

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'ingénierat

Département : Electrotechnique

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique industriel

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

**Commande à vitesse variable d'un entraînement électrique
à courant continu**

Présenté par : CHOUAHDA Amina

GHEMARI Basma

Encadrant : Chine Abdelghani

Grade MAA

BADJI Mokhtar - Annaba

Jury de Soutenance :

OURISI Amel	MCA	BADJI Mokhtar - Annaba	Président
CHINE Abdelghani	MAA	BADJI Mokhtar - Annaba	Encadrant
SOLTANI Fatima	MCA	BADJI Mokhtar - Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

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. Chine Abdelghani** pour ces conseils qui nous ont été*

Précieux ainsi que toutes les suggestions et remarques qu'il nous

A 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 tenons à remercier notre professeur **Mariam** qui nous a aidés à
toutes les étapes*

Nous tenons également à remercier tut enseignant qui

A contribué à nous former depuis le primaire Jusqu'à

L'université

Finalement nous remercions nos amis sans exception.

Dédicace

A nos très chers parents

On vous doit ce que nous sommes aujourd'hui grâce à

Votre amour, votre patience et vos

Innombrables sacrifices.

Que ce modeste travail, soit pour vous une petite

Compensation et reconnaissance envers ce que

Vous avez fait d'incroyable pour nous.

Que dieu, tout puissant, vous préserve et vous

Procure santé et longue vie, afin qu'on puisse à

Notre tour vous combler.

A nos frères et sœurs

A nos amis(es)

Aucune dédicace ne saurait exprimer assez

Profondément ce que nous ressentons envers vous.

On vous dit tout simplement, MERCI.

Amina, Basma

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I / machine à courant continu
I.1/ Introduction	3
I.2/ Définition	4
I-3/ structure de la machine a courant continue	4
I.3.1/ L'inducteur	5
I.3.2/ L'induit	6
I.3.3/ Le collecteur et les balais	7
I.4/ Principe de fonctionnement	8
I.4.1/ Force contre électromotrice	9
I.5/ Couple électromagnétique	10
I.6 / Différents types de moteurs selon l'inducteur	10
I.6.1/ Moteurs à inducteur à aimant permanent	11
I.6.2 / Moteurs à inducteur bobiné	11
I.6.2.1. Différents modes d'excitation d'un MCC	11
I.7/ Le moteur à excitation indépendante	12
I.7.1/ Modèle électrique	12
I.7.2/ Domaine d'application et caractéristiques	12
I.7.3/ Modèle électrique du MCC à excitation séparée	13
I.8 / Bilan de puissance	13
I.8.1 / Bilan énergétique	14
I.9/ Le rendement	15
I.10 / Quelques considérations pour le MCC	15
I.10.1 / Utilisation des moteurs à courant continu	15
I.10.2 / Démarrage des moteurs à courant continu	16
I.10.3 / Inversion du sens de rotation	16
I.11/ Variation de vitesse	16
I.11.1/ Différents modes de réglage de la vitesse d'un MCC	16
I.11.1.1/ Réglage rhéostatique	17
I.11.1.2/ Réglage par de flux	18
I.11.1.3/ Réglage de vitesse par variation de la tension d'induit	19
I.11.1.4/ Réglage de vitesse par action sur le courant d'excitation	20
I.12 / Les avantages et les inconvénients	20
I.13/ Utilisation de la machine à courant continu	21
I.14/ Conclusion	21

Sommaire

Chapitre II : Redresseurs commandés (Etude des Hacheurs)	
II.1/ Introduction	22
II.2/ Quelques interrupteurs en électronique de puissance	22
II.2.1/Diode	23
II.2.2/Thyristor	24
II.2.3/Transistor	25
II.2.3.1/ Transistor bipolaire	25
II.2.3.2/ Transistors MOSFET	26
II.2.3.3/Transistors IGBT.....	26
II.3/ Convertisseurs statiques	27
II.3.1/Les différents types des Convertisseurs statiques	27
II.3.2/ Redresseurs.....	28
II.3.3/ Onduleurs	29
II.3.4/ Gradateurs	29
II.3.5/ Hacheurs	30
II.4/ Types des hacheurs.....	31
II.4.1/Hacheur non réversible	31
II.4.1.1/Hacheur série.....	31
II.4.1.2/ Hacheur parallèle.....	41
II.4.2/ Hacheurs réversibles	42
II.4.2.1/ Hacheur série réversible en courant	42
II.4.2.2/ Hacheur réversible en tension	43
II.4.2.3/ Hacheur réversible en tension et en courant	44
II.5/ Conclusion.....	45
Chapitre III : Association machine à courant continu- hacheur	
III.1/ Introduction.....	46
III.2 / Variation de la tension de sortie d'un hacheur	46
III.3/ Les critères de performances de la régulation	46
III.4/ Modélisation en régime dynamique.....	50
III.4.1/ Fonction de transfert du MCC à excitation séparée	50
III.4.1.1/ Calcul des paramètres du moteur	53
III.4. 1.2/ Modèle dynamique du hacheur.....	54
III. 4.1.3/ Modèle dynamique du capteur de courant.....	55
III. 4.1.4/ Modèle dynamique du capteur de vitesse.....	56
III.5/ Synthèse des régulations de courant et de vitesse	57
III.5.1/ Méthode de calcul des régulateurs à partir des fonctions de transfert	58
III. 5. 2/ Application de la méthode.....	58
III. 5.2.1/ Boucle de courant	59

Sommaire

III. 5 .2.2/ Boucle de vitesse	61
III.6/Schéma et résultat de simulation PSIM	62
Conclusion générale.....	68

Liste des figures

Liste des figures

Figure(I-01) : machine à courant continue	3
Figure (I-02) : les convertisseurs d'énergie.....	4
Figure (I-03) : Description de la machine à courant continu	5
Figure (I-04) : Stator d'une machine à courant continu	5
Figure (I-05) : Encoche sur l'induit destinée à recevoir les conducteurs.....	6
Figure (I-06) : Mise en place des conducteurs d'induit dans les encoches	7
Figure (I-07) : Collecteur d'une machine à courant continu de forte puissance.	7
Figure (I-08) : Détails de la ligne des balais d'une MCC de forte puissance.....	8
Figure (I-09) : Principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu.....	9
Figure (I-10) : Moteur à aimant permanent.....	11
Figure (I-11) : Différents modes d'excitations.....	12
Figure (I-12) : Modèle électrique du moteur à excitation indépendante	13
Figure (I-13) : Bilan de puissance d'un MCC à excitation séparée	14
Figure (I-14) : Réglage de la vitesse par variation de résistance d'induit	18
Figure (I-15) Caractéristique de réglage par la variation du flux magnétique	19
Figure (I-16) Caractéristique de réglage par variation de la tension d'induit	20
Figure (II.01) : Diode et symbole de diode de puissance.....	23
Figure (II.02) : Caractéristique de la diode réelle	24
Figure (II.03) : Caractéristique de la diode parfaite.....	24
Figure (II.04) : Symbole du thyristor.....	25
Figure (II.05) : Différent formes du thyristor	25
Figure (II.06) : Transistor bipolaire (PNP et NPN)	26
Figure (II.07) : Transistor MOSFET à canal N et P.....	26
Figure (II.08) : Transistor IGBT	27
Figure (II-09) : familles des convertisseurs statiques	28
Figure (II-10) : représentation symbolique du redresseur.....	28
Figure (II-11) : représentation symbolique de l'onduleur.....	29
Figure (II-12) : représentation symbolique d'un gradateur.....	30
Figure (II-13) : conversion continue/ continu.	30
Figure (II.14) : Structure d'hacheur série.....	31
Figure (II.15) : Tension de sortie V_s	32
Figure (II.16) : Tension de sortie moyenne V_s	32
Figure (II.17) : Structure d'hacheur série charge L.....	33
Figure (II.18) : Structure d'hacheur série charge R.L.	33

