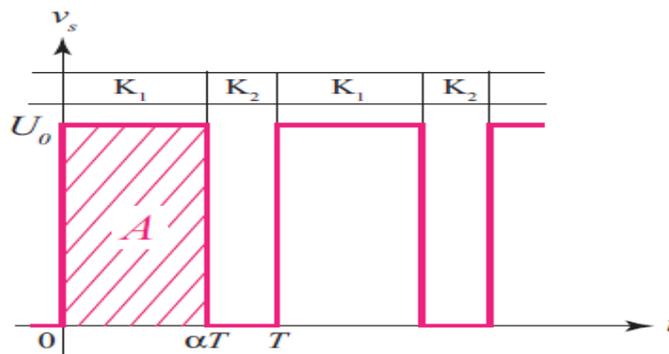


Figure (II.22) : Tension de sortie V_s

La quantité sans unité α constitue le **rapport cyclique** de l'hacheur. La valeur moyenne de v_s est donnée par $v_s = A/T$, A étant l'aire comprise entre v_s et l'axe des abscisses $v_s = 0$, Avec $A = \alpha TU_0$, il vient

$$v_s = \alpha U_0.$$

Quand on fait varier α de 0 à 1, v_s varie linéairement de 0 à U_0 .

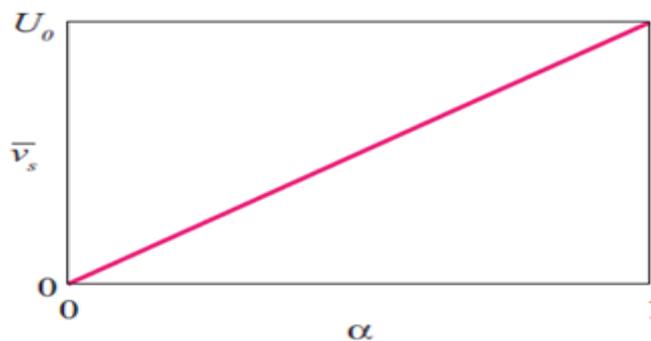


Figure (II.23) : Tension de sortie moyenne V_s

a. Réalisation des interrupteurs

Dans la suite on s'intéressera exclusivement au cas où le récepteur est inductif **figure (II.24)** (par exemple l'induit d'un moteur à courant continu en série avec une inductance de lissage). La structure que l'on étudiera utilise une diode D dite de roue libre pour jouer le rôle de K_2 et un interrupteur électronique H , également unidirectionnel en courant, commandé à la fermeture et à l'ouverture pour jouer le rôle de K_1 . Dans l'hacheur série l'interrupteur commandé H est traversé par une partie du courant appelé par le récepteur de 0 à αT , (H est fermé). On a alors $v_s = U_0$ et par conséquent D est ouverte et polarisée en inverse, elle se ferme Lorsque H s'ouvre, à $t = \alpha T$, et assure la continuité du courant i_s à travers le récepteur inductif ($v_s = 0$) et reste en principe jusqu'à $t = T$.

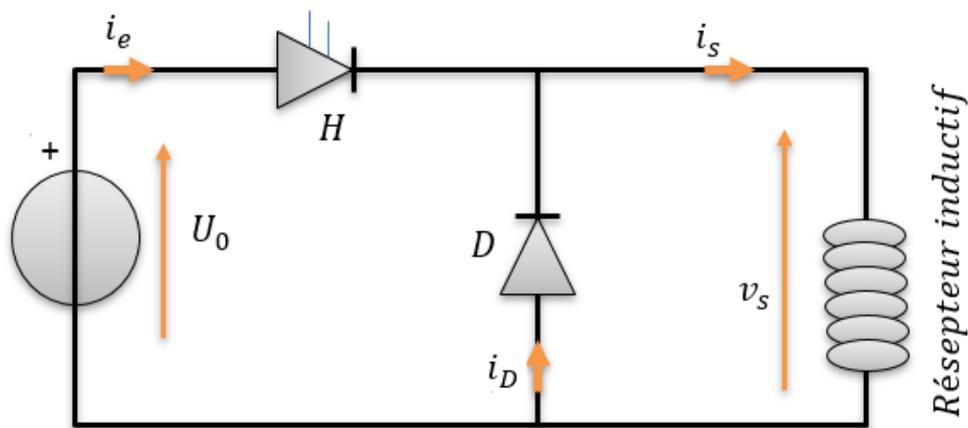


Figure (II.24) : Structure d'hacheur série charge L

Cette structure d'hacheur n'est pas réversible, ni en tension ni en courant, les interrupteurs étant unidirectionnels, en courant. Le récepteur ne peut donc pas fournir de puissance à la source de tension U_0 .

b. Etude de fonctionnement sur une charge R.L

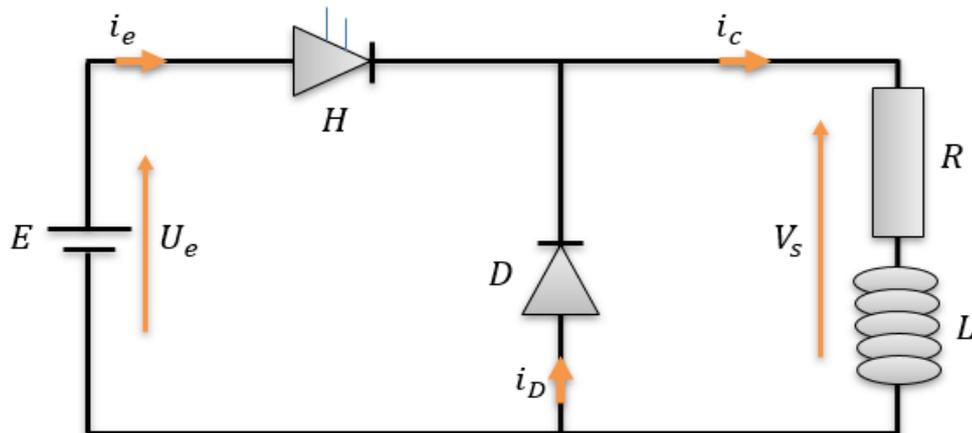


Figure (II.25) : Structure d'hacheur série charge $R.L$

❖ Conduction continue

De 0 à αT : H fermé D ouvert ; $U_e = V_s$; donc on a :

$$U_e = V_s = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} \quad (\text{II.01})$$

$$i_c(t) = i_0 e^{-t/\tau} + \frac{U_e}{R}, \quad \tau = \frac{R}{L} \quad (\text{II.02})$$

De αT à T : H ouvert, D fermé ; $U_e = 0$; donc on a :

$$0 = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} \quad (\text{II.03})$$

$$i_c(t) = i_1 e^{-(t-\alpha T)/\tau}, \quad \tau = \frac{R}{L} \quad (\text{II.04})$$

L'expression des constantes i_0 et i_1 en fonction des paramètres du montage s'obtient en écrivant d'une part la continuité (au sens mathématique) entre les 2 expressions de i_c à l'instant à $t = \alpha T$ et d'autre part la périodicité de i_c en régime établie.

$i_s(t=0) = i_s(t=T)$. On obtient :

$$i_0 = \frac{U_e}{R} \left(\frac{e^{-\frac{T(1-\alpha)}{\tau}} - 1}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} \right) \quad (\text{II.05})$$

$$i_1 = \frac{U_e}{R} \left(\frac{1 - e^{-\frac{\alpha T}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} \right) \quad (\text{II.06})$$

Donc La valeur moyenne du courant dans le récepteur s'obtient en écrivant :

$$i_{c,\min} = i_0 + \frac{U_e}{R} \quad (\text{II.07})$$

$$i_{c,\max} = i_1 \quad (\text{II.08})$$

Et La valeur moyenne de la tension dans le récepteur s'obtient en écrivant :

$$V_s = L \frac{di_c}{dt} + Ri_c \quad (\text{II.09})$$

Puis en prenant la valeur moyenne de chacun des 2 membres :

$$\overline{V_s} = L \overline{\frac{di_c}{dt}} + R \overline{i_c} \quad (\text{II.10})$$

Or, la valeur moyenne d'une somme de fonctions est la somme des valeurs moyennes de ces fonctions :

$$\alpha U_e = L \overline{\frac{di_c}{dt}} + R \overline{i_c} \quad (\text{II.11})$$

Comme la valeur moyenne de la dérivée d'une fonction périodique est nulle, il vient :

$$\overline{i_c} = \frac{\alpha U_e}{R} \quad (\text{II.12})$$

L'expression de Δi_c donnée par. Dans ce cas on a :

$$\Delta i_c = I_{\max} - I_{\min} = \frac{U_e}{R} \alpha (1 - \alpha) \frac{T}{\tau} \quad (\text{II.13})$$

$$\Delta i_c = I_{\max} - I_{\min} = \frac{U_e}{L} \alpha (1 - \alpha) T = \frac{U_e}{L} \alpha (1 - \alpha) \frac{1}{f} \quad (\text{II.14})$$

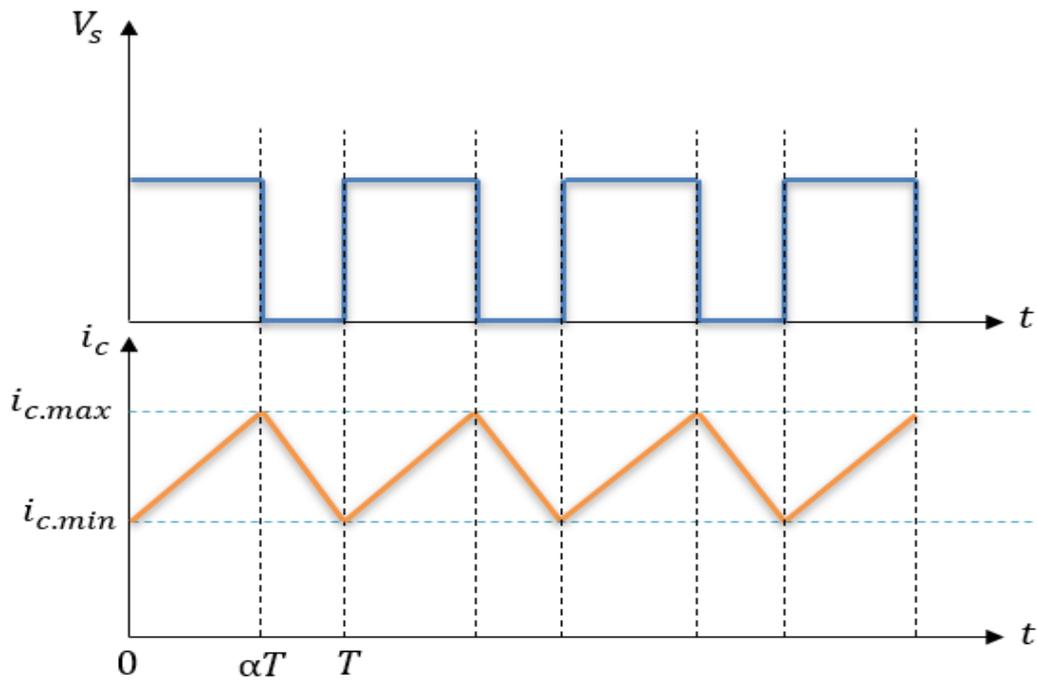


Figure (II.26) : Régime de conduction continue

❖ **Conduction discontinue**

De 0 à αT : H fermé, D ouvert ; $U_e = V_s$; donc on a :

Avec

$$U_e = V_s = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} \tag{II.15}$$

$$i_c(t) = i_0 e^{-t/\tau} + \frac{U_e}{R}, \quad \tau = \frac{R}{L} \tag{II.16}$$

De αT à βT : H ouvert, D fermé ; $U_e = 0$; donc on a :

$$0 = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} \tag{II.17}$$

$$i_c(t) = i_1 e^{-(t-\alpha T)/\tau}, \quad \tau = \frac{R}{L} \tag{II.18}$$

De βT à T : H ouvert, D fermé ; $U_e = 0$; donc on a :

$$0 = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} \tag{II.19}$$

$$i_c = 0 \tag{II.20}$$

L'expression des constantes i_0 et i_1 en fonction des paramètres du montage, on peut écrire :

$i_c(t=0) = 0$. On obtient

$$i_0 = -\frac{U_e}{R} \tag{II.21}$$

$i_c(t=\alpha T) = i_{max}$. On obtient :

$$i_1 = \frac{U_e}{R} \left(1 - e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} \right) \tag{II.22}$$

Donc La valeur moyenne du courant dans le récepteur s'obtient en écrivant :

$$i_{c,max} = i_1 \tag{II.23}$$

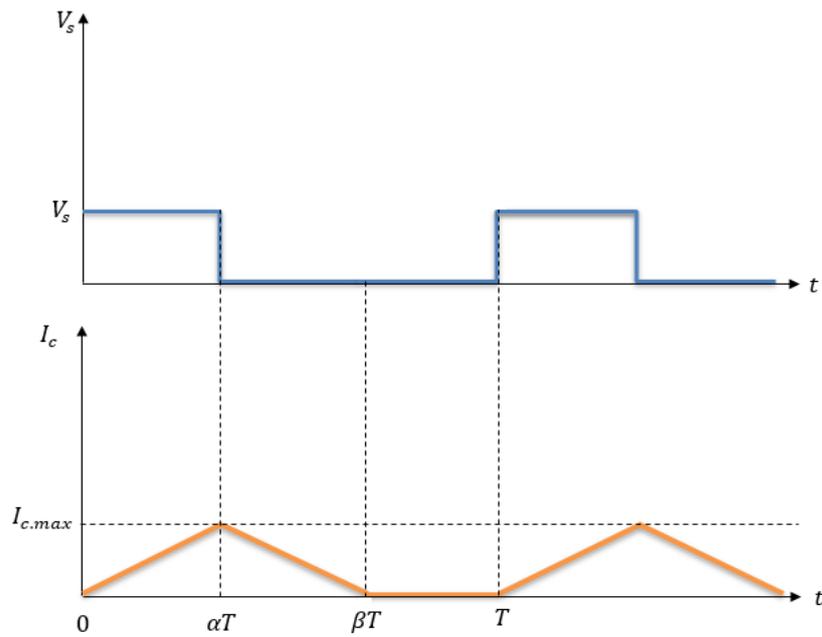


Figure (II.27) : Régime de conduction continue

c. Etude de fonctionnement sur une charge R, L, E

Le récepteur est modélisé par l'association en série d'une source de tension de f.e.m. E , d'une résistance R et d'une inductance L :

R → chute de tension ohmique.

L → chute de tension inductive.

E → f e m moyenne.

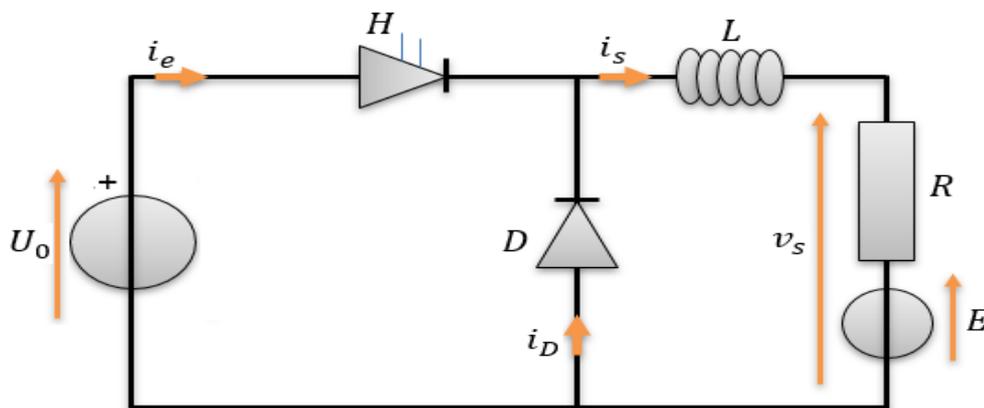


Figure (II.28) : Structure d'hacheur série charge R.L.E

Les interrupteurs H et D sont supposés parfaits : tension nulle à l'état passant, Courant nul à l'état bloqué.

❖ Conduction continue

- De 0 à αT , H est passant et D est bloquée.

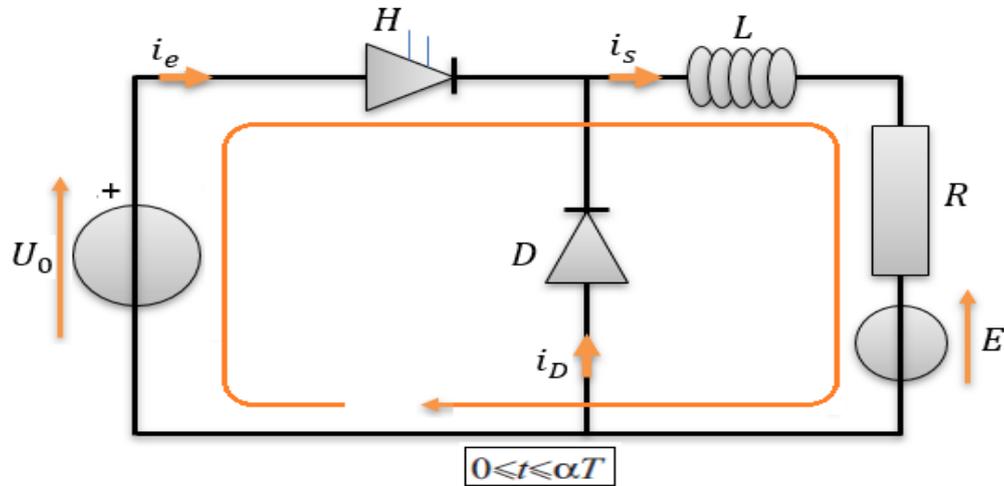


Figure (II.29) : Passant de courant pour H fermée

Par conséquent le courant i_D est nul et les courants i_e et i_s identiques et solutions de l'équation différentielle :

$$U_0 - Ri_s - L \frac{di_s}{dt} - E = 0 \tag{II.24}$$

Soit

$$i_s(t) = i_0 e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{U_0 - E}{R} \tag{II.25}$$

Avec

$$\tau = \frac{L}{R} \tag{II.26}$$

- De αT à T , H est bloqué et D est passante.

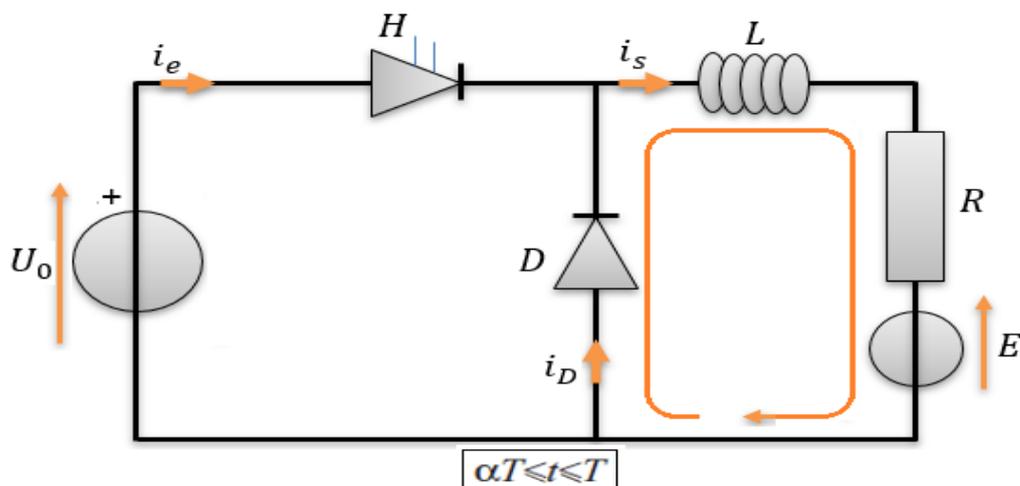


Figure (II.30) : Passant de courant pour H ouvert

Par conséquent le courant i_e est nul et les courants i_D et i_s identiques et solutions de l'équation différentielle.

$$Ri_s + L \frac{di_s}{dt} + E = 0 \quad (\text{II.27})$$

$$i_s(t) = i_0 e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{U_0 - E}{R} \quad (\text{II.28})$$

L'expression des constantes i_0 et i_1 en fonction des paramètres du montage s'obtient en écrivant d'une part la continuité (au sens mathématique) entre les 2 expressions de i_s à l'instant à $t = \alpha T$ et d'autre part la périodicité de i_s en régime établie.

$i_s(t = 0) = i_s(t = T)$. On obtient :

$$i_0 = \frac{U_0}{R} \left(\frac{e^{-\frac{T(1-\alpha)}{\tau}} - 1}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} \right) \quad (\text{II.29})$$

$$i_1 = \frac{U_0}{R} \left(\frac{1 - e^{-\frac{\alpha T}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} \right) \quad (\text{II.30})$$

On voit donc que i_0 est négatif et i_1 positif : durant l'intervalle $[0 ; \alpha T]$ le courant i_s est croissant ; durant l'intervalle $[\alpha T ; T]$ i_s est décroissant et l'inductance se décharge.

On a :

$$i_{s,\min} = i_0 + \frac{U_0 - E}{R} \quad (\text{II.31})$$

$$i_{s,\max} = i_1 - \frac{E}{R} \quad (\text{II.32})$$

La valeur moyenne du courant dans le récepteur s'obtient en écrivant :

$$V_s = L \frac{di_s}{dt} + Ri_s + E \quad (\text{II.33})$$

Puis en prenant la valeur moyenne de chacun des 2 membres :

$$\overline{V_s} = L \overline{\frac{di_s}{dt}} + \overline{Ri_s} + E \quad (\text{II.34})$$

Or, la valeur moyenne d'une somme de fonctions est la somme des valeurs moyennes de ces fonctions :

$$\alpha U_0 = L \overline{\frac{di_s}{dt}} + \overline{Ri_s} + E \quad (\text{II.35})$$

Comme la valeur moyenne de la dérivée d'une fonction périodique est nulle, il vient :

$$\overline{i_s} = \frac{\alpha U_0 - E}{R} \quad (\text{II.36})$$

Remarquons que les interrupteurs H et D étant unidirectionnels en courant, le courant i_s moyen est nécessairement positif quel que soit α . Ceci implique $E < \alpha U_0$.

L'expression de Δi_s peut être encore simplifiée dans la mesure où la chute de tension ohmique Ri_s est négligeable devant la f.e.m. E du récepteur. En effet, dans ce cas on a :

$$\overline{V_s} = \alpha U_0 = E + \overline{Ri_s} = E \quad (\text{II.37})$$

$$\Delta i_s = \frac{U_0}{R} \frac{T}{\tau} \alpha (1 - \alpha) = \frac{(1 - \alpha) U_0}{L} \alpha T = \frac{(U_0 - \alpha U_0)}{L} \alpha T \quad (\text{II.38})$$

$$\Delta i_s = \frac{(U_0 - E)}{L} \alpha T = \frac{(U_0 - E)}{L} \frac{\alpha}{f} \quad (\text{II.39})$$

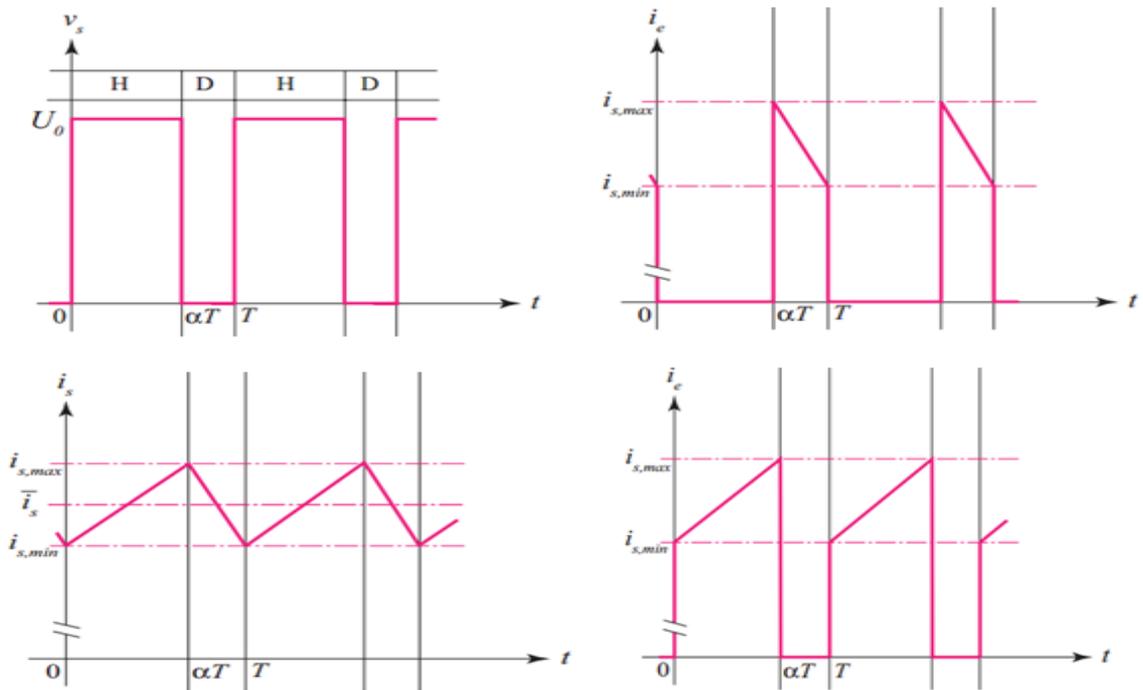


Figure (II.31) : Régime de conduction continue charge R.L.E

❖ Conduction discontinue

- De 0 à αT , H est passant et D est bloquée.

$$U_0 - Ri_s - L \frac{di_s}{dt} - E = 0 \tag{II.40}$$

Soit

$$i_s(t) = i_0 e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{U_0 - E}{R} \tag{II.41}$$

Avec

$$\tau = \frac{L}{R} \tag{II.42}$$

- De αT à βT , H est bloqué et D est passante.

$$Ri_s + L \frac{di_s}{dt} + E = 0 \tag{II.43}$$

$$i_s(t) = i_1 e^{-(t-\alpha T)/\tau} - \frac{E}{R} \tag{II.44}$$

- De βT à T , H est bloqué et D est bloqué.

$$U_0 = E \tag{II.45}$$

$$i_s = 0 \tag{II.46}$$

L'expression des constantes i_0 et i_1 en fonction des paramètres du montage on écrire :

$i_s(t = 0) = 0$. On obtient :

$$i_0 = \frac{E - U_0}{R} \tag{II.47}$$

$i(\alpha T) = i_{\max}$. On obtient

$$i_1 = \frac{U_0}{R} + \frac{E-U_0}{R} e^{-\alpha T/\tau} \tag{II.48}$$

Donc

$$i_{\max} = i_1 - \frac{E}{R} \tag{II.49}$$

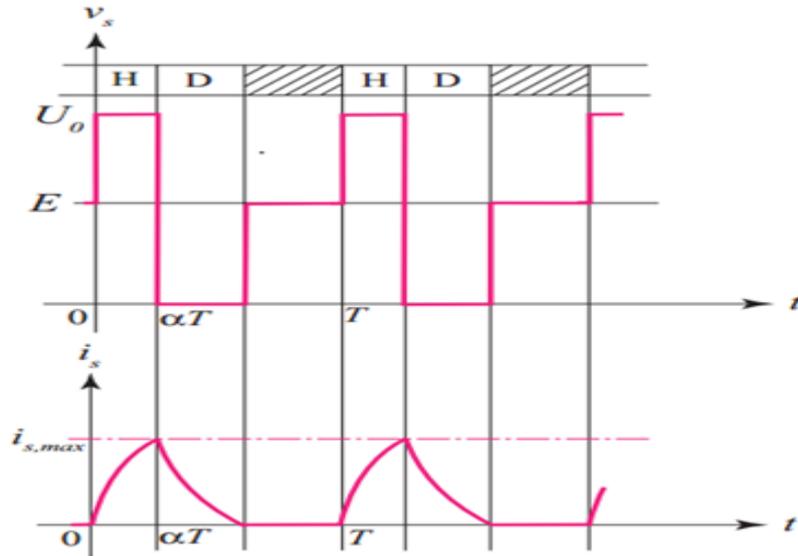


Figure (II.32) : Régime de conduction discontinu R.L.E

II.4.1.2. Hacheur parallèle

La configuration de l’hacheur est présentée dans la figure (II.33). Quand l’hacheur est en fonctionnement (S fermé et D ouverte), l’inductance L stocke une énergie électrique. A l’ouverture de S, l’énergie stockée se décharge à travers la diode D et la charge [18].

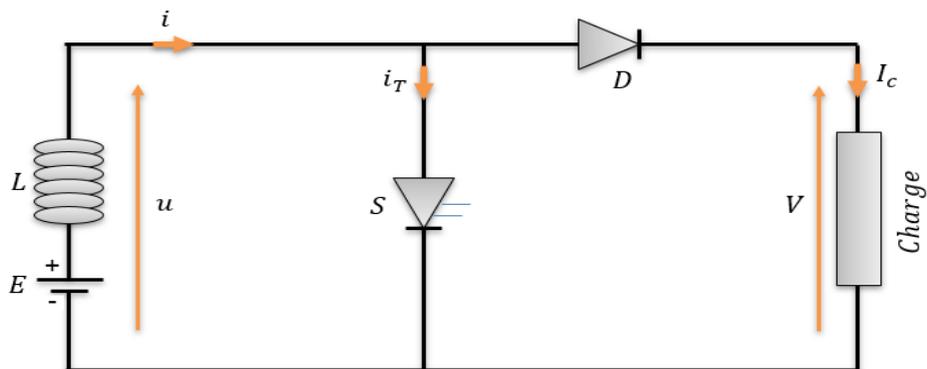


Figure (II.33) : Structure Hacheur parallèle

- Pour $0 < t < \alpha T$

S est conducteur, D est bloquée

$$U = 0 \tag{II.50}$$

- Pour $\alpha T < t < T$

S est bloqué et D est conductrice

$$U = V \tag{II.51}$$

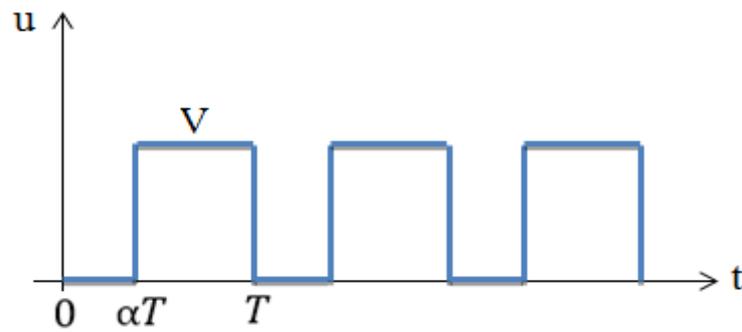


Figure (II.34) : Chronogramme de tension V

II.4.2 Hacheurs réversibles

II.4.2.1. Hacheur série réversible en courant

Dans ce système, le changement du sens de parcours de l'énergie est lié au changement de signe du courant alors que la tension reste de signe constant. Cette fois, l'interrupteur, réversible en courant, est formé de deux composants [19].

Le premier est un composant commandable à l'amorçage et au blocage transistor, IGBT, GTO..., alors que le second est une diode. Ils sont montés en antiparallèle. Le Schéma de l'interrupteur réversible en courant est donné par la Figure (II.35).

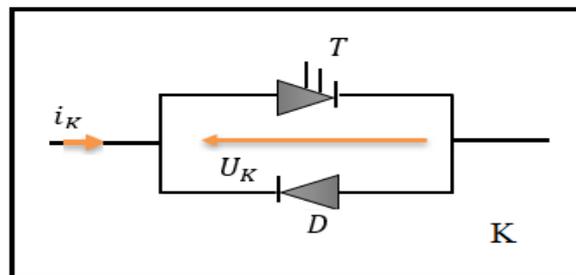


Figure (II.35) : Schéma d'Interrupteur réversible en courant

Cette fois, I_K peut être positif ou négatif. Il n'y aura plus de phénomène de conduction discontinue et de l'impossibilité pour le courant de changer de signe. Simplement, suivant le sens du courant, l'un ou l'autre des composants assurera la conduction.

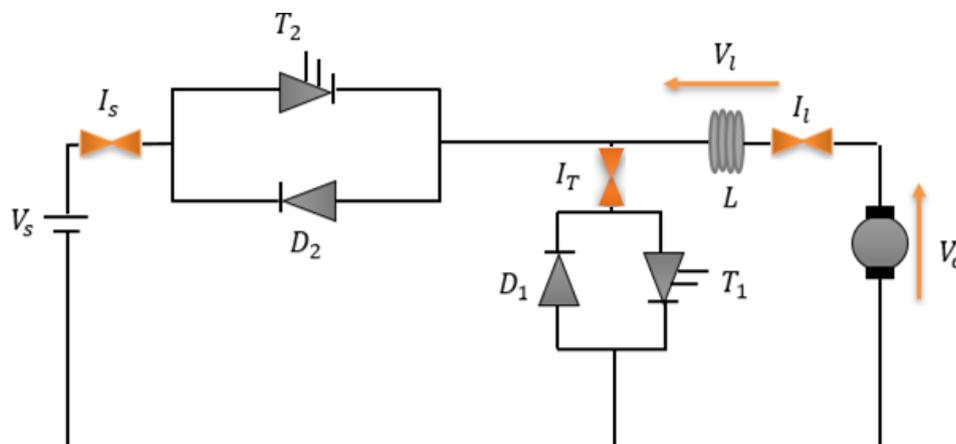


Figure (II.36) : Structure d'un hacheur série réversible en courant

La structure de l'hacheur série réversible en courant est donnée par la figure (II.36). C'est la structure de l'hacheur série classique par des interrupteurs réversibles en courant avec modification de la charge. En prenant une MCC qui peut, sous tension constante, fonctionner en génératrice ou en moteur.

II.4.2.2. Hacheur réversible en tension

La tension appliquée à la charge peut prendre les valeurs $+V_s$ ou $-V_s$, ce qui permet, suivant la valeur du rapport cyclique, de donner une valeur moyenne de tension de sortie positive ou négative. En revanche, le courant doit rester de signe constant dans la charge, car les interrupteurs ne sont pas réversibles. Le schéma de principe de l'hacheur réversible en tension est donné par la figure (II.37).

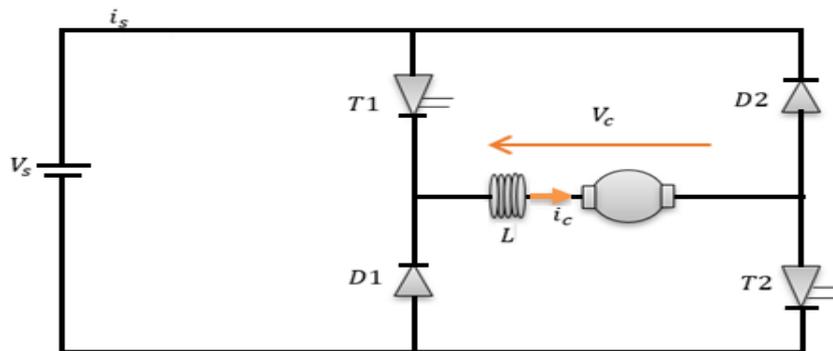


Figure (II.37) : Schéma de Principe d'un hacheur réversible en tension

La charge est formée par une machine à courant continu en série avec une inductance, destiné à limiter l'ondulation de courant dans la machine. La machine fonctionne sous un courant toujours de même signe.

II.4.2.3. Hacheur réversible en tension et en courant

On reprend la structure de l'hacheur réversible en tension que nous venons de donner en remplaçant les interrupteurs par des interrupteurs réversibles en courant. Dans ce cas, le courant dans la charge peut changer de signe. Comme pour l'hacheur simplement réversible en courant, ce sera la diode ou le transistor qui sera passant, suivant le signe du courant dans l'interrupteur. On obtient donc la structure représentée dans la figure (II.38).

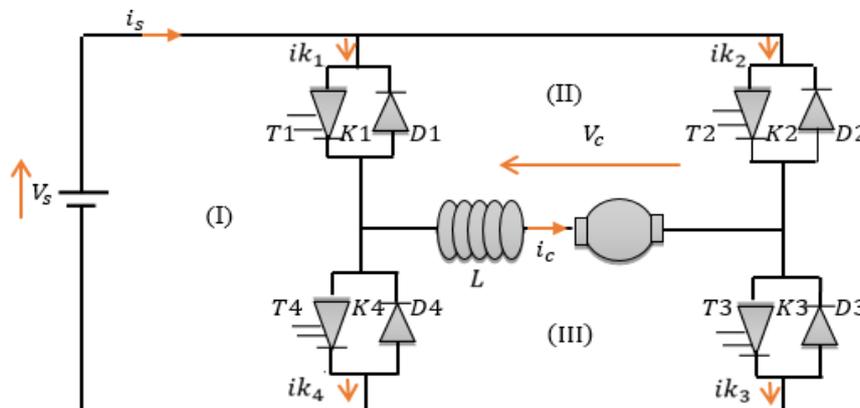


Figure (II.38) : Schéma de principe de l'hacheur réversible en tension et en courant

Cette fois, la tension moyenne de sortie et le courant moyen de sortie peuvent être positifs ou négatifs. Source et charge peuvent avoir leurs régimes inversés suivant le signe de ces grandeurs.

Conclusion

L'hacheur est un convertisseur continu-continu, dont les grandeurs de sortie dépendent essentiellement du fonctionnement de l'interrupteur statique, en pratique cet interrupteur est semi-conducteur commandable.

L'hacheur est un moyen simple pour réaliser un réglage de vitesse des machines à courant continu par variation de la tension à sa sortie.

Chapitre II

Association machine à
courant continu-
hacheur série

III.1. Introduction

Pour faire varier la vitesse d'un moteur à courant continu on varie la tension d'alimentation à ses bornes. Pour atteindre cet objectif nous avons visé la commande MLI d'un hacheur série (hacheur BUCK), cette dernière permet la variation de la tension moyenne aux bornes de notre moteur est par la suite la variation de la vitesse de rotation. On parle alors de **PWM (Pulse Width Modulation)** ou Modulation par Largeur d'Impulsions (MLI).