Liste des figures

Figure (II.19) : Régime de conduction continue	35
Figure (II.20) : Régime de conduction continue	36
Figure (II.21) : Structure d'hacheur série charge R.L.E.....	37
Figure (II.22) : Passant de courant pour H fermée.....	37
Figure (II.23) : Passant de courant pour H ouvert.....	38
Figure (II.24) : Régime de conduction continue charge R.L.E.....	40
Figure (II.25) : Régime de conduction discontinu R.L.E.....	41
Figure (II.26) : Structure Hacheur parallèle	42
Figure (II.27) : Chronogramme de tension V.....	42
Figure (II.28) : Schéma d'Interrupteur réversible en courant	43
Figure (II.29) : Structure d'un hacheur série réversible en courant	43
Figure (II.30) : Schéma de Principe d'un hacheur réversible en tension	44
Figure (II.31) : Schéma de principe du hacheur réversible en tension et en courant	45
Figure (III-01) : Variation de la durée de fermeture.	47
Figure (III-02) : Variation de la période.	47
Figure (III-03) : Le circuit de commande.	48
Figure (III-04) : Le schéma bloc de l'association MCC-Hacheur.	50
Figure (III-05) : Moteur à courant continu à excitation séparé.....	50
Figure (III-06) : Schéma fonctionnel moteur à courant continu.....	52
Figure (III-07) : schéma de bloc ouvert	52
Figure (III-08) : Graphe représentatif.	55
Figure (III-09) : Schéma bloc globale du système régulé.....	56
Figure (III-10) : schéma bloc après insertion de la valeur calculée.	57
Figure (III-11) : Structure de boucle de courant.	59
Figure (III-12) : structure de boucle de vitesse.....	61
Figure (III-13) : Association hacheur-moteur.....	62
Figure (III-14) : Résultat de simulation hacheur-moteur de vitesse	63
Figure (III-15) : Résultat de simulation hacheur-moteur de courant.	63
Figure (III-16) : Schéma de simulation de l'association Mcc- hacheur variation de la charge	64
Figure (III-17) : Résultat de simulation de vitesse hacheur-moteur variation de la charge	65
Figure (III-18) : Résultat de simulation de courant hacheur-moteur variation de la	66
Charge	66

Nomenclature

Nomenclature

E : f e m induite (tension continue en V).

Φ : flux magnétique crée sous un pôle par l'inducteur.

Ω : vitesse de rotation (en rad/s).

K : constante qui dépend de la machine considérée.

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).c

e : f e m induit dans un conducteur

i : courant d'induit

K : constante qui dépend de la machine considérée

R : résistance d'induit

U : tension aux bornes de l'induit

B : champ magnétique

r : résistance de l'inducteur

U_s : tension moyenne de sortie

U_e : tension d'entrée

U_0 : tension aux bornes de l'induit

I_0 : l'intensité du courant dans l'induit

P_a : la puissance absorbée

P_c : les pertes collectives

P_u : la puissance utile

P_{jr} : les pertes par effet joule dans l'induit

P_e : la puissance électromagnétique

T_{em} : le couple électromagnétique

C_u : le couple utile

Nomenclature

C_m : le couple moteur

D : diode

T : thyristor

A : anode de diode

K : cathode de diode

G : génératrice

C : condensateur

α :Le rapport cyclique

T : période de découpage

K1, K2 : interrupteur électronique

U_s : source de tension

U_d : tension aux bornes de diode

I_s : courant de source

C_r : couple de charge

U_d : tension d'alimentation de l'induit du moteur dans notre cas Forni par le hacheur

R_{ind} : résistance de circuit d'induit

L_{ind} : inductance de circuit d'induit

L_{si} : inductance de self de lissage

f_c : fréquence de commutation

T_1 : grand constante temps

Résumé

Résumé

Le travail, présenté dans le cadre du mémoire de fin de cycle, est une «étude par simulation d'un entraînement électrique à courant continu. Il s'agit de l'association d'un hacheur à un moteur à courant continu. On a commencé par une étude détaillée de la structure, le composant qui doit être commandé à l'ouverture et à la fermeture est réalisé par thyristor auquel on associe un circuit d'extinction. L'analyse des résultats de simulation, réalisée, montre l'existence des pics sur la tension de charge. Le thyristor est son circuit auxiliaire out été remplacé par un IGBT. La conséquence directe de l'utilisation d'un tel composant, la disparition des pics dans la tension de charge. Dans le cas d'une charge RLE le courant peut devenir discontinu. Ce qui représente évidemment un inconvénient. L'utilisation d'une structure réversible en courant corrige ce comportement. Par simulation on a expliqué la forme que prend le courant de charge, l'une des applications majeures du hacheur est le domaine des entraînements électriques à vitesse variable. En effet la variation de la vitesse d'un moteur à courant continu se fait d'une manière simple et souple en variant la tension d'induit. Deux boucles, l'une de courant et l'autre de vitesse, ont fait aussi l'objet d'une étude détaillée dans ce mémoire

ملخص عام

في إطار مذكرة نهاية الدورة (ماستر 2) هذا العمل عبارة عن دراسة نظام كهربائي بالتيار المستمر والمتمثل في قمنا أولاً بدراسة مفصلة للهيكل، (=/=) ربط محرك التيار المستمر بتحريض مستقل مع مستبدل مستمر-مستمر يوضح تحليل نتائج. العنصر الذي يجب التحكم فيه عند الفتح والإغلاق هو المقداح أين أطفأنا له دائرة الإطفاء المقداح هو الدارة الثانويّة، قمنا (المحاكاة التي تم إجراؤها وجود قيم أعظميّة لتوتّر الحمولة (توتّرات الذروة والهدف من هذه الدارة التخلّص من توتّرات الذروة ويتحقق ذلك فقط في حالة بنية قابلة IGBT بتعويضه بمقل ، يمكن أن يصبح التيار متقطعاً وهذا يعتبر خلل، استخدام هيكل التيار القابل RLE في حالة الحمولة. لعكس التيار للانعكاس يصحح هذا السلوك، لقد شرحنا شكل تيار الحمولة وهذا عند استعمال المستبدل مستمر-مستمر في في الواقع، يتم تغيير سرعة محرك التيار المباشر بطريقة بسيطة ومرنة. المجال الكهربائي بتغيير في السرعة تمّت أيضاً دراسة حلقتين بالتفصيل في هذه المذكرة، إحداهما للتيار والأخرى. عن طريق تغيير جهد المحرك للسرعة.

introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

L'industrie au sens le plus large du terme, et le transport ont de plus besoin de système à vitesse continument variable douée de souplesse et de précision.

Bien sur les solutions mécaniques et hydrauliques sont encore utilisées. Cependant les solutions électroniques sont aujourd'hui et de loin les plus appréciées leur succès vient des caractéristiques incomparables que leur confère l'électronique, tant sur le plan de la conversion d'énergie que sur celui de l'asservissement du système.

Ainsi aujourd'hui, les moteurs à courant continu, qui sont par nature des machines à vitesse variable sont très utilisés.

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. Actuellement ces variateurs sont des dispositifs électroniques à thyristors compte tenu de l'importance que revêtent le réglage et la variation de la vitesse dans les quatre quadrants.

Notre travail consiste en l'étude de l'association d'un hacheur à thyristor bidirectionnel associé à un moteur à courant continu.

La mémoire est structurée en trois chapitres. Dans le premier j'aborde la structure, les types et le fonctionnement du moteur à courant continu, et la caractéristique de réglage de la vitesse.

Le deuxième est consacré l'étude du redresseur commandé dont les hacheurs à thyristors.

L'outil utilisé est le PSIM, il s'agit d'un logiciel dédié à la simulation des montages de l'électronique de puissance.

L'association du moteur au hacheur sera abordée au troisième chapitre. Pour que l'ensemble puisse fonctionner tout en contrôlant le couple du moteur, il est

Introduction générale

nécessaire d'utiliser deux boucles de réglage, l'une pour le courant et l'autre pour la vitesse. Après le dimensionnement des deux régulateurs, on a vérifié le fonctionnement de l'ensemble en utilisant le PSIM.

Chapitre I

**Moteur à courant
continu
À Excitation
Indépendante**

I.1/ Introduction

Les moteurs à courant continu sont des machines qui transforment l'énergie électrique qu'ils reçoivent en énergie mécanique. La construction des moteurs est identique à celle des génératrices, de sorte qu'une machine à courant continu peut servir indifféremment comme moteur ou comme génératrice.

L'usage des moteurs à courant continu est plutôt restreint, car la distribution se fait à courant alternatif. Cependant, pour certaines applications il est parfois avantageux d'utiliser des moteurs à courant continu alimentés par des convertisseurs qui transforment le courant alternatif en courant continu. La supériorité de ces moteurs réside dans le fait qu'ils se prêtent facilement à un contrôle souple, continu et presque instantané de leur vitesse.

Ce chapitre présentera des généralités sur la machine à courant continu en particulier son fonctionnement en moteur électrique.

Il s'agit d'établir les différents types des moteurs à courant continu.

Ensuite nous donnerons les avantages et les inconvénients et enfin le domaine d'utilisation.

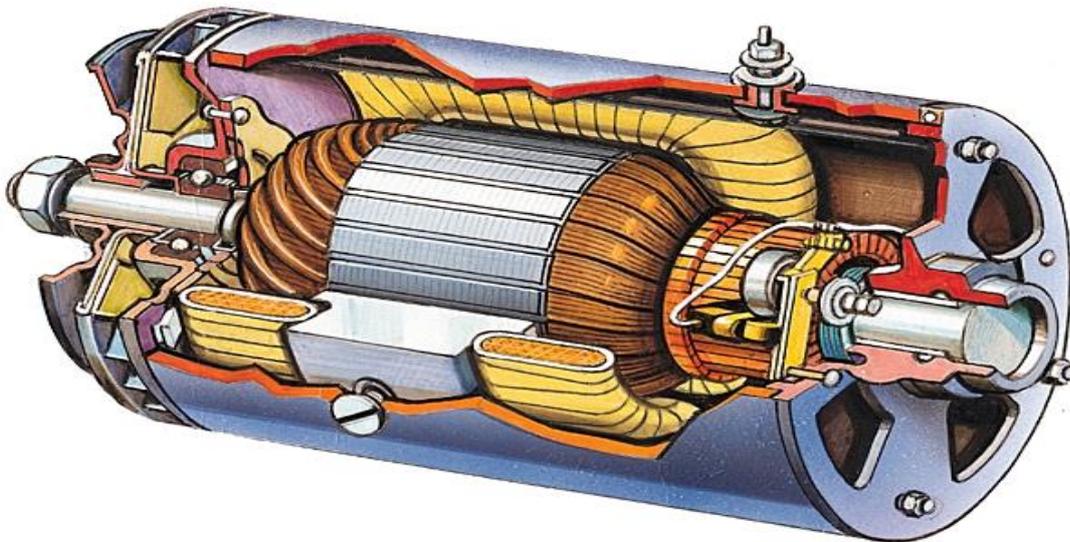


Figure I-01 : machine à courant continu

I.2/ Définition :

Les machines à courant continu sont des convertisseurs électromécaniques d'énergie : Soit ils convertissent l'énergie électrique absorbée en énergie mécanique lorsqu'ils sont capables de fournir une puissance mécanique suffisante pour démarrer puis entraîner une charge en mouvement.

On dit alors qu'ils ont un fonctionnement en moteur. Soit ils convertissent l'énergie mécanique reçue en énergie électrique lorsqu'ils subissent l'action d'une charge entraînée. On dit alors qu'ils ont un fonctionnement en générateur.

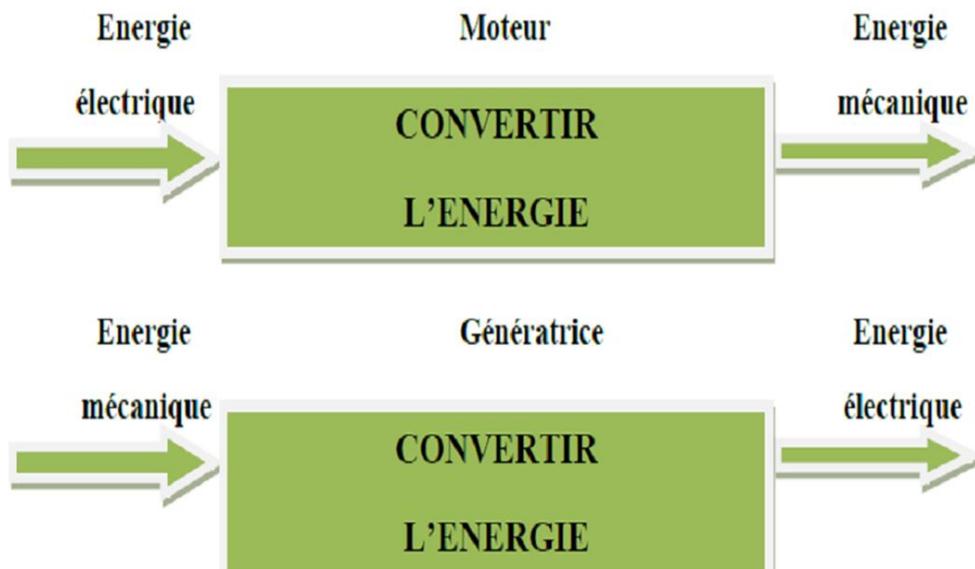


Figure I-02 : les convertisseurs d'énergie

I.3/ structure de la machine a courant continue

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

- l'inducteur ou stator (partie fixe).
- l'induit ou rotor (partie tournante).
- le dispositif collecteur / balais.