Dans ce chapitre, nous allons simuler les circuits des hacheurs série et le régulateur PID dans la commande MLI pour varier la vitesse d'un moteur à courant continu.

III.2. Partie théorique

III.2.1. Commande MLI intersectée

Comparaison de deux signaux l'un de faible fréquence avec un autre de haute fréquence le signal de faible fréquence est appelé la référence et c'est l'image du signal que l'on veut reproduire au niveau de puissance (alimentation du moteur). Le signal de haute fréquence est appelé porteuse généralement triangulaire, sa fréquence définit la fréquence de commutation du composant de puissance [23].

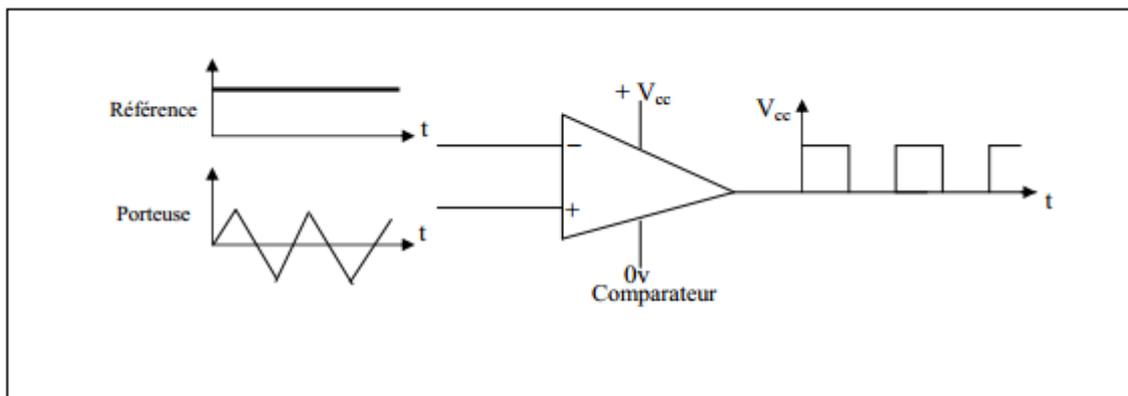


Figure (III.01) : Réalisation du signal MLI Intersectée [24]

III.2.2. Régulation PID en de vitesse

La commande proportionnel-intégral-dérivé (PID) est insérée dans la chaîne directe de l'asservissement, en série avec le processus, comme indiqué dans la **Figure (III.02)**. Ce régulateur élabore à partir du signal d'erreur (t) une commande $U_c(t)$ en fonction de trois actions proportionnelle, intégrale, dérivée [25].

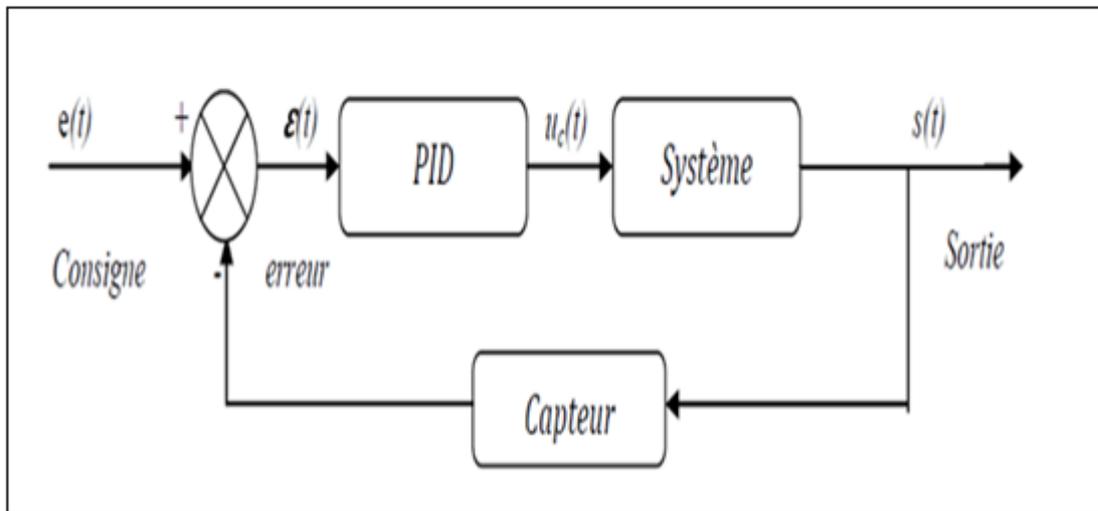


Figure (III.02) : Schéma bloc d'un système avec correcteur (Boucle fermée)

➤ Equation de régulateur PID

$$U_c(t) = K_p \varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \tag{III.01}$$

$$= K_p \varepsilon(t) + K_i \int_0^t \varepsilon(t) dt + K_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \tag{III.02}$$

$$\rightarrow U_c = K_p \varepsilon(p) + K_i \frac{d\varepsilon(p)}{p} + K_d \varepsilon(p)p \tag{III.03}$$

K_p : gain d'action proportionnelle.

$K_i = 1/T_i$: gain d'action intégrale.

$K_d = T_d$: gain d'action dérivée.

T_i : constante de temps, dite temps d'action intégrale.

T_d : constante de temps, dite temps d'action dérivée.

Le régulateur PID est donc conçu dans le domaine temporel comme la somme des trois actions. On obtient alors un asservissement composé d'un terme proportionnel, un terme intégral et un terme dérivé, mises en parallèle, on parle d'asservissement PID :

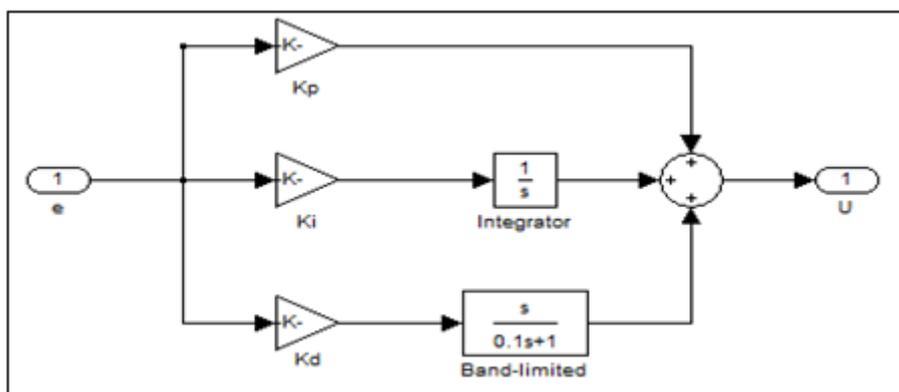


Figure (III.03) : Schéma bloc du correcteur P.I.D parallèle

Coefficients	Temps de montée	Temps de stabilisation	Dépassement	Erreur Statique
K_p	Diminue	Augmente	Augmente	Diminue
K_i	Diminue	Augmente	Augmente	Elimine
K_d	Chang. Faible	Diminue	Diminue	Chang. Faible

Tableau (III.01) : Récapitulatif des paramètres P.I.D

III.2.2.1. Réglage des paramètres

Régler un régulateur PID consiste à agir sur les 3 paramètres des différentes actions (gain du proportionnel, gain de l'intégral, gain de la dérivée) sur des valeurs optimales pour obtenir la réponse adéquate en précision, rapidité, stabilité et robustesse en sortie du procédé. Pour cela, il existe plusieurs méthodes de réglage, d'où on a opté pour la méthode de réglage dite de "Ziegler-Nichols", introduite par John G. Ziegler et Nathaniel B. Nichols. Dans ce cas on utilise la méthode de "Ziegler-Nichols".

➤ **Méthode de la courbe de réaction**

Cette méthode est basée sur la modélisation d'indicielle du processus en boucle ouverte, d'où seulement les processus simples sont utilisés, le principe est d'enregistrer la courbe de réponse du système non régulé à un échelon puis en déduire la valeur des coefficients par analyse de la réponse ("lecture graphique"), ainsi mettre le système hors ligne. C'est pour cette raison que cette méthode n'est pas très utilisée dans l'industrie.

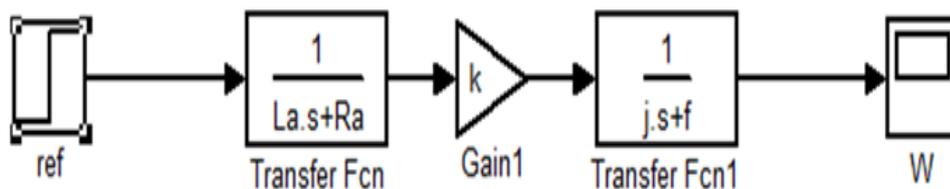


Figure (III.04) : Schéma fonctionnel moteur à courant continu en boucle ouvert

- Calcule la fonction de transfert en boucle ouvert (FTBO)

$$FTBO = \frac{\omega(t)}{U(t)} = \frac{K}{(La.s+Ra)(j.s+f)} \tag{III.04}$$

$$FTBO = \frac{K}{Ra \cdot f \cdot s^2 \cdot \left(\frac{j \cdot La}{Ra \cdot f}\right) + s \cdot \left(\frac{La \cdot f + j \cdot Ra}{Ra \cdot f}\right) + 1} \tag{III.05}$$

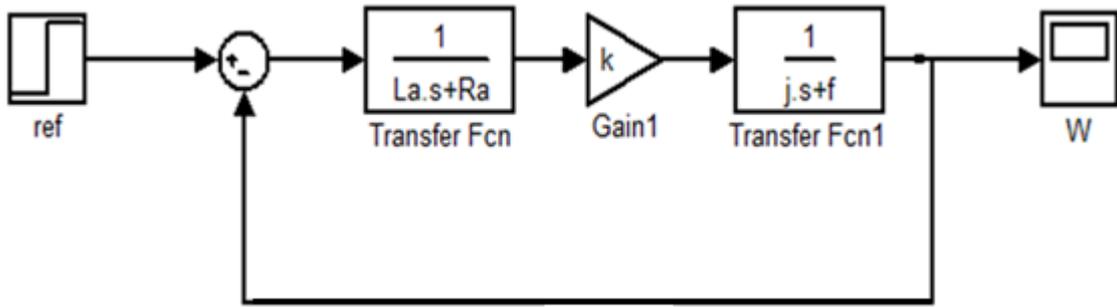


Figure (III.05) : Schéma fonctionnel moteur à courant continu en boucle fermée

- Calcule la fonction de transfert en boucle fermée (FTBF)

$$FTBF = \frac{\omega(t)}{U(t)} = \frac{\frac{K}{(La.s+Ra)(j.s+f)}}{1+k\frac{K}{(La.s+Ra)(j.s+f)}} = \frac{k}{La.j.s^2 + (La.s+Ra.j).s + Ra.f+k^2} \tag{III.06}$$

$$FTBF = \frac{K}{Ra.f+k^2} \frac{1}{s^2 \cdot \left(\frac{j.La}{Ra.f+k^2}\right) + s \cdot \left(\frac{La.f+j.Ra}{Ra.f+k^2}\right) + 1} \tag{III.07}$$

- Paramètre du moteur à courant continu

R _a	L _a	L _{af}	R _f	L _f	J	B _m	T _f
2.581	0.028	0.9483	281.3	156	0.02215	0.002953	0.5161

Tableau (III.02) : Paramètre du moteur à courant continu

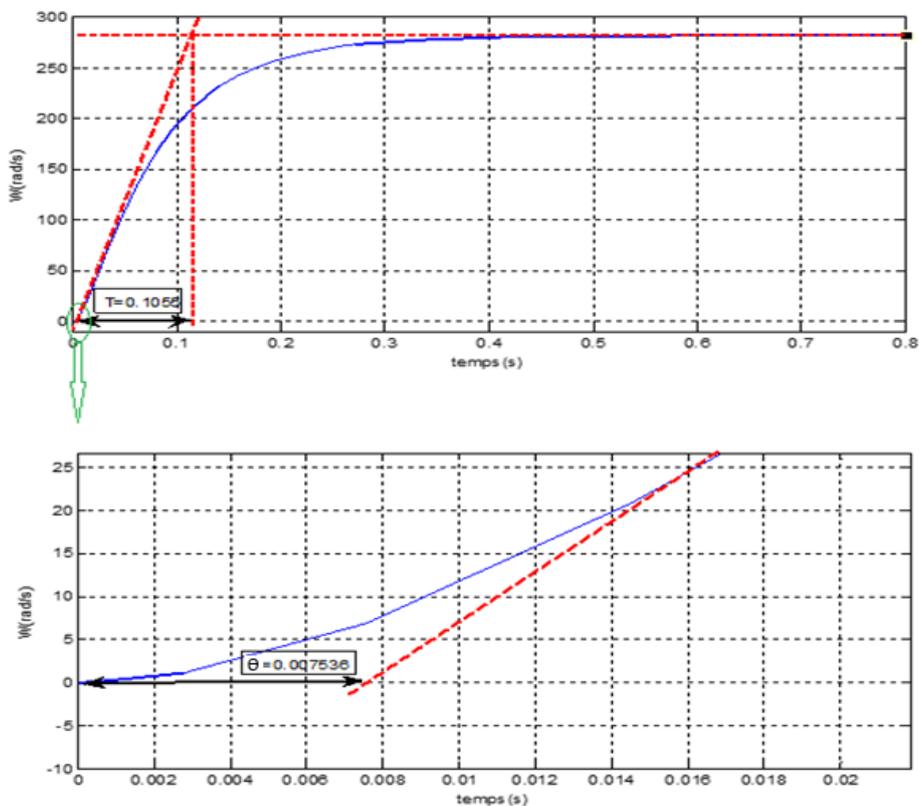


Figure (III.06) : Identification des paramètres de fonction de transfert

	K_p	K_i	K_d
P	$\frac{T}{\theta}$	0	0
PI	$0.9 \frac{T}{\theta}$	$\frac{\theta}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{\theta}$	2θ	0.5θ

Tableau (III.03) : Paramètres du régulateur par la méthode courbe de réaction de Ziegler-Nichols [17]

➤ Calcule des paramètres de régulateur PID

On a :

$$T=0.1055 \text{ s.}$$

$$\theta =0.007536 \text{ s.}$$

A partir de tableau :

$$K_p = 1.2 \frac{T}{\theta} = 16.8 \tag{III.08}$$

$$K_i = 2\theta = 0.0151 \tag{III.09}$$

$$K_d = 0.5\theta = 0.0038 \tag{III.10}$$

III.2.3. Etude de la boucle en courant (régulation du courant)

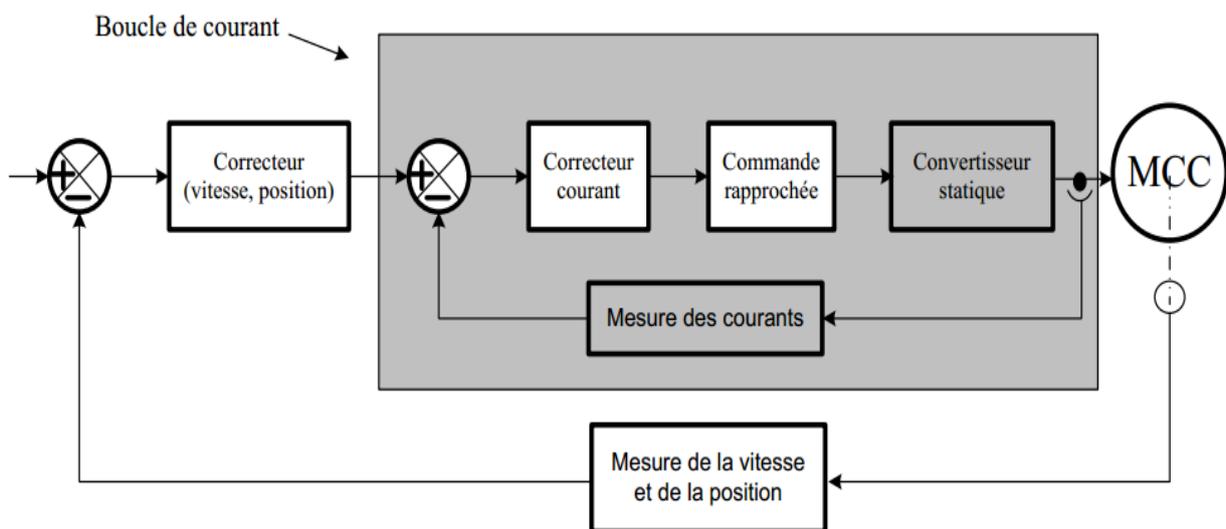


Figure (III.07) : Structure de boucle de courant [9]

On utilise dans la chaîne de régulation des amplificateurs à courant continu et à grand gain (correcteur de courant). Pour la boucle de courant, le schéma synoptique et le suivant :

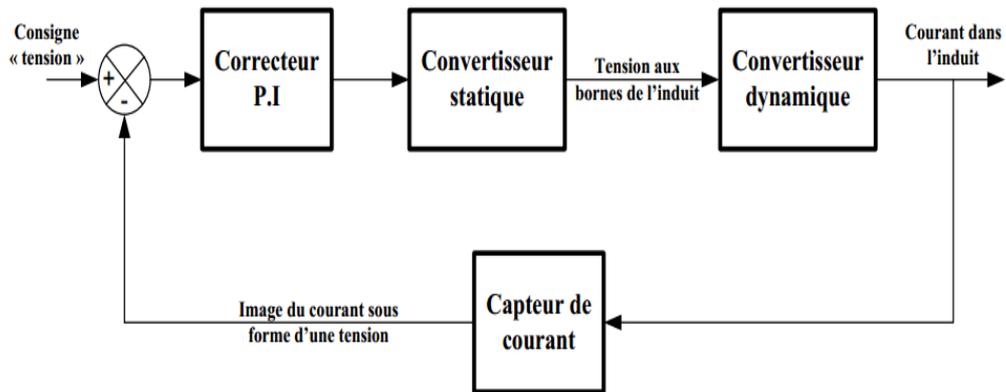


Figure (III.08) : Synoptique de la boucle du courant

III.2.3.1. Mesure du courant

Il existe plusieurs capteurs pour mesurer le courant parmi ces capteurs on peut utiliser soit un shunt soit un transformateur ou un capteur à effet Hall. Dans les deux premiers cas l'image du courant est obtenue sous forme d'une tension, soit alors : $U_{\text{image}} = mI_a$.

Pour le capteur à effet Hall ils utilisent la tension de l'effet Hall pour nous donner une image du courant qui traverse un conducteur, et sa fonction de transfert est de la forme.