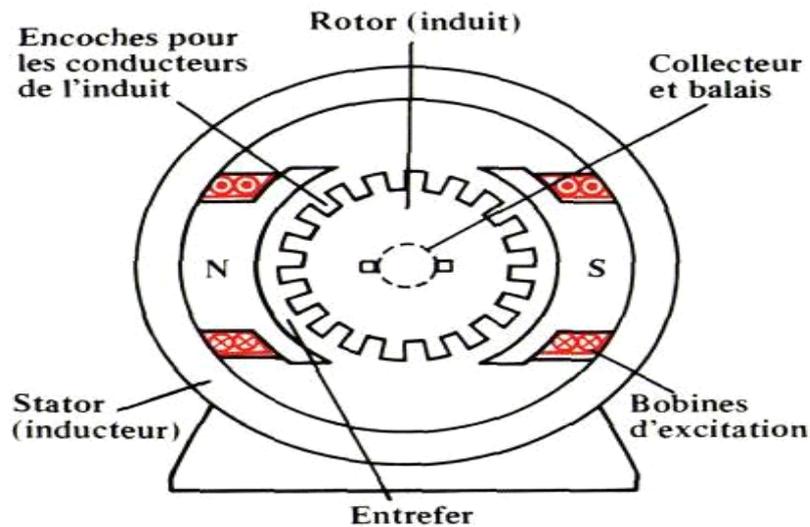


Figure (I-03) : Description de la machine à courant continu

I.3.1/ le stator (L'inducteur ou circuit d'excitation)

Le stator est constitué de la carcasse du moteur et du circuit magnétique proprement dit (voir figure ci-dessous). Un circuit magnétique est constitué d'une structure ferromagnétique qui canalise le flux magnétique, créé par une source de champ magnétique : aimant permanent ou électroaimant. Le circuit magnétique du stator crée le champ magnétique B_s appelé « champ inducteur ». L'inducteur magnétise le moteur en créant un flux magnétique dans l'entrefer. L'entrefer est l'espace entre les pôles du stator et le rotor.

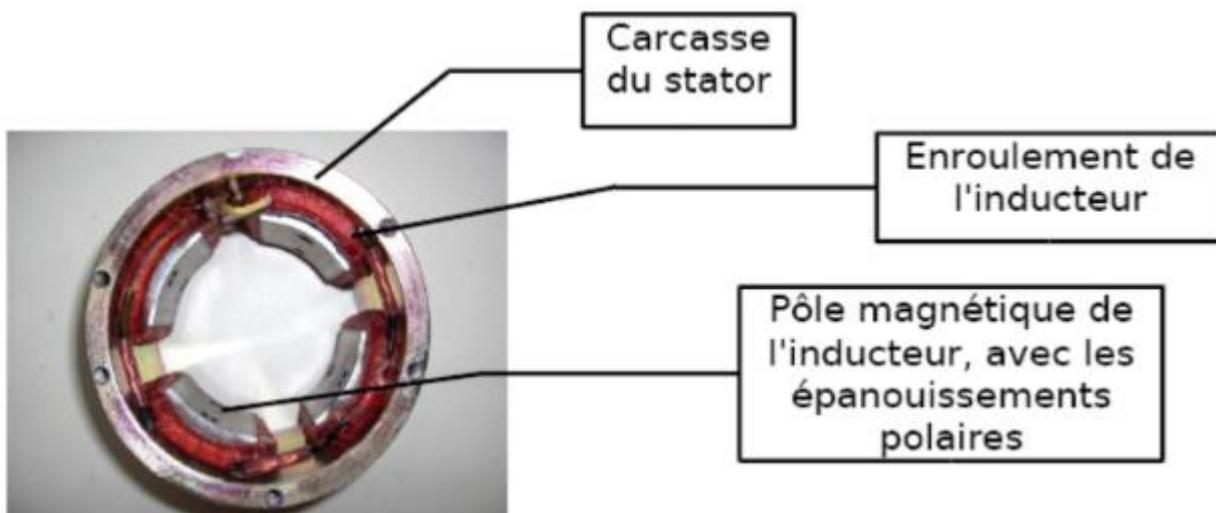


Figure (I-04) : Stator d'une machine à courant continu

L'inducteur comporte :

I. 3.1.1. les 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.

I.3.1.2. les 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.

I.3.2. Induit (circuit de puissance)

L'induit est composé d'un ensemble de bobines identiques réparties uniformément autour d'un noyau cylindrique. Il est monté sur un arbre et tourne entre les pôles de l'inducteur. L'induit constitue un ensemble de conducteurs qui coupent les lignes de champ magnétique. Les bobines sont disposées de telle façon que leurs deux côtés coupent respectivement le flux provenant d'un pôle nord et d'un pôle sud de l'inducteur.

Le noyau est formé d'un assemblage de tôles en fer doux. Ces tôles sont isolées électriquement les unes des autres et portent des encoches destinées à recevoir les bobines



Figure (I-05) : Encoche sur l'induit destinée à recevoir les conducteurs.

Les conducteurs de l'induit sont parcourus par le courant absorbé ou débité par la machine. Ils sont isolés du noyau par des couches de feuilles isolantes



Figure (I-06) : Mise en place des conducteurs d'induit dans les encoches

I.3.3 Le collecteur et les balais

Le collecteur est un ensemble cylindrique de lames de cuivre isolées les unes des autres par des feuilles de mica. Le collecteur est monté sur l'arbre de la machine, mais isolé de celui-ci. Les deux fils sortant de chaque bobine de l'induit sont successivement et symétriquement soudés aux lames du collecteur. Dans une machine bipolaire, deux balais fixes et diamétralement opposés appuient sur le collecteur. Ainsi, ils assurent le contact électrique entre l'induit et le circuit extérieur. La construction du collecteur relève de la mécanique de précision. Les machines multipolaires ont autant de balais que de pôles.



Figure (I-07) : Collecteur d'une machine à courant continu de forte puissance.

Les balais permettent l'injection ou la collecte du courant sur le collecteur. Lors de la construction des premières machines à courant continu, les balais étaient constitués de fils de cuivre disposés comme la paille de riz ou les branches sur les balais pour nettoyer, d'où le nom de balais

Les balais (aussi appelés « charbon ») sont en carbone (on choisit souvent du graphite). D'une part, ce matériau possède une bonne conductivité d'autre part, le frottement du couple cuivre/carbone est faible et ainsi, le collecteur ne s'use pas prématurément. La pression des balais sur le collecteur peut être réglée par des ressorts ajustables. Pour les intensités très importantes, on utilise plusieurs balais connectés en parallèle,



– **Figure (I-08) :** Détails de la ligne des balais d'une MCC de forte puissance

I.4/ Principe de fonctionnement

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 longueurs (L) placé dans le champ (B) et parcouru par un courant (I) est le siège d'une

force électromagnétique perpendiculaire au conducteur :

$$F=B.L.I.\sin\alpha \quad (I.01)$$

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.

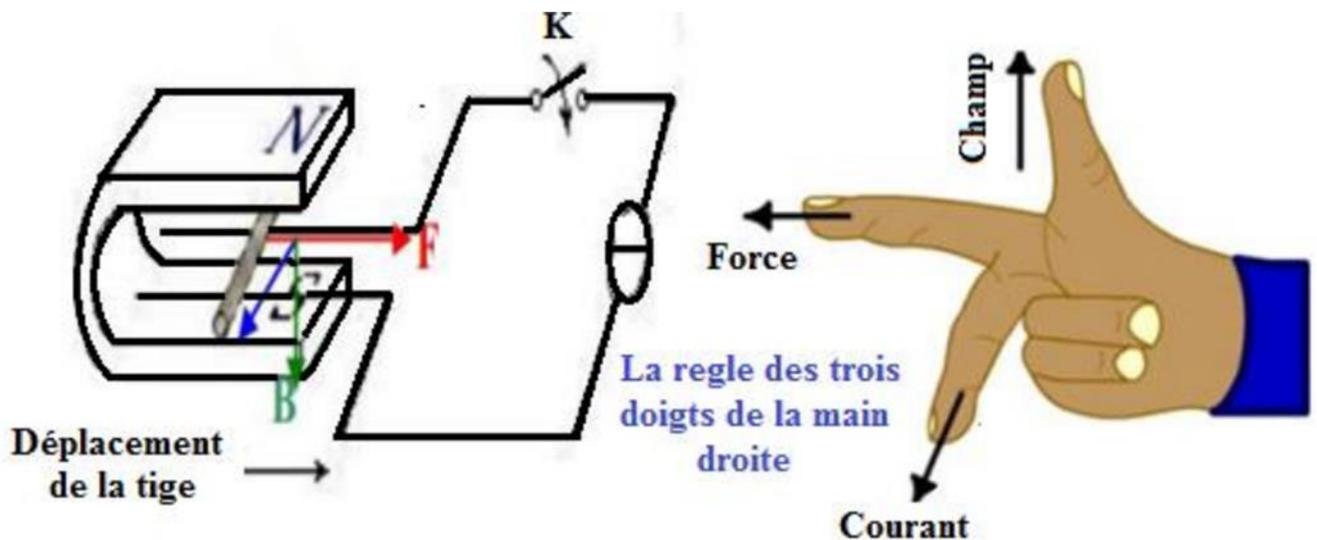


Figure (I-09) : Principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu

I.4.1. Force contre électromotrice

La force contre électromotrice f.c.é.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.

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

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).c

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

Loi de Faraday

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

Avec :

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

E : f e m induite (tension continue en V).

Φ : flux magnétique crée sous un pôle par l'inducteur.

Ω : vitesse de rotation (en rad/s).

K : constante qui dépend de la machine considérée.

I.5/ Couple électromagnétique

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

$$P_E = E \cdot I \quad (\text{I.05})$$

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

$$P_E = T_{em} \cdot \Omega \quad (\text{I.06})$$

On montre alors que l'expression du couple électromagnétique est

Loi de Laplace :

$$T_{em} = K \cdot \Phi \cdot I \quad (\text{I.07})$$

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

I.6. Différents types de moteurs selon l'inducteur

On distingue deux types de moteurs à courant continu :

I.6.1. 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.

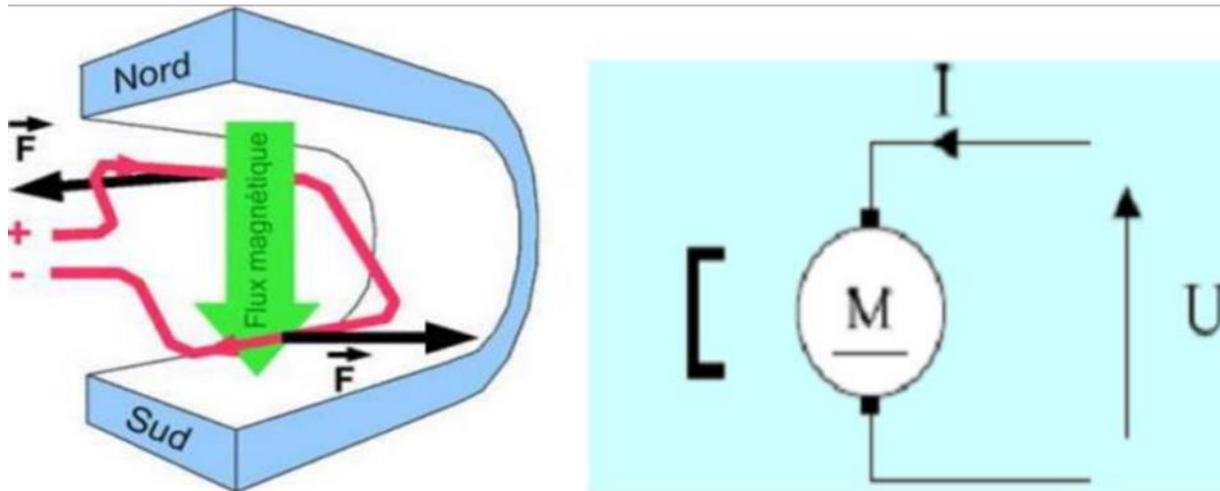


Figure (I-10) : Moteur à aimant permanent.

I.6.2. Moteurs à inducteur bobiné

I.6.2.1. Différents modes d'excitation d'un MCC

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.