➤ Fonction de transfert de capteur effet hall en boucle fermée

$$G_{\text{Hall}}(s) = \frac{U_H(s)}{I_h(s)} = \frac{K_{\text{Hall}}}{1+sT_{\text{Hall}}} \quad (\text{III.11})$$

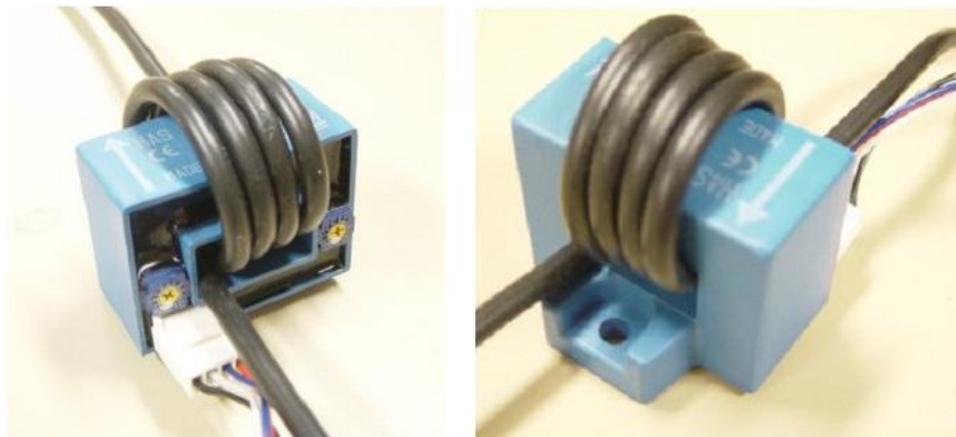


Figure (III.09) : Capteur à effet Hall

III.3. Partie de simulation

Le logiciel MATLAB/SIMULINK, est un bon moyen d'étude du fonctionnement des machines à courant continu et d'autres types de machines également dans les conditions de fonctionnement voulues. Il nous permet d'observer de manière très proche de la réalité des phénomènes électriques et physiques (vitesse, courant) [2].

III.3.1. Simulation de la commande MLI intersectée

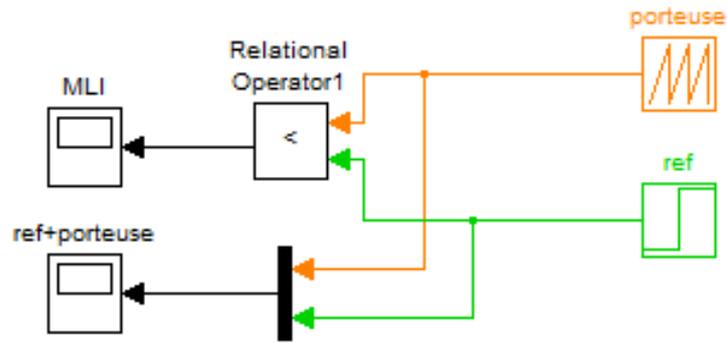


Figure (III.10) : Montage de commande MLI

$\alpha = 0.5, , f_{port} = 100 \text{ Hz}$

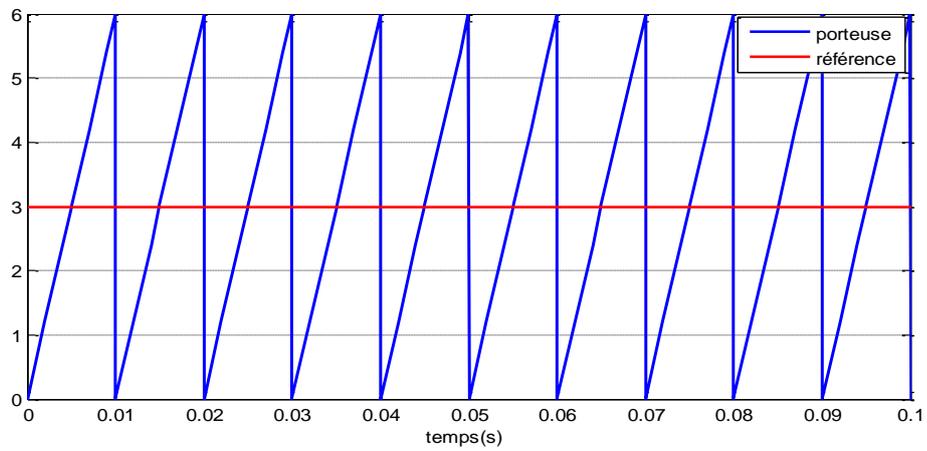


Figure (III.11) : Signal de porteuse et de référence

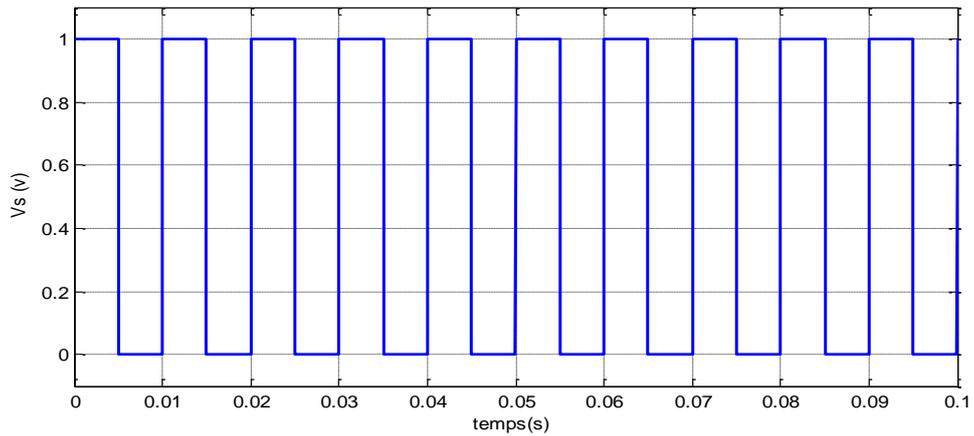


Figure (III.12) : Signal de commande MLI pour un rapport cyclique $\alpha = 0.5$

III.3.2. Simulation d'un hacheur série

III.3.2.1. Hacheur série avec charge R.L

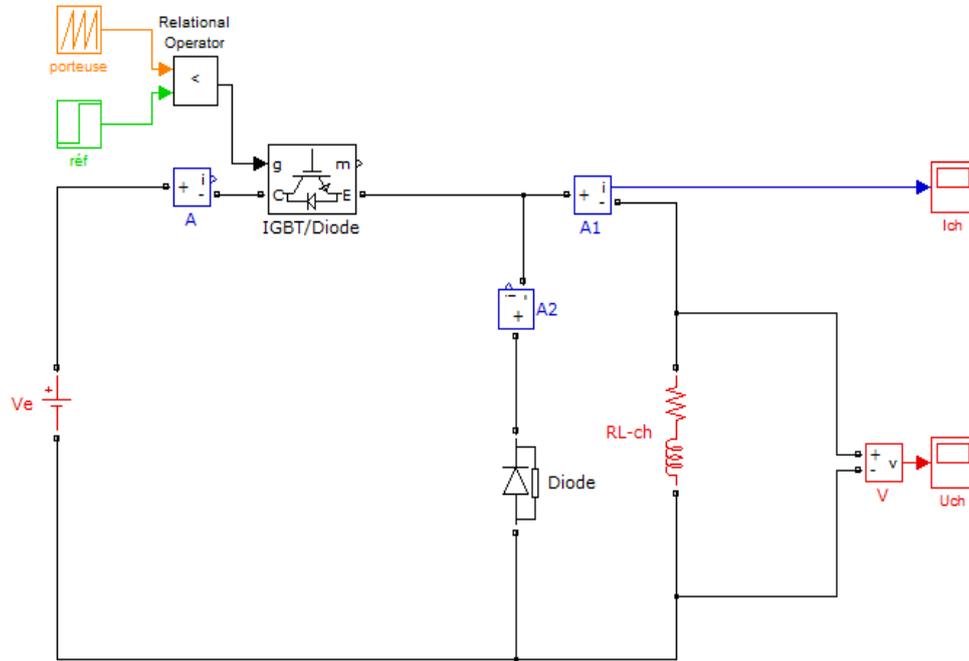


Figure (III.13) : Montage hacheur série avec charge R.L

❖ Conduction continue

➤ Varier la valeur de référence

$R=20\Omega, L=1H, f_{port} = 100 \text{ Hz}$

$\alpha = 0.25$

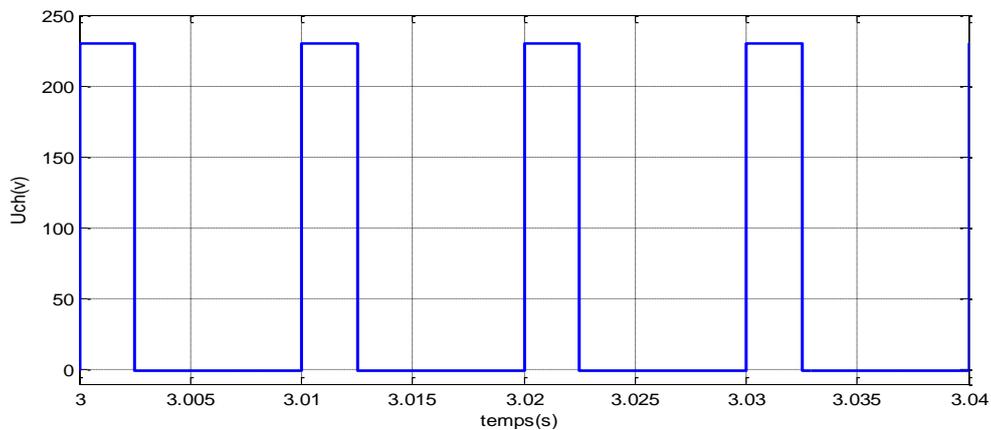


Figure (III.14) : Tension aux bornes du hacheur pour charge R.L

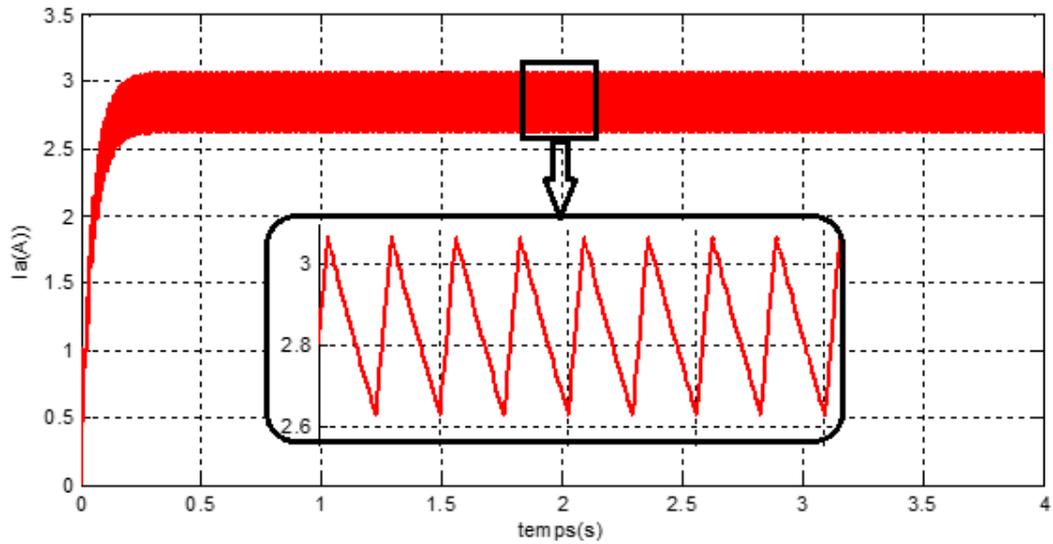


Figure (III.15) : Courant aux bornes du hacheur pour charge R.L

$\alpha = 0.5$

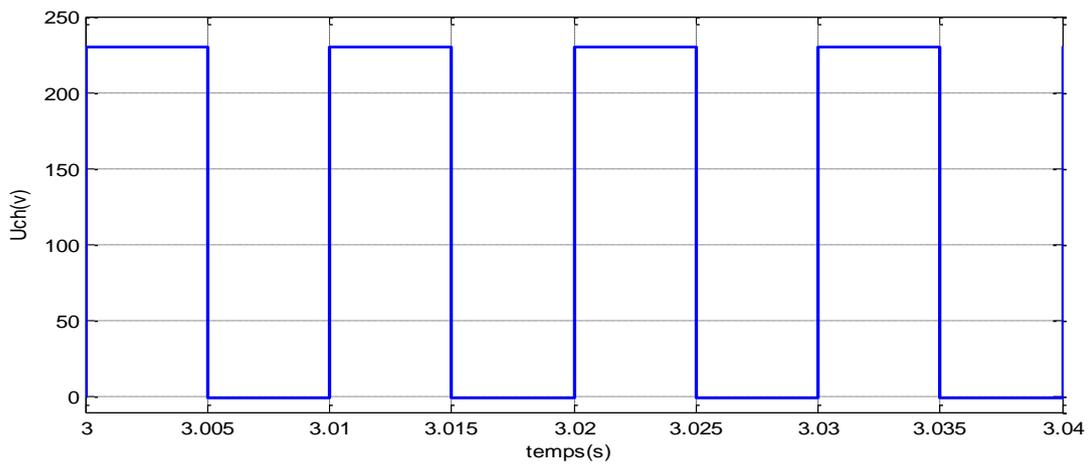


Figure (III.16) : Tension aux bornes du hacheur pour charge R.L

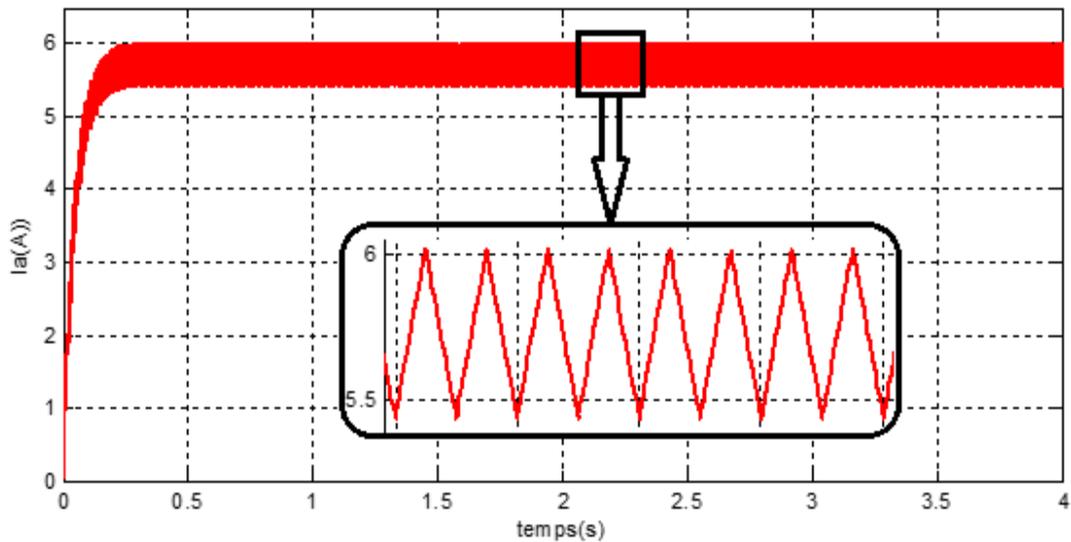


Figure (III.17) : Courant aux bornes du hacheur pour charge R.L

En faisant varier α on fait varier la durée de fermeture de l'interrupteur. Cette durée augmente avec l'augmentation du rapporte cyclique α .

La valeur de l'inductance et du rapport cyclique (α) ont des effets sur le temps de charge et de décharge de l'inductance à travers l'induit et sur la forme d'onde telle que $\Delta i = 0.577A$ pour $\alpha=0.5$ et $\Delta i = 0.433A$ pour $\alpha=0.25$.

La tension moyen $\overline{U_{ch}}$ varier entre 0 à V_e . La tension de sortie est toujours inférieure à la tension d'entrée ($\overline{U_{ch}} = \alpha V_e$).

➤ **Variation de la fréquence de porteuse**

$$f_{port} = 200 \text{ Hz}$$

$$\alpha = 0.5$$

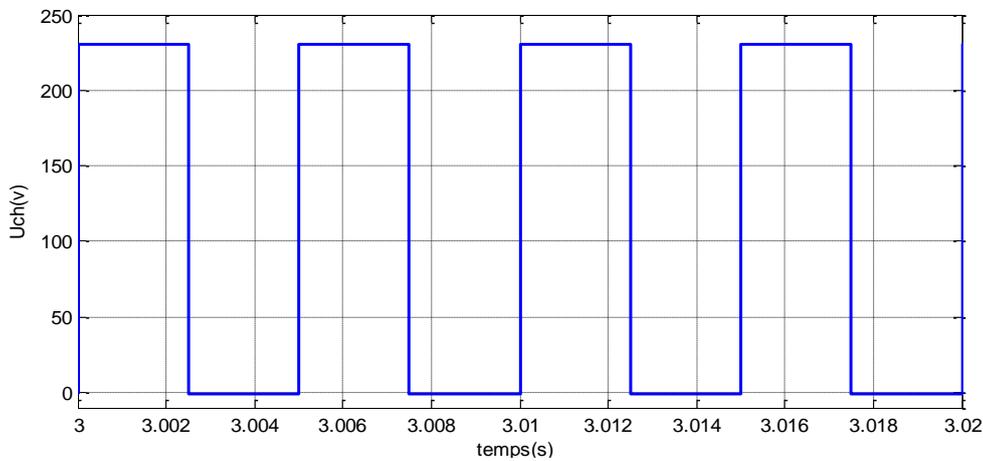


Figure (III.18) : Tension aux bornes du hacheur pour charge R.L

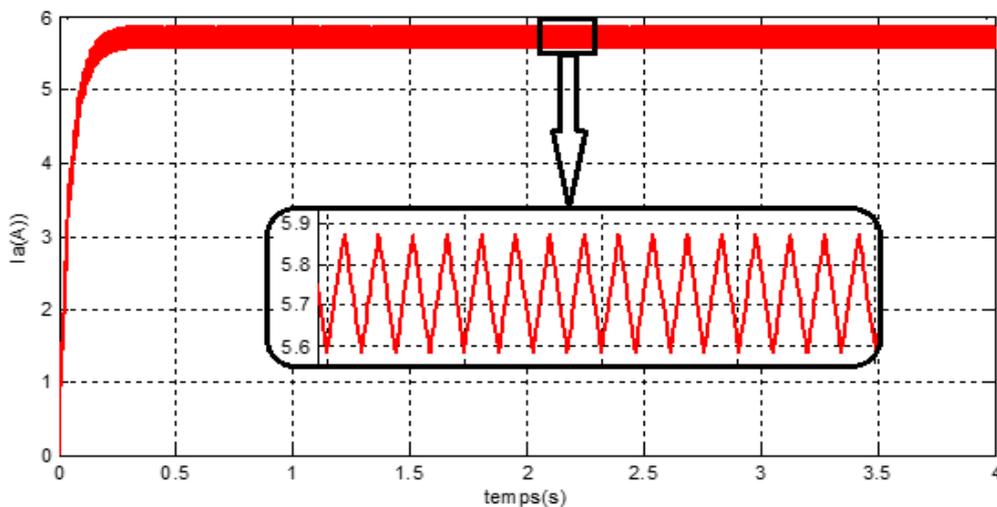


Figure (III.19) : Courant aux bornes du hacheur pour charge R.L

En faisant augmenter la fréquence de porteuse :

Le temps de fermeture de l'interrupteur est décroissant.