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

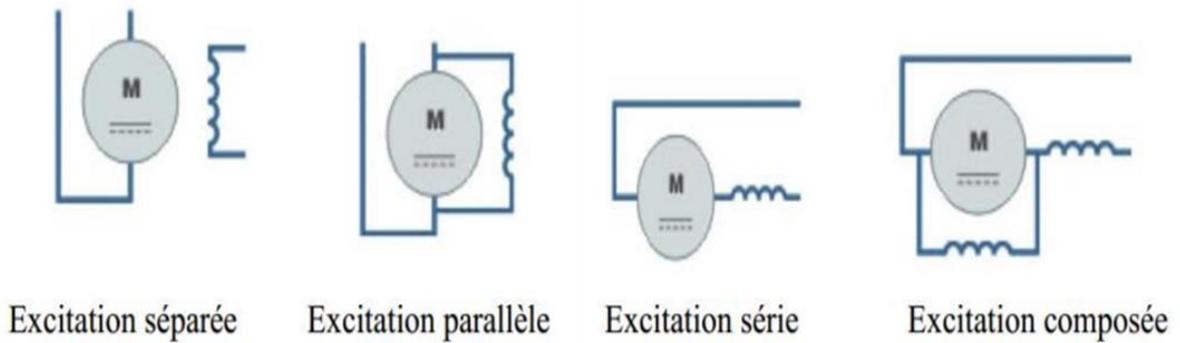


Figure (I-11) : Différents modes d’excitations

I.7/ Le moteur à excitation indépendante

I.7.1/ Modèle électrique

L’inducteur est alimenté par une tension continue u et est traversé par le courant continu i (si l’inducteur n’est pas à aimants permanents).

L’induit est alimenté par une tension continue U et traversé par une intensité I

Le moteur à excitation indépendante est raccordé à une alimentation à courant continu séparée. Par conséquent, le courant qui alimente l’inducteur est indépendant de celui qui alimente l’induit

I.7.2/ Domaine d’application et Caractéristiques

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.01) : Domaine d’application du MCC à excitation séparée

I.7.3/ Modèle électrique du moteur à excitation indépendante

Pour ce moteur, le flux ϕ est directement proportionnel au courant d'excitation i .

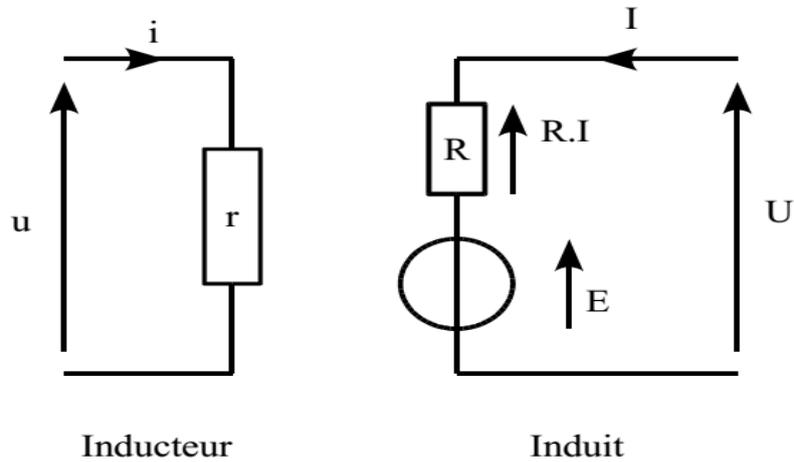


Figure (I-12) : Modèle électrique du moteur à excitation indépendante

Équation de fonctionnement pour l'induit :

$$U = E + R.I \quad (\text{I.08})$$

Équation de fonctionnement pour l'inducteur :

$$u = r.i \quad (\text{I.09})$$

En pratique : $r \gg R$

En charge : $I \gg i$

I.8 / Bilan de puissances

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

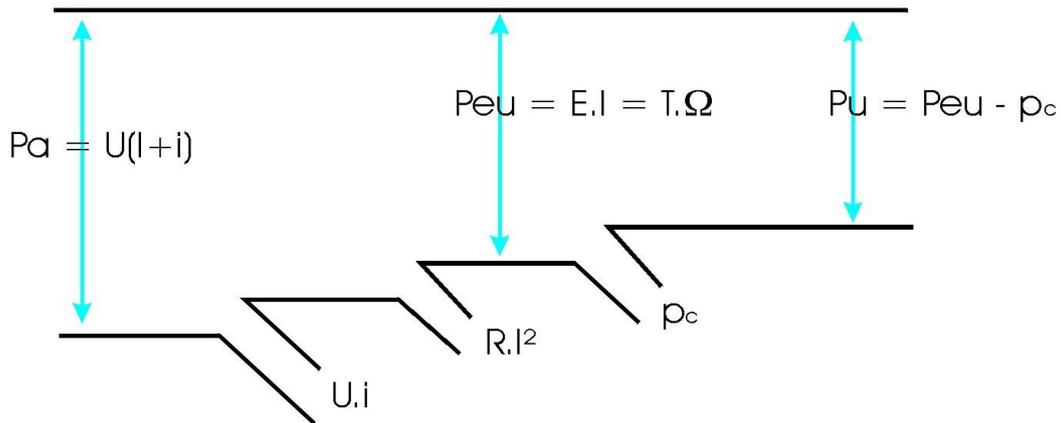


Figure (I-13) : Bilan de puissance d'un MCC à excitation séparée

I.8.1 / Bilan énergétique

1-Puissance absorbée

C'est la somme des puissances absorbées par le circuit induit et par le circuit inducteur.

$$\text{Pour l'induit : } P = U.I \quad (\text{I. 10})$$

$$\text{Pour l'inducteur : } p = u.i \quad (\text{I. 11})$$

$$\text{Au total : } Pa = U.I + u.i \quad (\text{I. 12})$$

2-Pertes

Ces pertes sont dues, à la fois, à l'effet magnétique à cause de la rotation du rotor dans le champ magnétique et au frottement et à la ventilation.

On les appelle pertes collectives et on les note p_c .

En plus de ces pertes s'ajoutent celles par effet Joule dans l'induit et dans l'inducteur :

$$p_{jr} = R.I^2 \quad (\text{I. 13})$$

$$p_e = u.i \quad (\text{I. 14})$$

3-Puissance mécanique utile

C'est la puissance disponible sur l'arbre du moteur :

$$P_{utile} = P_{absorbée} - \text{pertes}$$

$$Pu = (U.I + u.i) - (R.I^2 + u.i + pc) \quad (\text{I. 15})$$

$$Pu = U.I - R.I^2 - pc \quad (\text{I. 16})$$

En tenant compte de la relation

$$E = U - R.I \quad (\text{I. 17})$$

$$Pu = (U - R.I).I - pc = E.I - pc \quad (\text{I. 18})$$

Le produit E.I est la puissance électrique utile

$$Pu = Peu - pc \quad (\text{I. 19})$$

I.9/ Le rendement

Les moteurs à courant continu consomment une partie de l'énergie absorbée pour leur

Fonctionnement L'énergie mécanique fournie sera toujours plus petite que l'énergie électrique absorbée. Le rapport entre l'énergie fournie et l'énergie absorbée est le rendement.

$$\eta = \frac{P_{utile}}{P_{absorbée}} \quad (\text{I. 20})$$

$$\eta = \frac{P_{absorbée} - \sum P_{pertes}}{P_{absorbée}} \quad (\text{I. 21})$$

$$\eta = \frac{Pu}{P_a} \quad (\text{I. 22})$$

I.10 Quelques considérations pour le MCC

I.10.1/Utilisation des moteurs à courant continu

Le principal avantage de ces moteurs, c'est qu'il est très facile de faire varier la vitesse

de rotation par modification de la tension d'alimentation U en utilisant des ponts redresseurs commandés ou des hacheurs

I.10.2/Démarrage des moteurs à courant continu

Le courant absorbé par un moteur à courant continu est donnée par la loi d'Ohm :

$$U = E + R.I \quad (\text{I. 23})$$

Soit
$$I = \frac{U-E}{R} \quad (\text{I. 24})$$

Ce courant dépend de la f.c.é.m. étant donné que U et R sont deux constantes.

Entre la mise sous tension du moteur et son décollage, La vitesse est nulle donc la f.c.é.m. aussi ; le courant n'est limité que par R .

Pour un moteur à excitation séparée, Le courant de démarrage est très important.

I.10.3/Inversion du Sens de rotation

Pour inverser le sens de rotation, il faut inverser le sens du courant dans l'induit ou celui dans l'inducteur.

I.11/ 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.11.1/ 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 :

$$n = \frac{U - R_a I_a}{K\Phi} \quad (\text{I. 25})$$

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.11.1.1/ 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 :

$$n = \frac{U_n - (R_a + R_{add}) \cdot I_n}{K} \quad (\text{I. 26})$$

Pour :

$$C = 0, \quad I = 0, \quad n = U/K \quad (\text{I. 27})$$

Pour :

$$n = 0 \quad C = \frac{K \cdot U}{(R_a + R_r)} \quad (\text{I. 28})$$

Ainsi on obtient un faisceau de droites comme la montre la figure ci-dessous :

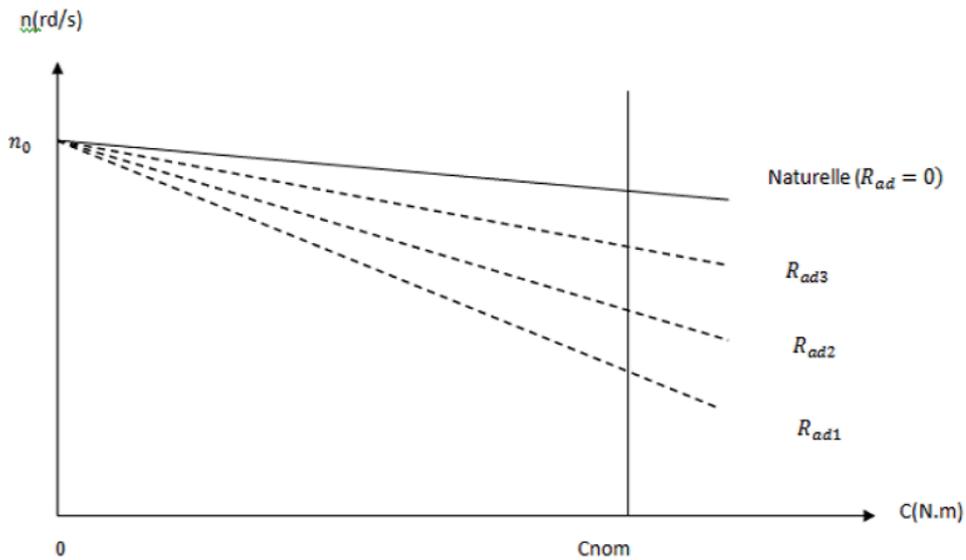


Figure (I-14) : Réglage de la vitesse par variation de résistance d’induit

I.11.1.2/ 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.

$$n_1 = \frac{U}{K\Phi_1} - \frac{R_a I_a}{K\Phi_2} \tag{I.29}$$

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

$$n_2 = \frac{U}{K\Phi_2} - \frac{R_a I_a}{K\Phi_2} \tag{I.30}$$

$$n_N < n_1 < n_2$$

$$n_N = \frac{U}{K\Phi} - \frac{R_a I_a}{K\Phi} \tag{I.31}$$

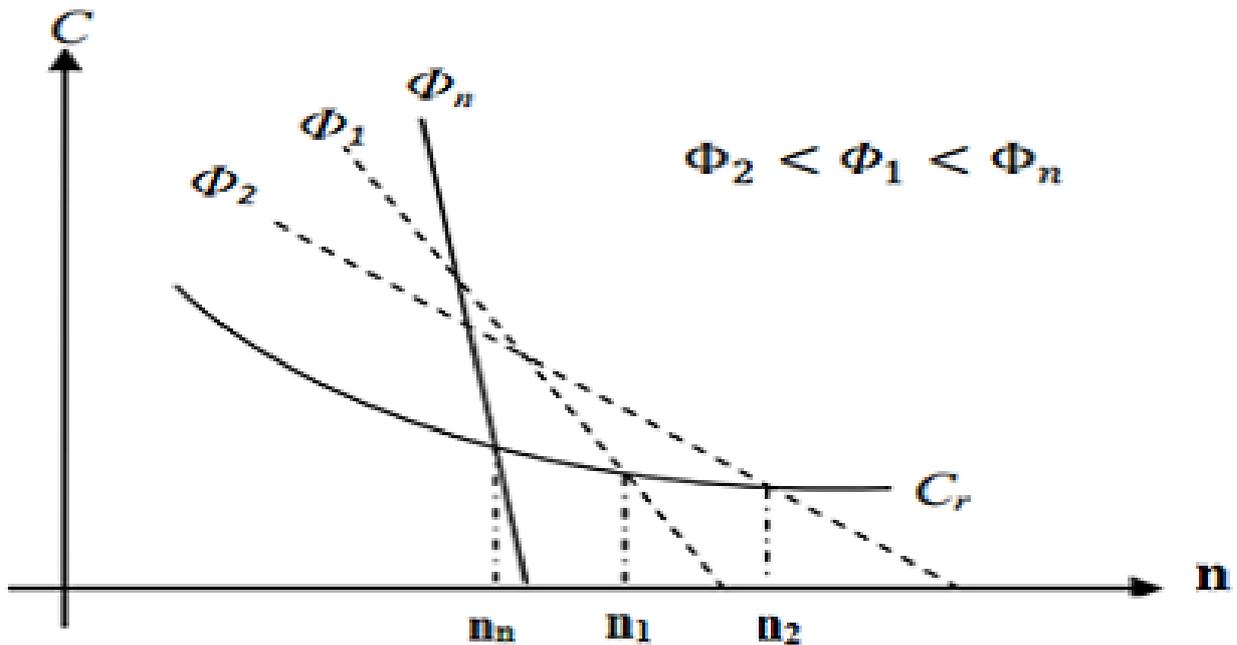


Figure (I-15) Caractéristique de réglage par la variation du flux magnétique

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

I.10.1.3/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. 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.