Le nombre des ondes de courant est augmenté et Δi décroissant pour $f_{port} = 100\text{Hz}$, $\Delta i = 0.577\text{A}$ et pour $f_{port} = 200\text{Hz}$, $\Delta i = 0.216\text{A}$.

❖ Conduction discontinue

$R=20\Omega$, $L=0.015\text{H}$.

$\alpha = 0.25$

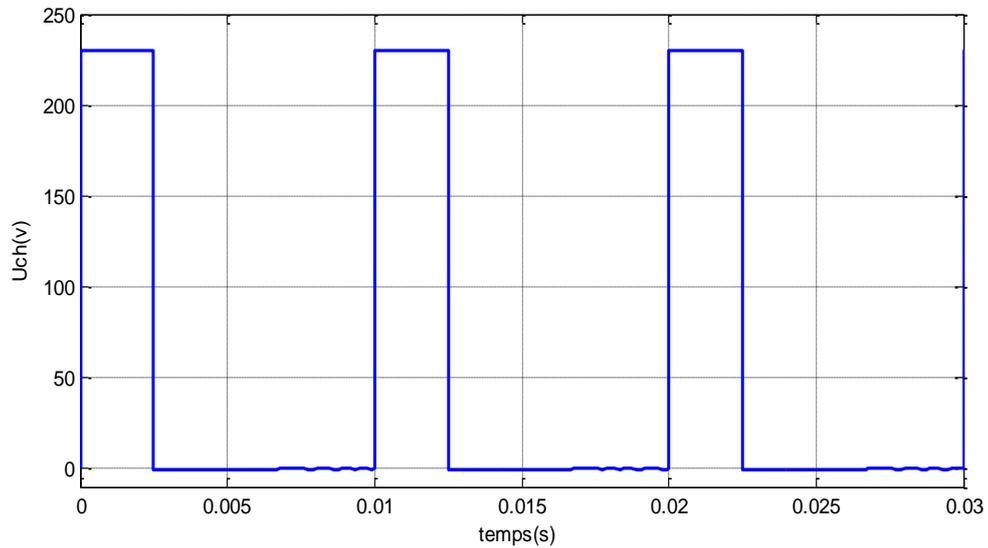


Figure (III.20) : Tension aux bornes du hacheur pour charge R.L

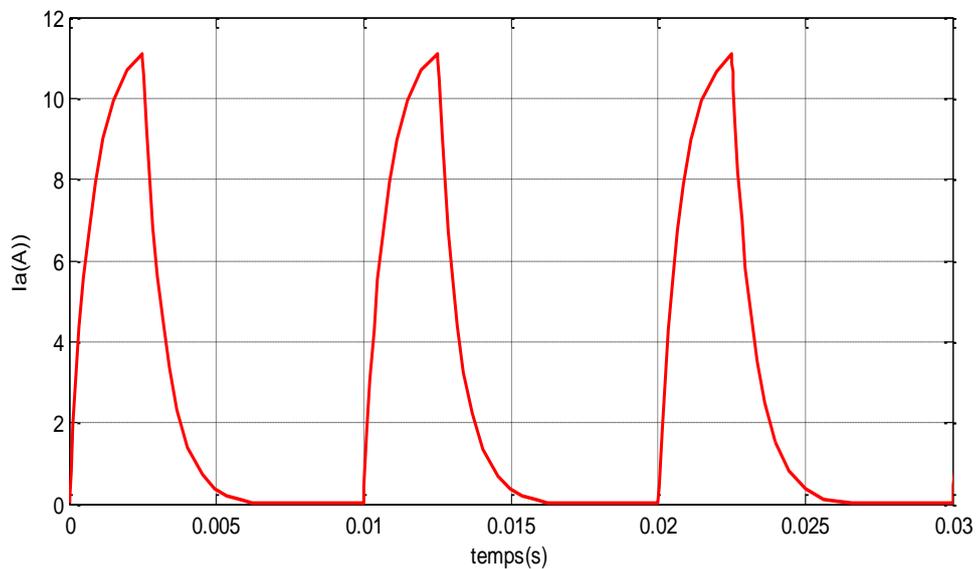
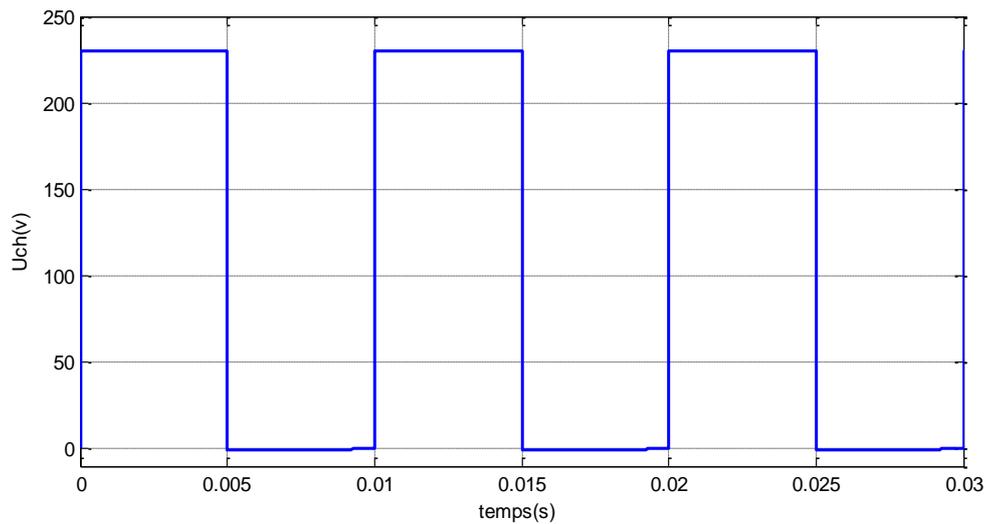
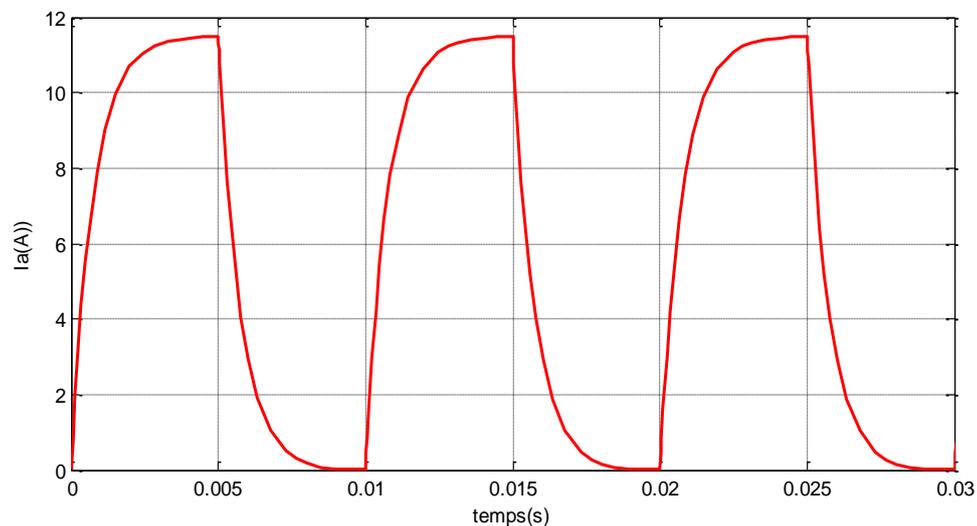


Figure (III.21) : Courant aux bornes du hacheur pour charge R.L

$\alpha=0.5$ **Figure (III.22) :** Tension aux bornes du hacheur pour charge R.L**Figure (III.23) :** Courant aux bornes du hacheur pour charge R.L

Le courant est croit pendant la fermeture de l'interrupteur avec ($i=i_{max}$) et décroit pendant l'ouverture de cet interrupteur jusqu'à la valeur ($i=i_{min}=0A$) avec $\Delta i = 11.09A$ pour $\alpha=0.25$ et $\Delta i = 11.48A$ pour $\alpha=0.5$.

III.3.2.2. Hacheur série avec charge R.L.E

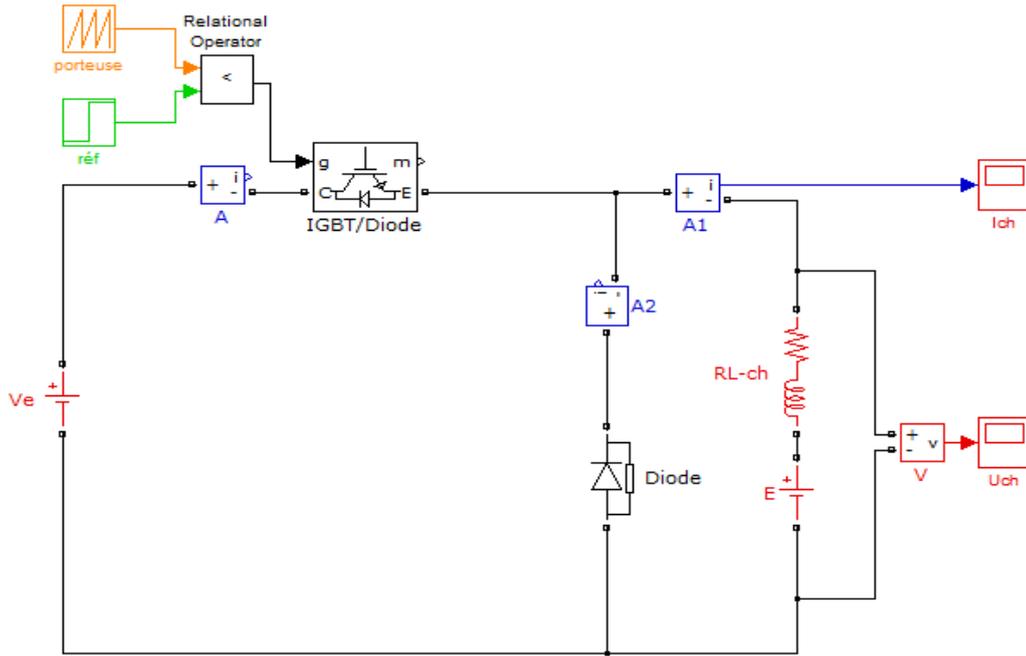


Figure (III.24) : Montage hacheur série avec charge R.L.E

❖ Conduction continue

$E=10V, R=20\Omega, L=1H$

$\alpha = 0.5$

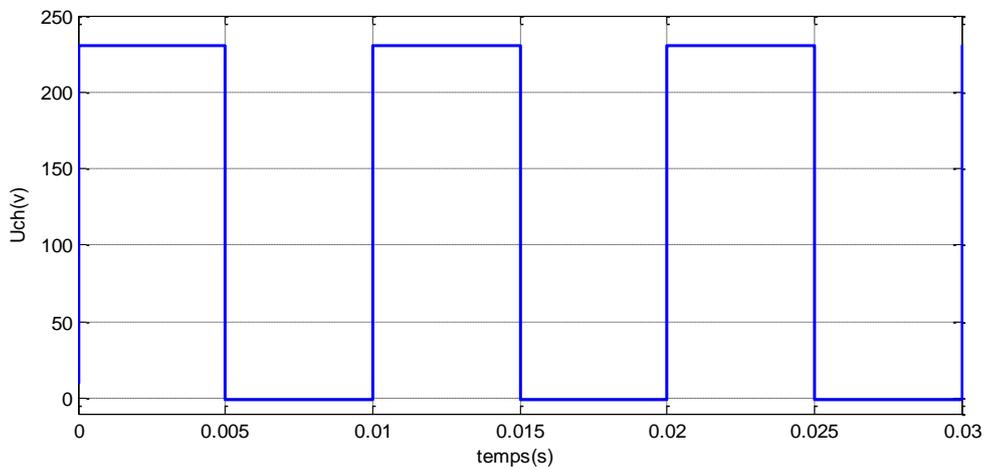


Figure (III.25) : Tension aux bornes du hacheur pour charge R.L.E

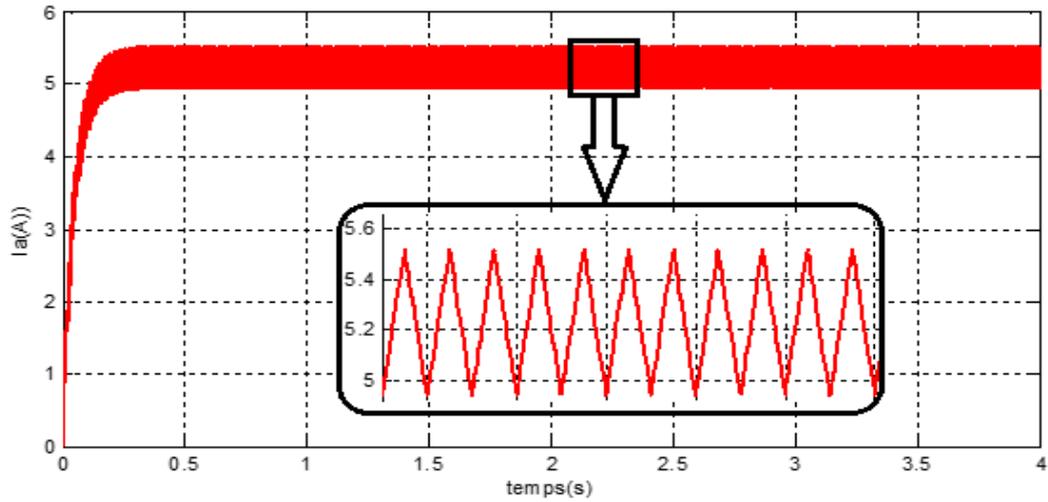


Figure (III.26) : Courant aux bornes du hacheur pour charge R.L.E

Le courant croit dans régime transitoire [0s 1.5s] et prend la forme triangulaire fixe en régime permanent $\Delta i = i_{max} - i_{min} = cst.$

La même remarque concernant la tension dans le cas de conduction continue (charge R.L).

❖ **Conduction discontinue**

$E=10V, R=20\Omega, L=0.015H$

$\alpha = 0.5$

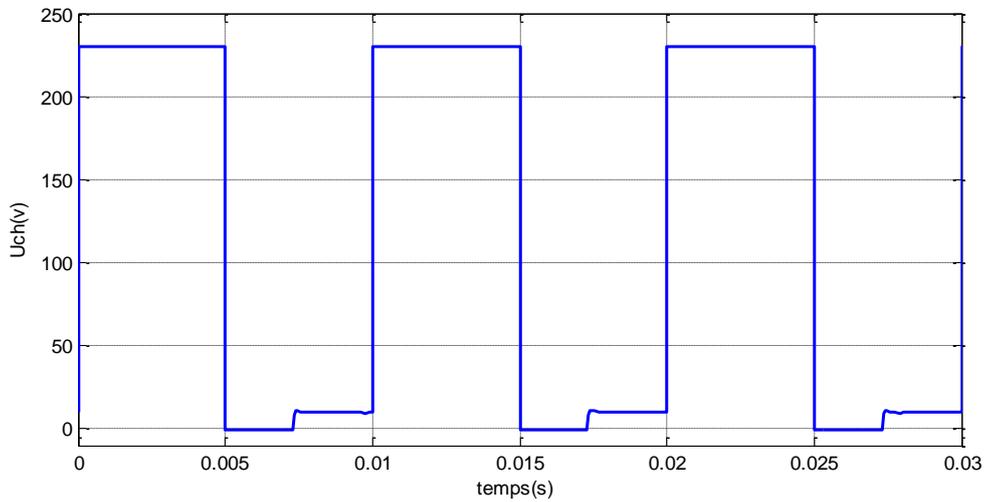


Figure (III.27) : Tension aux bornes du hacheur pour charge R.L.E

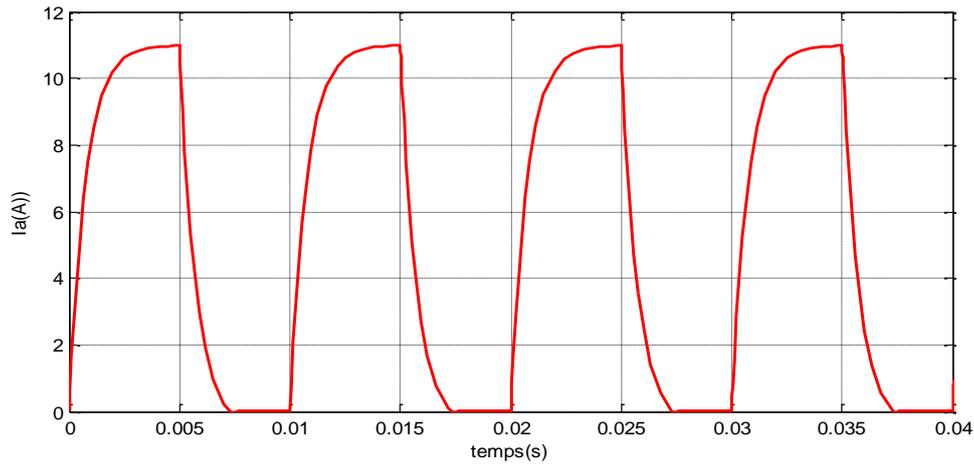


Figure (III.28) : Courant aux bornes du hacheur pour charge R.L.E

En voie ici l'apparition de la f.c.e.m E dans la forme de la tension aux bornes de la charge. Cela est dû à l'annulation du courant de charge.

Le courant croit pendant la fermeture de l'interrupteur avec ($i=i_{max}$) et décroît pendant l'ouverture de cet interrupteur jusqu'à la valeur ($i=i_{min}=0A$) et $\Delta i = 10.99A$.

Lorsque l'interrupteur est ouvert la tension U_{ch} est égal la valeur de E .

III.3.2.3 Hacheur série-MCC à vide

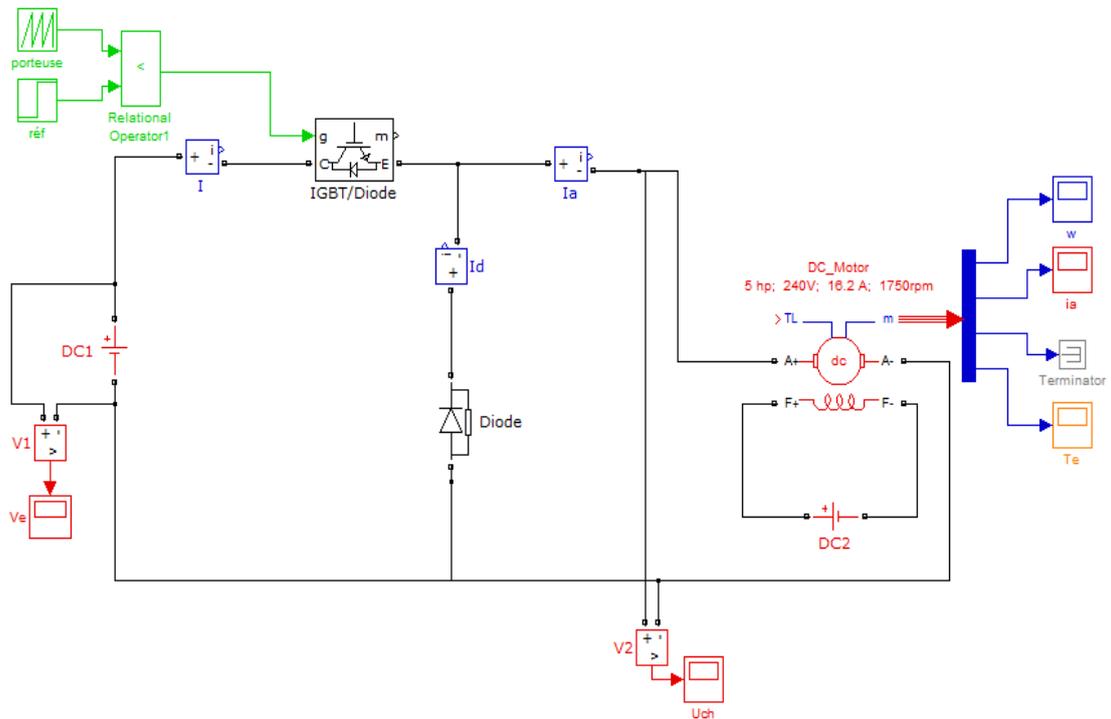


Figure (III.29) : Hacheur série associer à un moteur à courant continu

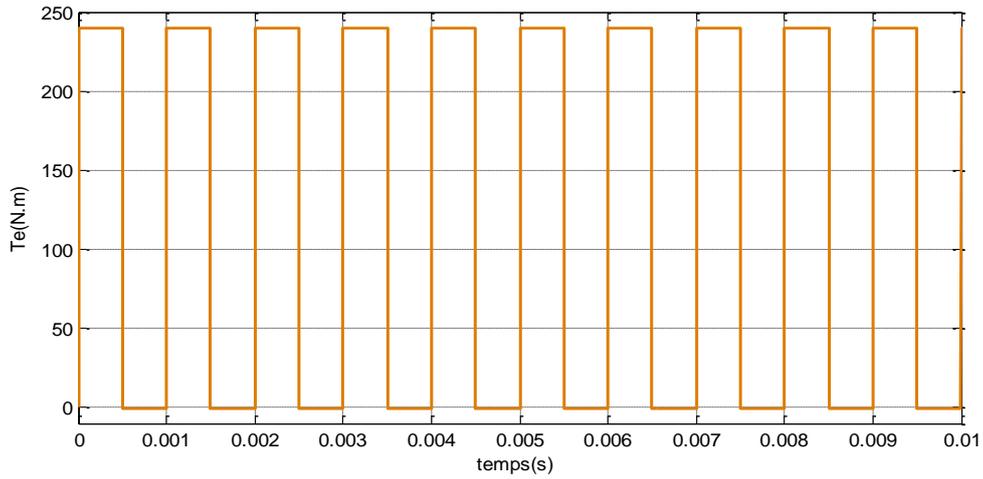


Figure (III.30) : Tension de sortie avec un rapport cyclique de 50%

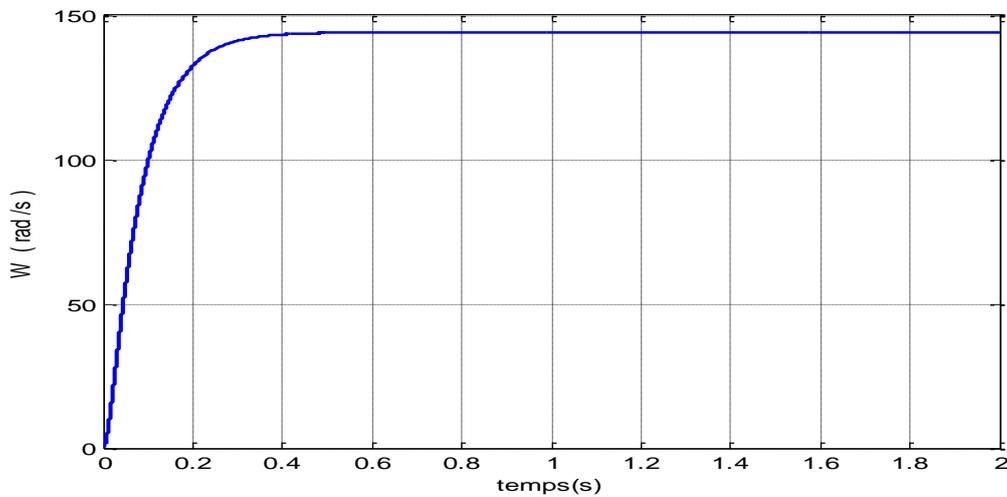


Figure (III.31) : Vitesse de moteur à vide avec un rapport cyclique de 50 %

La Vitesse commence de zéro pour se stabiliser à 144.1 rad/s, qui est la vitesse du régime établie. La courbe à une forme exponentielle, ce qui correspond à la présence de phénomènes transitoires des courants dans les enroulements de la machine.

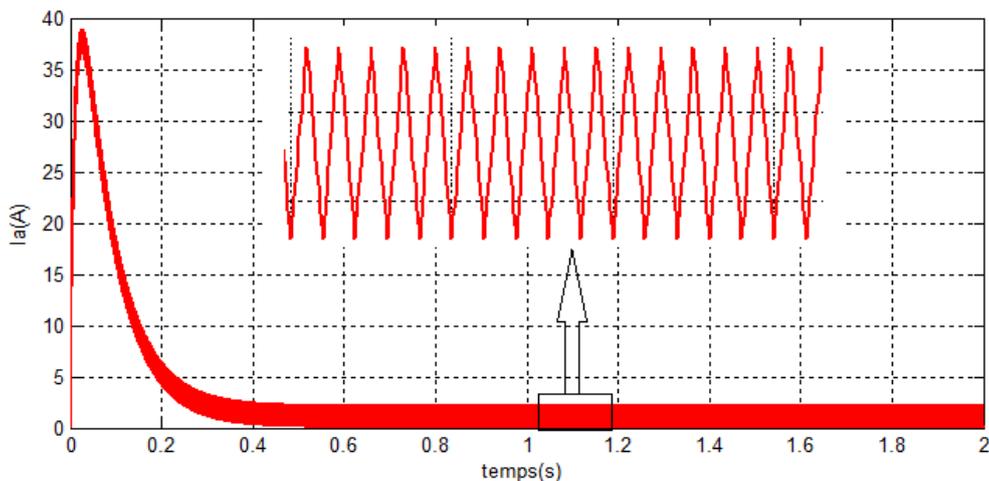


Figure (III.32) : Courant de moteur à vide avec un rapport cyclique de 50 %

Le moteur démarre avec un courant de démarrage important de l'ordre 38.43 A plus de deux fois le courant nominal, puis passe du régime transitoire ou régime établi pour se stabiliser autour de 0.09A (pas de charge mécanique).

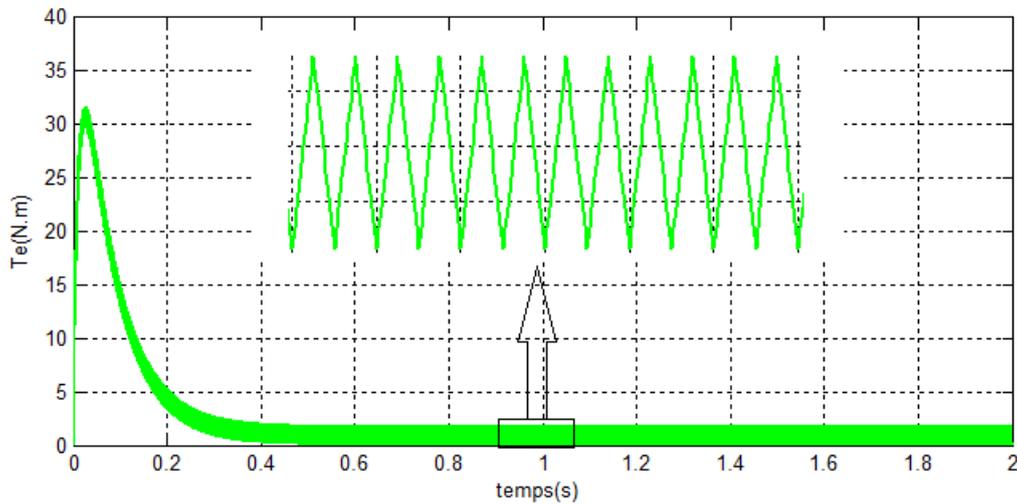


Figure (III.33) : Couple de moteur à vide avec un rapport cyclique de 50 %

Le moteur démarre avec un couple de démarrage important de l'ordre 31.46 N.m, puis passe du régime transitoire ou régime établi pour se stabiliser autour de 0.07N.m, il prend la forme du courant.

III.3.2.4. Hacheur série-MCC en charge

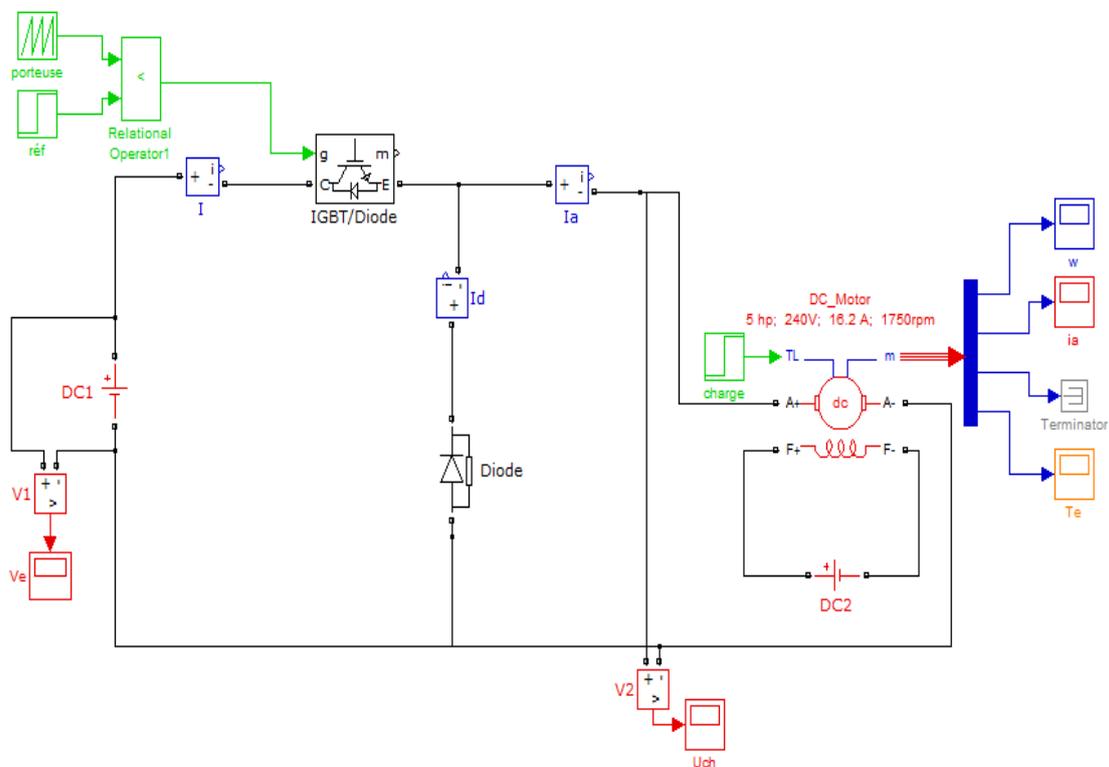


Figure (III.34) : Hacheur série associé à un moteur à courant continu en charge

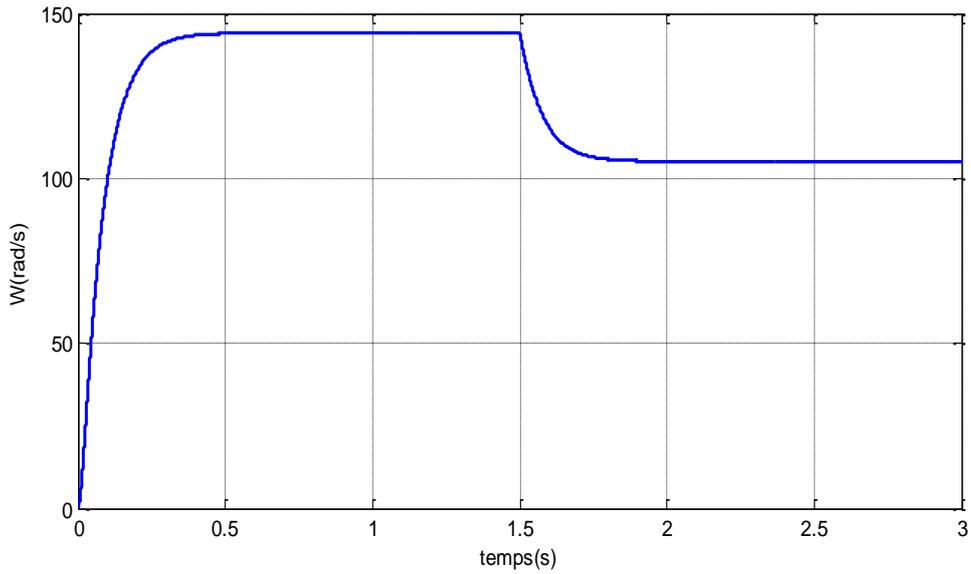


Figure (III.35) : Vitesse du moteur en charge avec un rapport cyclique de 50 %

Au régime établi à l’instant $t=1.5$ s nous appliquons un couple de charge sur le moteur de 10N.m, la vitesse va décroître pour se stabiliser à 105.1 rad/s.

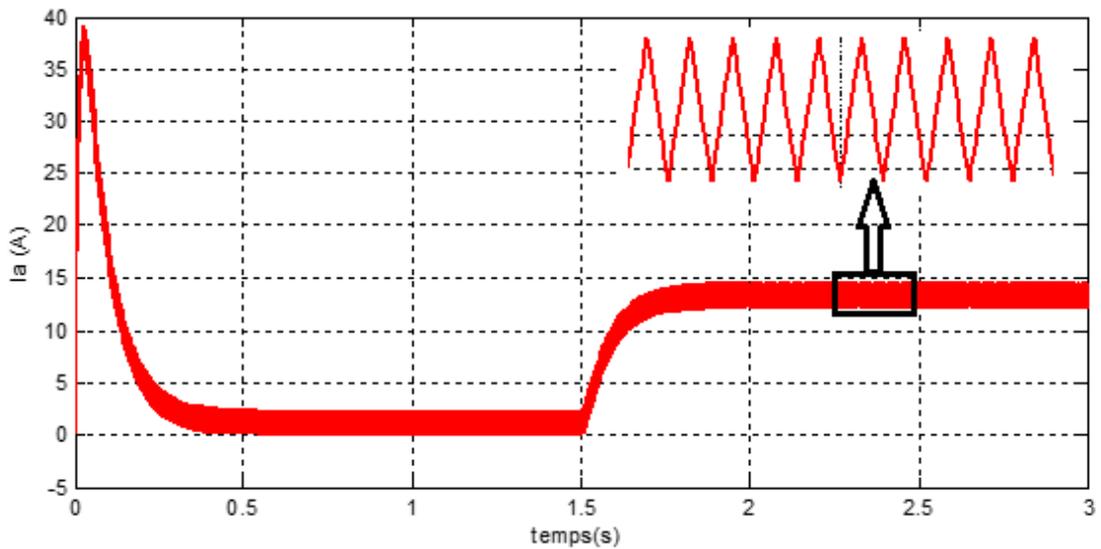


Figure (III.36) : Courant du moteur en charge avec un rapport cyclique de 50 %

Au régime établi à l’instant $t=1.5$ s à cause du couple de charge appliqué au moteur, le courant augmente pour se stabiliser à la valeur moyenne 12.31 A.

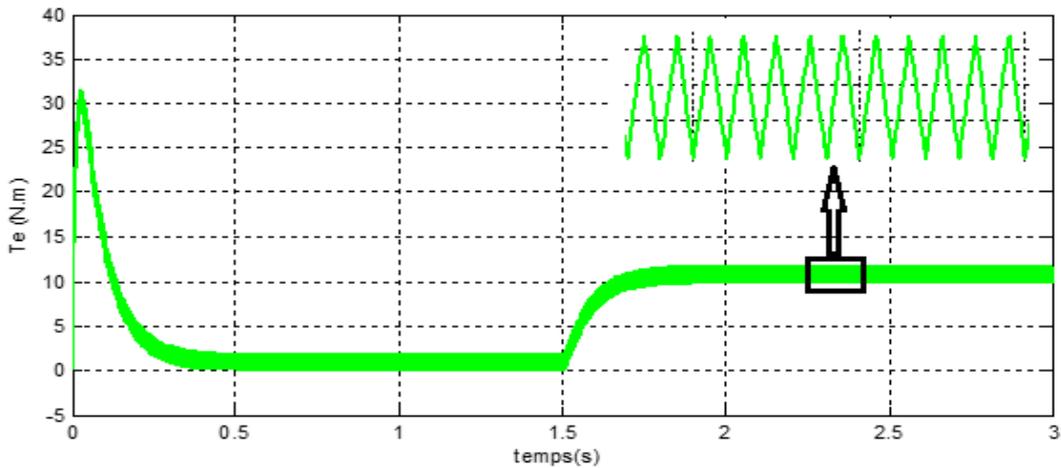


Figure (III.37) : Couple du moteur en charge avec un rapport cyclique de 50 %

À cause du couple de charge appliqué au moteur, le couple augmente pour se stabiliser à la valeur moyenne 9.94 N.m. Il a toujours la même forme que le courant.

III.3.3. Régulateur PID parallèle

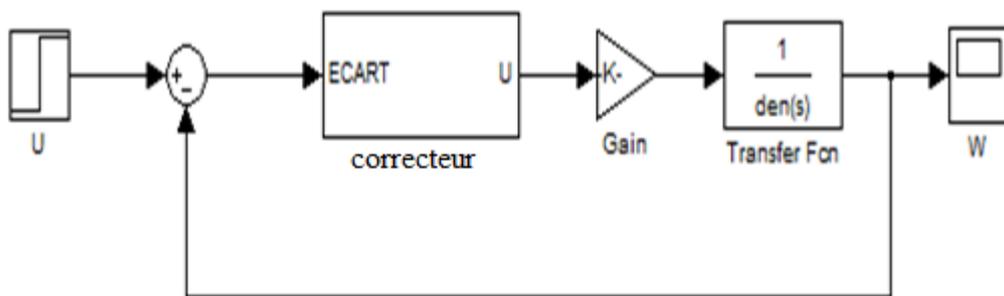


Figure (III.38) : Schéma fonctionnel du système par correcteur

- Cas de régulateur proportionnel

Dans la figure suivante, il sera présenté le graphe d’une régulation en vitesse Figure (III.40) pour les différentes valeurs du gain ‘ K_p ’, en fixant $K_i=K_d=0$:

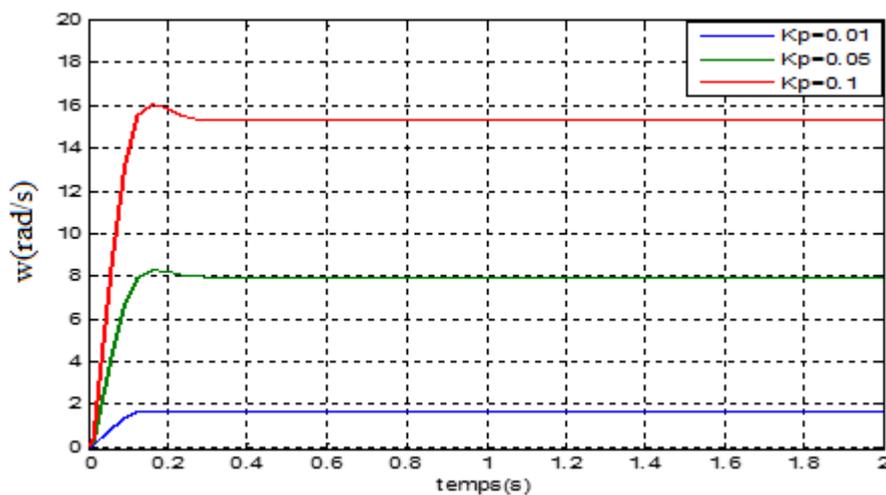


Figure (III.39) : Modélisation sous Matlab de l’effet proportionnel sur la vitesse

D'après cette figure en voie que l'erreur statique à augmente avec l'augmentation de K_p ainsi que le dépassement et le temps de monté ou ils sont tous les deux au maximum pour $K_p=0.1$.

- **Cas de régulateur proportionnel-intégral**

Dans la figure suivante, il sera présenté le graphe d'une régulation en vitesse **Figure (III.41)** pour les différentes valeurs du gain ' K_i ', en fixant $K_p=0.1$ et $K_d=0$

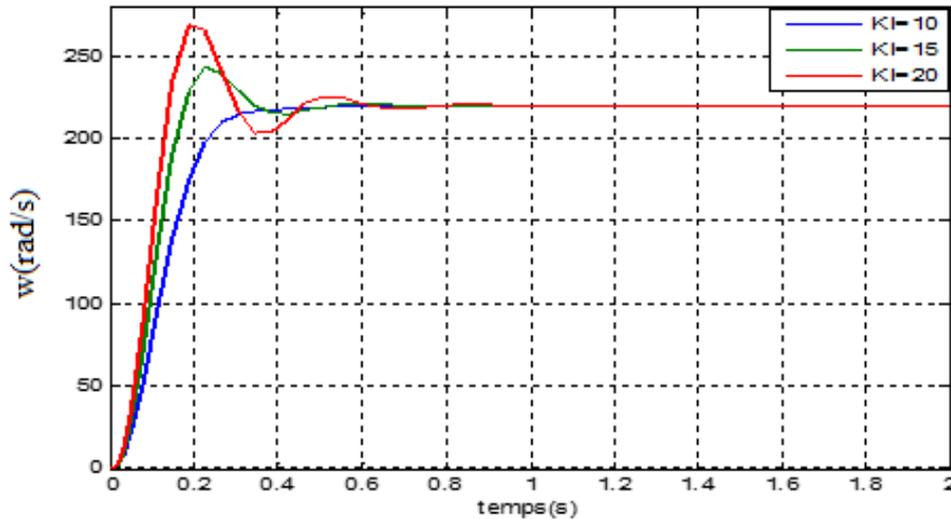


Figure (III.40) : Modélisation sous Matlab de l'effet intégral du correcteur PI sur la vitesse

On voit cette fois-ci que le terme intégral a bien fonctionné et que l'erreur statique est nulle. On constate aussi que plus le gain ' K_i ' est grand plus le temps de montée diminue. En revanche, plus ' K_i ' est grand, plus le système oscille et plus le dépassement est grand.

- **Cas de régulateur proportionnel-intégral-dérivée**

Dans la figure suivante, il sera présenté le graphe d'une régulation en vitesse **Figure (III.39)** pour les différentes valeurs du gain ' K_d ', en fixant $K_p=0.1$ et $K_i=30$

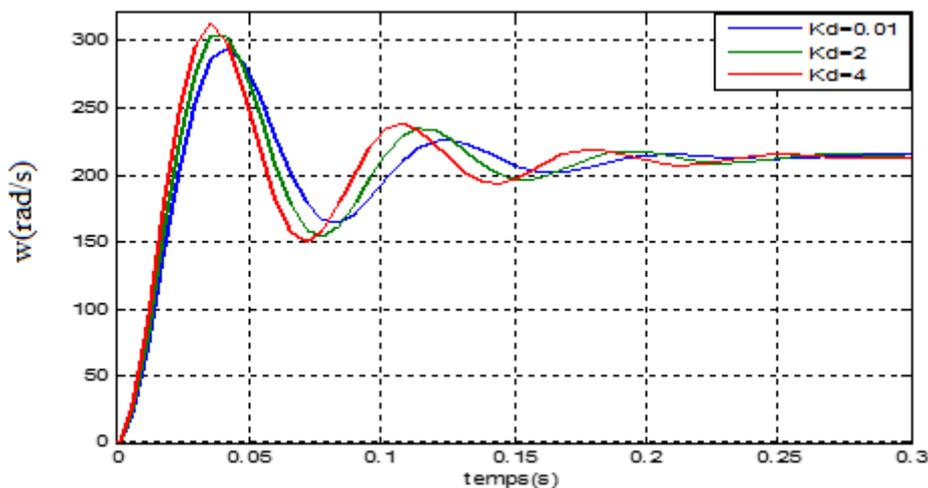


Figure (III.41) : Modélisation sous Matlab de l'effet dérivé du correcteur PID sur la vitesse

On remarque si on augmente l'action dérivée K_d il y a une augmentation dans les dépassements et le temps de montée du système.

III.3.4. Association MCC avec la boucle de régulation de vitesse

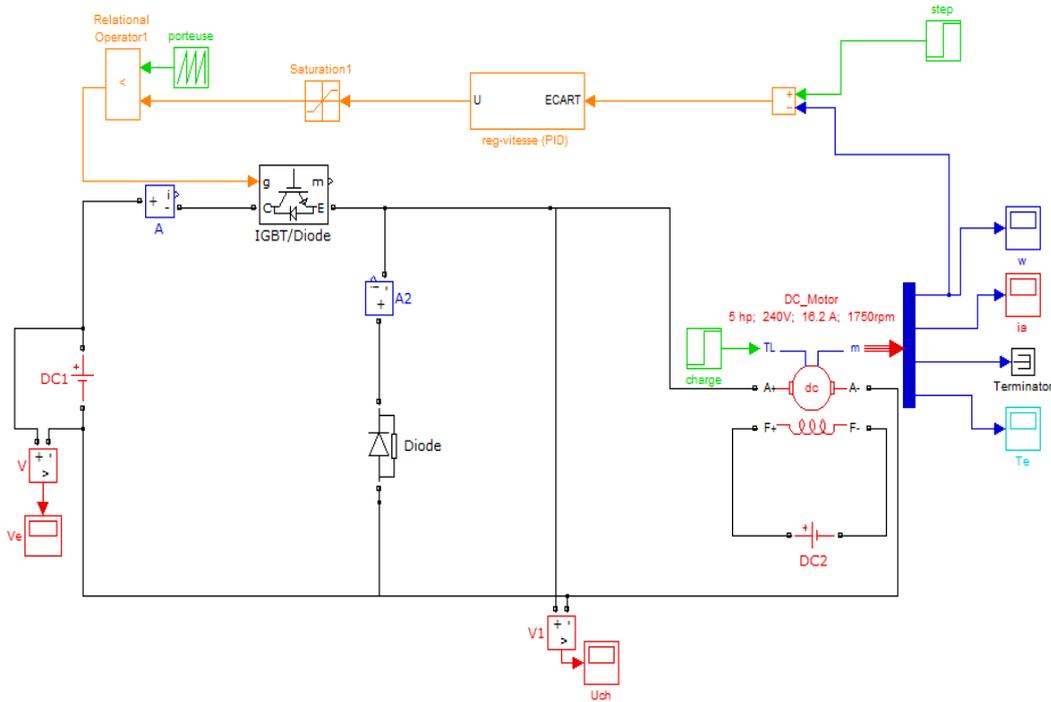


Figure (III.42) : Schéma de simulation de l'association MCC-Convertisseur en introduisant la boucle de régulation de vitesse

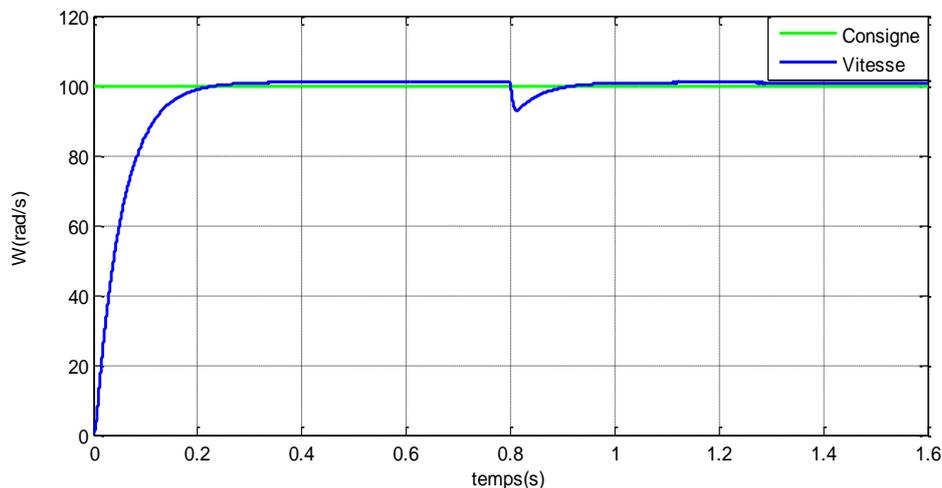


Figure (III.43) : Vitesse de moteur avec régulateur de vitesse

La Vitesse parte de zéro pour se stabiliser 100.8 rad/s, qui est la vitesse en régime établie. A l'instant $t=0.8$ nous appliquons un couple de charge sur le moteur de 35N.m. A cet instant la vitesse diminue à 92.57rad/s puis revienne pour se stabiliser à 100.8 rad/s. Cela est dû à l'effet du régulateur pour maintenir la vitesse plus proche de la consigne.

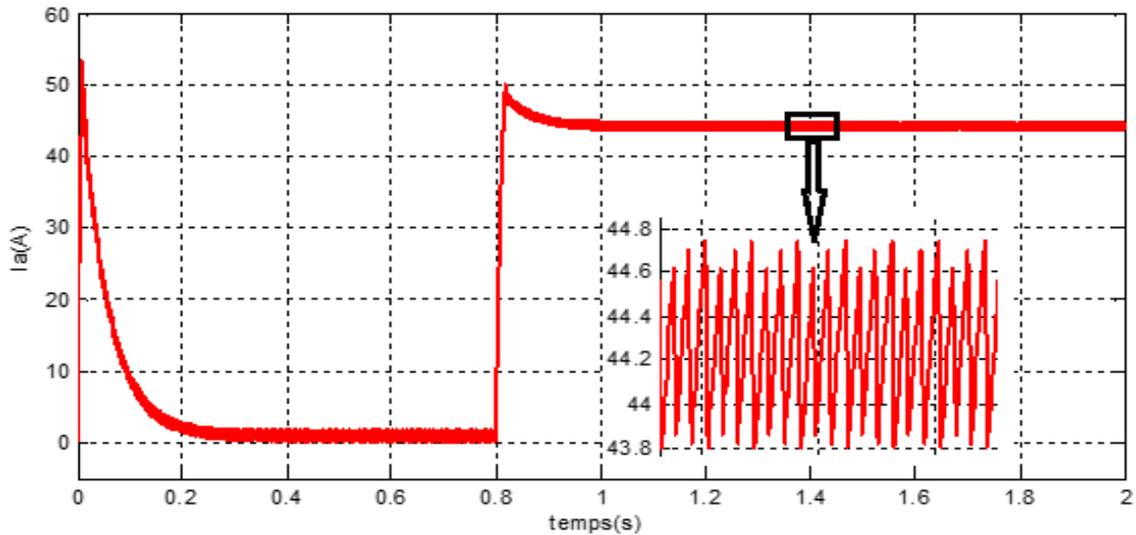


Figure (III.44) : Courant de moteur avec régulateur de vitesse

Le moteur démarre avec un courant de démarrage important de l'ordre 53.41A, puis passe du régime transitoire ou régime établi pour se stabiliser autour de 0.29 A. A l'instant $t=0.8s$ nous appliquons un couple de charge sur le moteur de 35N.m. Le courant augmente à 50 A dans le régime transitoire, puis passe au régime établi pour se stabiliser autour de 43.8A.

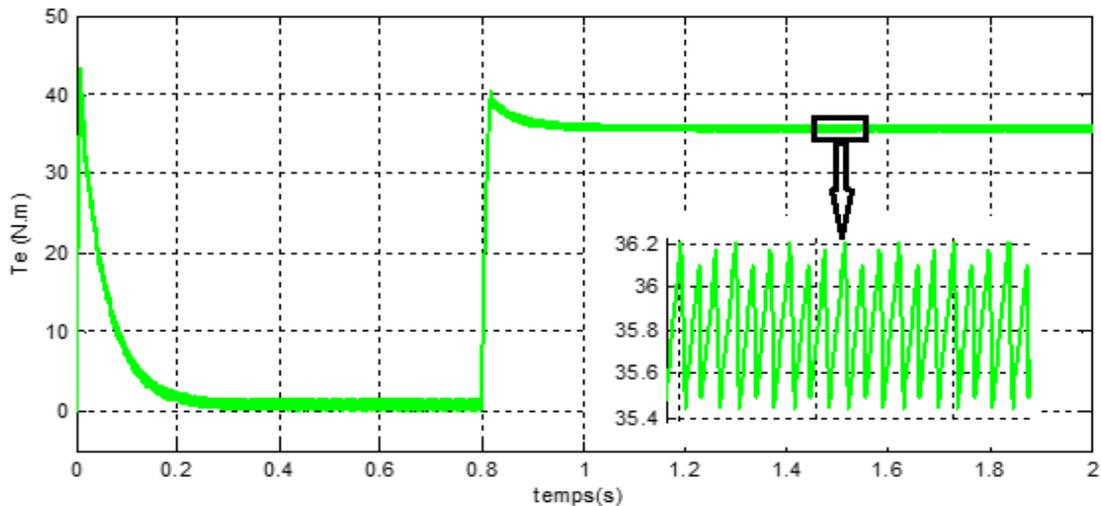


Figure (III.45) : Couple de moteur avec régulateur de vitesse

Le moteur démarre avec un couple de démarrage important de l'ordre 43.21 N.m, puis passe du régime transitoire ou régime établi pour se stabiliser autour de 0.23N.m. A l'instant $t=0.8s$ nous appliquons un couple de charge sur le moteur 35N.m, après le régime transitoire il passe au régime établi pour se stabiliser autour de 35.45N.m. Il a la même forme du courant.

Remarque

Pour éliminer les ondulations de courant on peut utiliser deux méthodes, soit une inductance de lissage ou ajouter une boucle de régulation du courant.

III.3.5. Effet de l'association d'une inductance de lissage en série avec le MCC

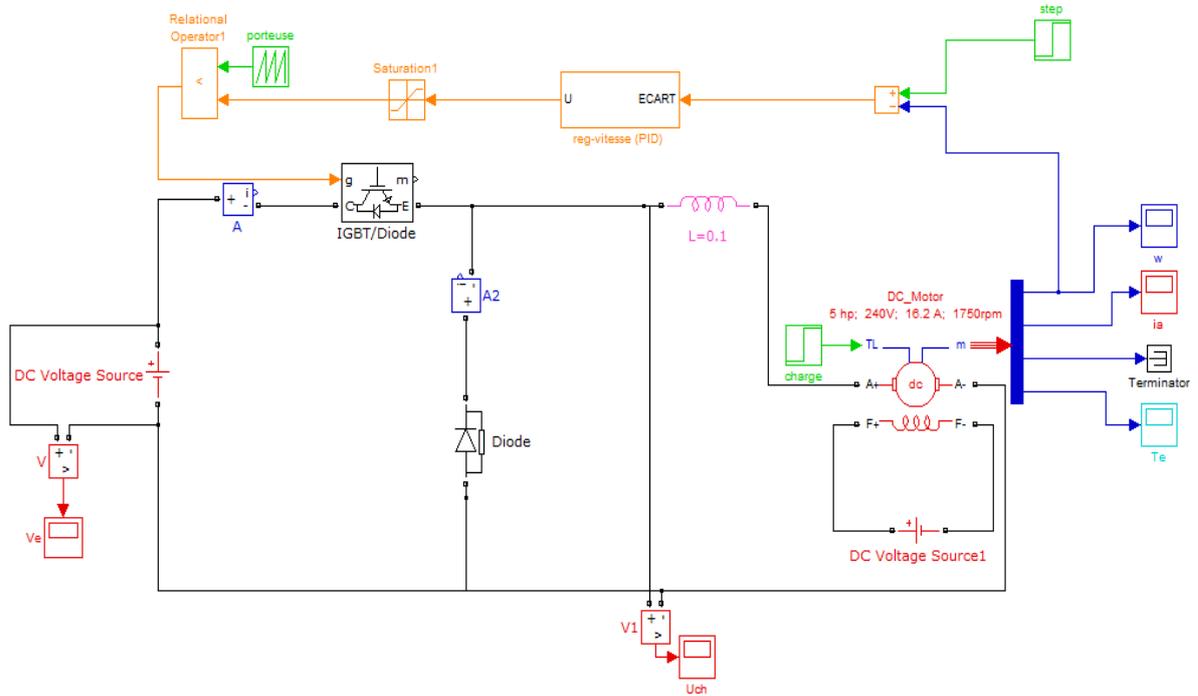


Figure (III.46) : Schéma de simulation de l'association inductance de lissage au MCC avec la régulation de vitesse

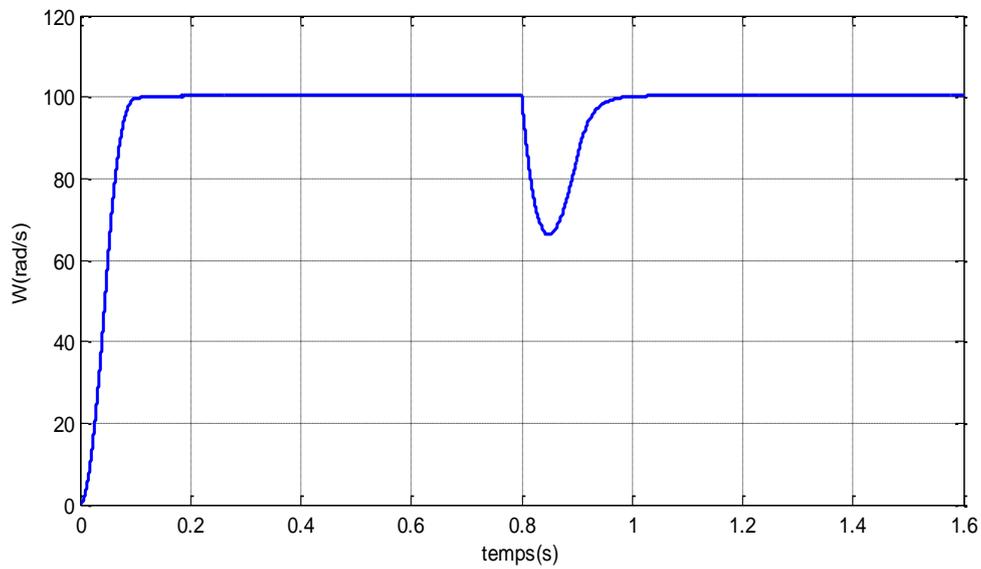


Figure (III.47) : Vitesse de moteur avec application d'un couple de charge à l'instant 0.8s

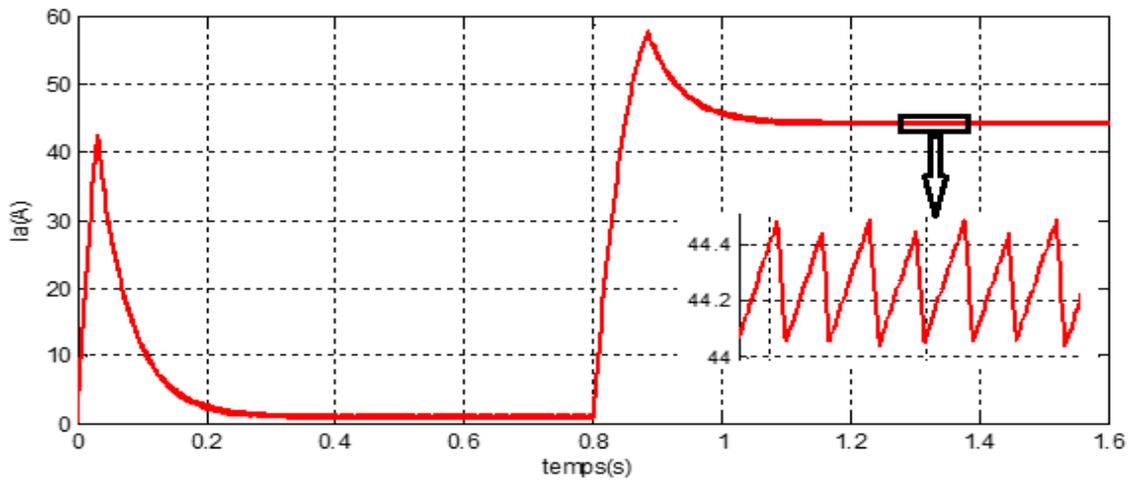


Figure (III.48) : Courant de moteur avec application d'un couple de charge à l'instant 0.8s

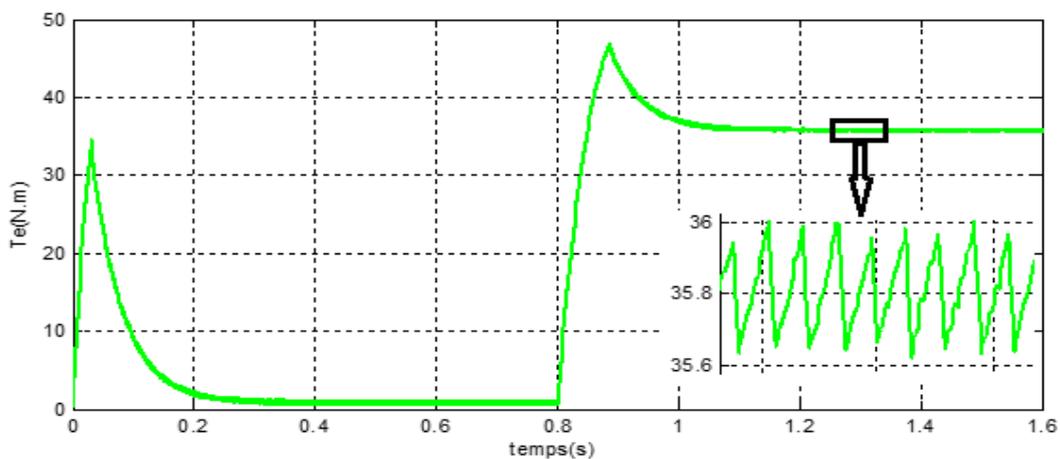


Figure (III.49) : Couple de moteur avec application d'un couple de charge à l'instant 0.8s

En voie bien qu'après l'ajout de l'inductance de lissage les ondulations du courant en régime établi ont diminué et le couple à la même forme que le courant.

III.3.6. L'effet de la boucle de régulation de courant sur le courant

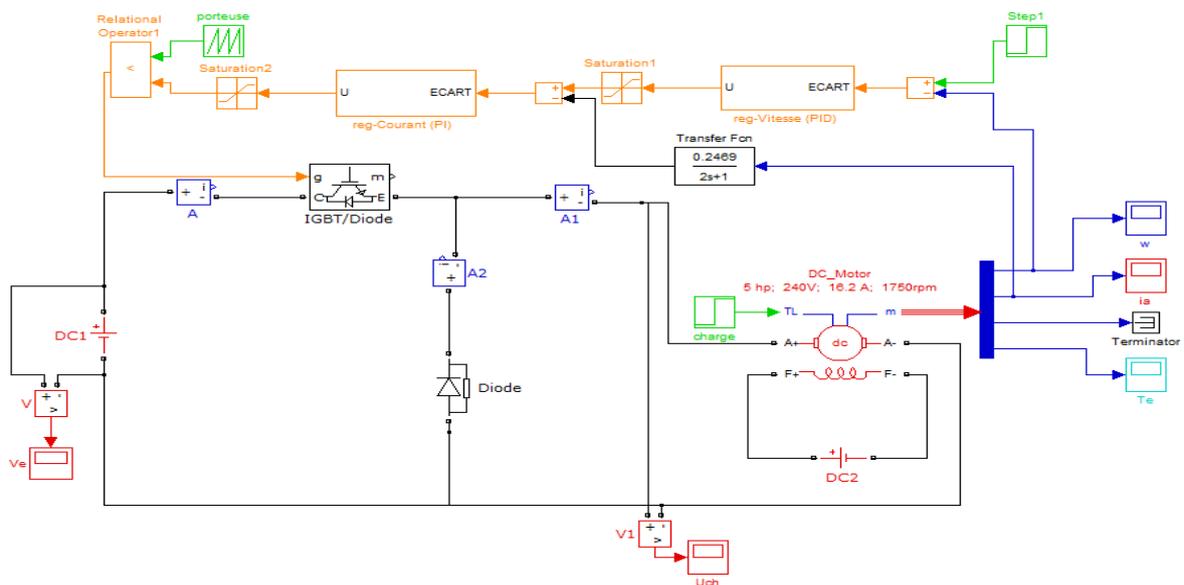


Figure (III.50) : Association MCC en boucle de régulation de vitesse et de courant

Remarque : le bloc de saturation traduit le fait que la tension ou le courant que l'on souhaite appliquer au moteur ne peut pas dépasser la tension ou le courant d'alimentation de notre système (par exemple 220V et 16A) ou ne pas dépasser la vitesse de rotation que peut supporter le moteur ou les accessoires attacher.

Lorsque le système arrive en saturation, cela veut dire que :

- Le régulateur est mal réglé.
- La consigne d'entrée est trop importante donc le moteur ne peut pas suivre.
- L'axe du moteur est arrêté pour une raison quelconque donc la commande augmente pour corriger l'erreur (sans y arriver).

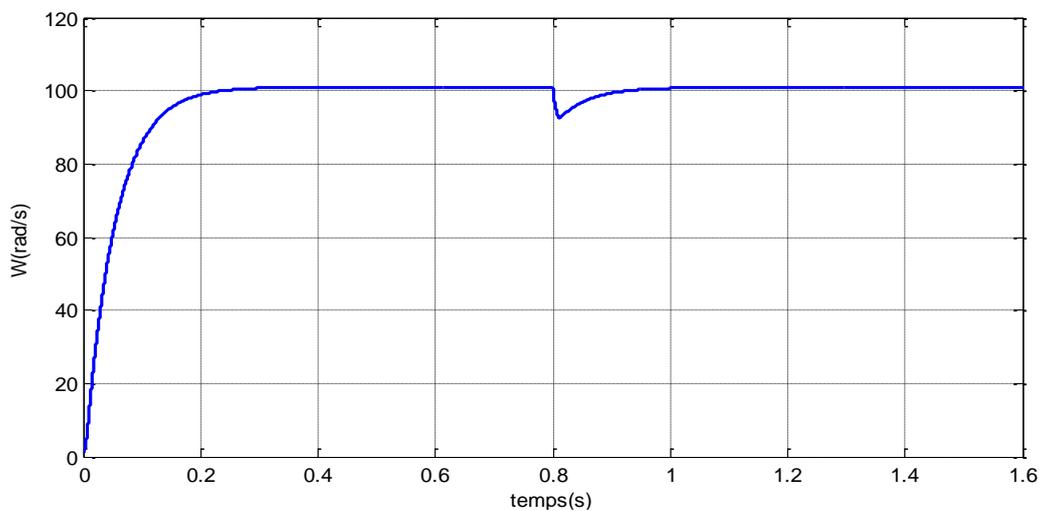


Figure (III.51) : Vitesse de moteur avec application d'un couple de charge à l'instant 0.8s

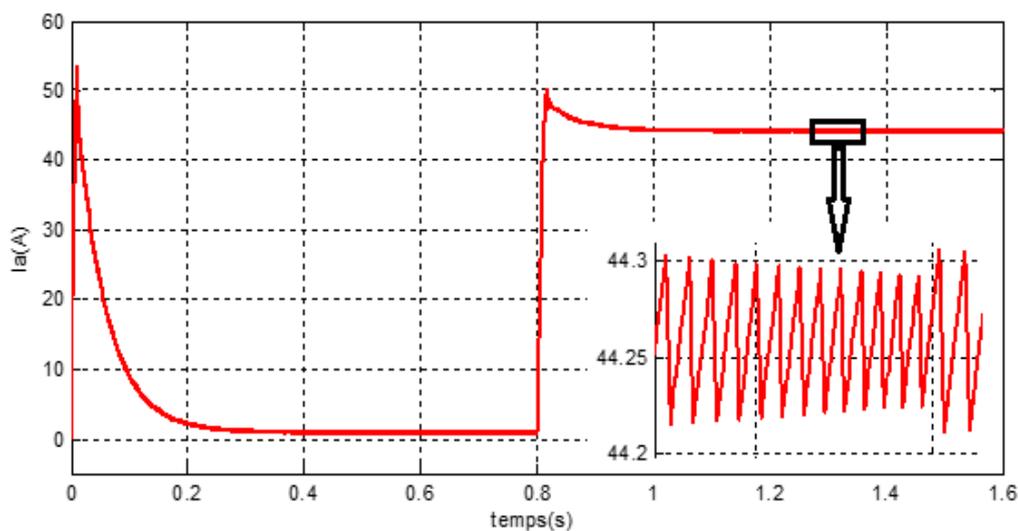


Figure (III.52) : Courant de moteur avec application d'un couple de charge à l'instant 0.8s

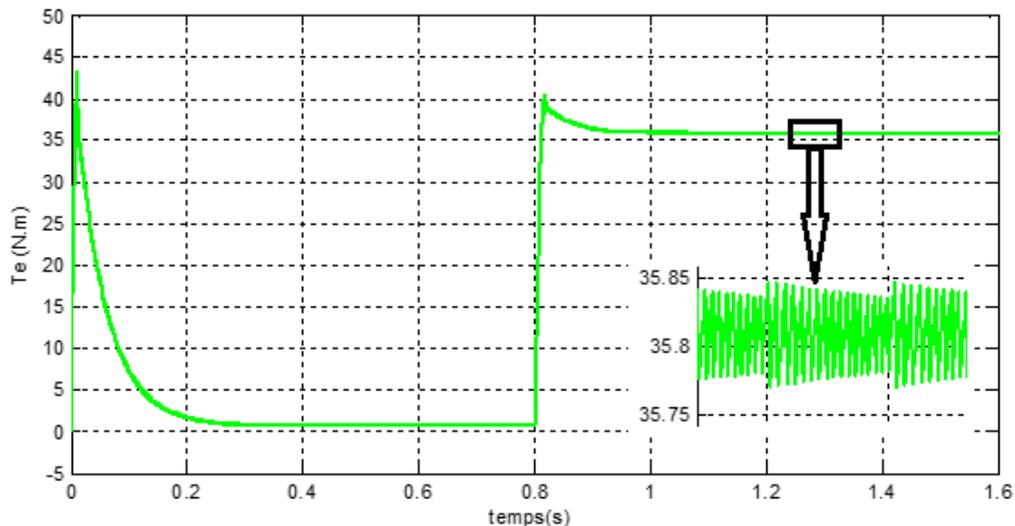


Figure (III.53) : Couple de moteur avec application d'un couple de charge à l'instant 0.8s

Après l'utilisation de boucle de régulation du courant nous remarquons que les ondulations du courant et du couple ont diminué dix fois par rapport au cas sans boucle de régulation du courant. De plus les pics de vitesse et du courant à l'instant de l'application du couple de charge à 0.8S ont diminué.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'étude des actions du régulateur PID composé par les trois actions de base. Puis nous avons présenté les techniques de commande MLI ainsi que les résultats de simulation avec logiciel MATLAB. Cette dernière montre que la vitesse de rotation d'un moteur à courant continu dépend de sa tension d'alimentation. D'après les résultats obtenus, on remarque que pour atteindre les meilleures qualités de stabilité, rapidité et précision il est nécessaire de faire un bon choix de régulateur et aussi un calcul précis de ses paramètres. Ainsi nous avons vu l'amélioration que peut importer une boucle de régulation de courant pour le système.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce présent travail, nous avons fait une étude d'asservissement de vitesse d'un moteur à courant continu à excitation séparée et nous avons atteint au cours du travail, les objectifs suivants :

- ❖ Étudier les différents types de moteur à courant continu et leur structures et principes de fonctionnement ainsi que leur avantages et inconvénients et suivant leurs caractéristiques, on a vue que le moteur à excitation indépendante est le plus adapté est le plus simple pour les entraînements régler car il est caractérisé par une vitesse réglable par tension d'induit ou par excitation, et nous avons montré le modèle mathématique de ce moteur.
- ❖ Nous avons vue que les convertisseurs statiques qui sont constituer d'interrupteurs à base de semi-conducteur (commandable à l'ouverture ou à la fermeture comme les IGBT ou non commandable comme les diodes) sont les dispositifs les plus utiliser dans le domaine industriel pour varier la vitesse des moteurs électriques.
- ❖ Nous avons présenté quelques interrupteurs d'électronique de puissance et leur principe de fonctionnement.
- ❖ On a étudié d'une manière plus détailler le fonctionnement du hacheur (qui est un convertisseur continu-continu) associer à différentes charges ou on à vue qu'il est un moyen simple pour réaliser un réglage de vitesse des MCC par variation de la tension moyenne à sa sortie. Ainsi Nous avons présenté la technique de la commande MLI ou on à montré les résultats de simulation avec le logiciel MATLAB.
- ❖ Nous avons présenté l'étude des actions du régulateur PID composé par les trois actions de base et avec la technique MLI on à effectué l'asservissement proprement dit du système en plaçant à la boucle de rétroaction, le capteur de vitesse. D'après les résultats obtenus, on remarque que pour atteindre les meilleures qualités de stabilité, rapidité et précision il est nécessaire de faire un bon choix de régulateur et aussi un calcul précis de ses paramètres.
- ❖ Nous avons vue l'amélioration que peut importer une boucle de régulation de courant pour le système. Ainsi on à vue l'effet d'une inductance de lissage en série avec l'induit du MCC sur la forme du courant, où elle à diminuer les ondulations du courant et par la suite la pollution électromagnétique.

Comme perspectives on désire simuler cet asservissement de vitesse du MCC par le logiciel ISIS de PROTEUS et le validé expérimentalement.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Denis Guérin, « Cours conversion électromécanique Machine à courant continu ».
- [2] www.elec.jbd.free.fr, « Machine électromagnétique ».
- [3] Anouar Halila, « Etude des machines à courant continu », Mémoire, Université Laval Canada, 2001.
- [4] Ililten Athmane, « Banc d'essai virtuel pour un moteur à courant continu », Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira Bejaia, 2013.
- [5] Ghania Boukerche, « Etude et Synthèse d'un Contrôleur PI et Application », Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2017.
- [6] Benzenati Siham, Rabiai Meriem, « Commande floue d'un moteur à courant continu à excitation séparée », Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira Bejaia, 2013.
- [7] Fabrice DESCHAMP, « Cours BAC S SI – Convertir L'énergie – Machine à Courant Continu » Sciences de L'ingénieur, LYCEE JACQUES PREVET.
- [8] Boudries Zoubir, « Cours commande des machines électriques », Université Abderrahmane Mira Bejaia.
- [9] Youssef Agrebi Zorgani, Hicham Zayani, « Cours commande électrique des machines », Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Sfax, 2014.
- [10] Brahim Abdelkrim, Guezouli Housseine, « Etude et réalisation d'une carte de commande à base d'un microcontrôleur PIC 16F877 pour ponts redresseurs triphasés à thyristors », Mémoire de Master, Université Abou-BekrBelkaïd Tlemcen, 2014.
- [11] A. Campo <anthony.campo@ac-versailles.fr>, 2005.
- [12] A. Rufer, P. Barrade, « Cours d'électronique de puissance conversion DC/DC », Ecole polytechnique de France.
- [13] Zemouri Azzedine, « Etudes expérimentales d'un convertisseur DC/DC contrôlé par une commande robuste », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2014.
- [14] <https://studylibfr.com/doc/1851203/les-transistors-les-differents-types-de-transistors>.
- [15] Soyed Abdessami, « cours d'électronique de puissance chapitre (1) ».
- [16] Alain Cunière, Gilles Feld, Michel Lavabre, « électronique de puissance », Chapitre 07, 2012.
- [17] Olivier Bachelier, Cours d'Automatique de la licence professionnelle « Technologies avancées appliquées aux véhicules ».
- [18] <http://www.électronique-mixt.fr/./formation.électronique.de-puissance.cours-22.PDF>.
- [19] Amin Ayad, « Etude et réalisation d'une commande MLI pilotant un hacheur série », Mémoire de Master, Université Abou-BekrBelkaïd Tlemcen, 2014.
- [20] Sadeg Mohammed Amine et Yahiatene Fayçal, « Etude et réalisation de la commande par retour d'état adaptative d'un moteur à courant continu », Mémoire de Master, Djilali Liabes de Sidi Bel Abbès, 2016.
- [21] Yvan Crévits, « composants de l'électronique de puissance », 2005.
-
-

Bibliographie

[22] L. Louazene, « Electronique de puissance (cours et exercices) », UniversitéOuargla,2011.

[23] Bouiche Hachemi et Brahami Mohamed, « commande PID d'un moteur à courant continu », Mini
Projet, Université Abderrahmane Mira Bejaia, 2010.