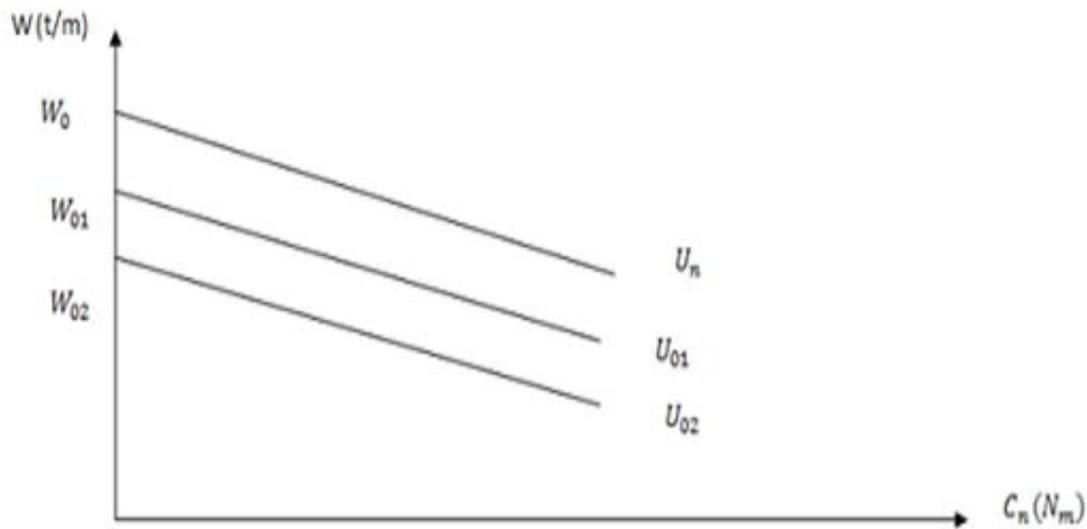


Figure (I-16) Caractéristique de réglage par variation de la tension d'induit

I.10.1.4/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 (ie). 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.

I.11/Les avantages et les inconvénients

Les avantages

- Alimentation aisée dans les systèmes transportant leur réserve d'énergie (autonome) : pile ou batterie.
- La variation de fréquence de rotation est simple à réaliser.
- Il particulièrement bien adapter à l'automobile (source continue)
- Il possède une plage de vitesse de fonctionnement très étendue d'où l'utilisation pour la traction ferroviaire par exemple.

Les inconvénients

- Le principal problème de ces machines vient de la liaison entre les balais, ou charbons et le collecteur rotatif.
- Plus la vitesse de rotation est élevée, plus les balais doivent Fort pour rester en contact et plus le frottement est important.

- Aux vitesses élevées les charbons doivent être remplacés très régulièrement.
- Le contact électrique imparfait cause des arcs électriques, usant rapidement le commutateur et générant des parasites dans le circuit d'alimentation.
- Pour des fonctionnements en moteur de petite puissance ce problème peut être résolu grâce à la technologie du moteur à courant continu sans balai communément appelé moteur brushless : un dispositif d'électronique de puissance remplace l'ensemble balai-collecteur : la position du rotor est détectée par des capteurs à effet hall et le courant est commuté par des transistors à effet de champ

I.12/Utilisation de la machine à courant continu

Le moteur à excitation indépendante est particulièrement adapté aux entraînements de machines nécessitant des vitesses réglables (action sur la tension) et présentant un couple important en basse vitesse (machines-outils).

Démarrateur (automobile ...).

Moteur de traction (locomotive, métro ...).

Appareils de levage.

Ventilateurs, pompes centrifuges, compresseurs, pompes à piston.

Machines-outils à couple variable ou à mouvement alternatif (étaux limeurs, raboteuses).

I.13/Conclusion

Ce chapitre a permis de rappeler les. 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, différents éléments qui constituent une machine à courant continu et le principe de fonctionnement nous allons étudier les convertisseurs statiques.

chapitre III

Redresseurs

commandés

(Etude des Hacheurs)

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 son command abélite 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).

II.2.1. Diode

La **diode** un dipôle *non-linéaire* et *polarisé* (ou non-symétrique).

Le sens de branchement de la diode a donc une importance sur le fonctionnement du circuit électronique.

Sa fonction principale est de ne laisser passer le courant électrique que dans un seul sens.

La plupart des diodes sont réalisées par la jonction de deux semi-conducteurs : l'un dopé « P » l'autre dopé « N ».

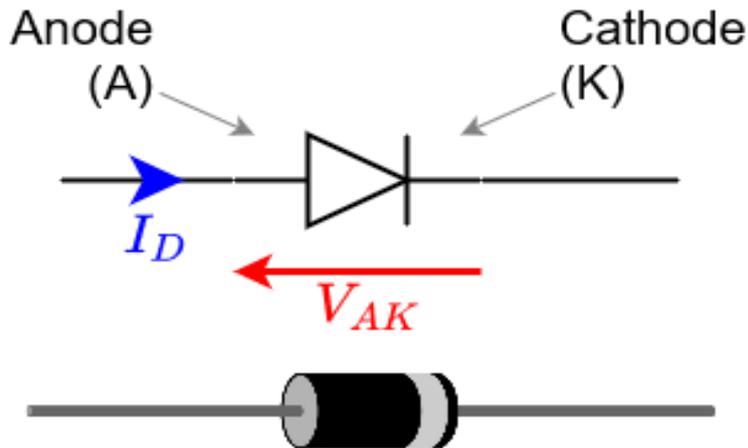


Figure (II.01) : Diode et symbole de diode de puissance

Fonctionnement :

La diode possède deux régimes de fonctionnement : **bloqué** ou **passant**.

Pour faire fonctionner la diode, il faut la **polariser** : la placer dans un circuit de manière à créer une tension V_{AK} entre ses bornes et courant d'intensité I_D (courant direct, peu aussi s'écrire I_F , avec F pour *Forward*) la traversant :

Diode bloquée : $V_{AK} < V_{seuil}$, ce qui empêche le passage du courant : $I_D = 0$.

Diode passante : $V_{AK} \geq V_{seuil}$, ce qui entraîne $I_D \neq 0$.

V_{seuil} (Ou V_{D0} ou V_F avec F pour *Forward*) est la **tension de seuil**

Caractéristique tension – courant

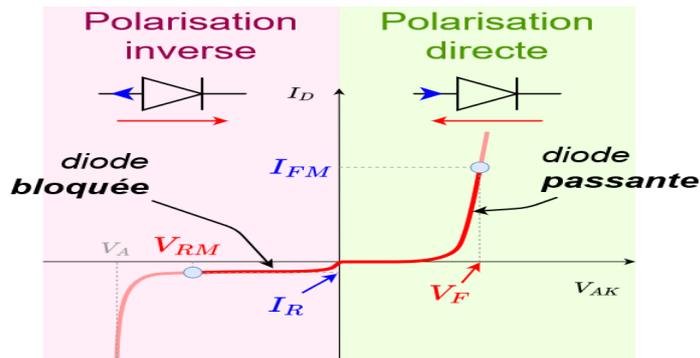


Figure (II.02) : Caractéristique de la diode réelle

Modèle « diode » parfaite »

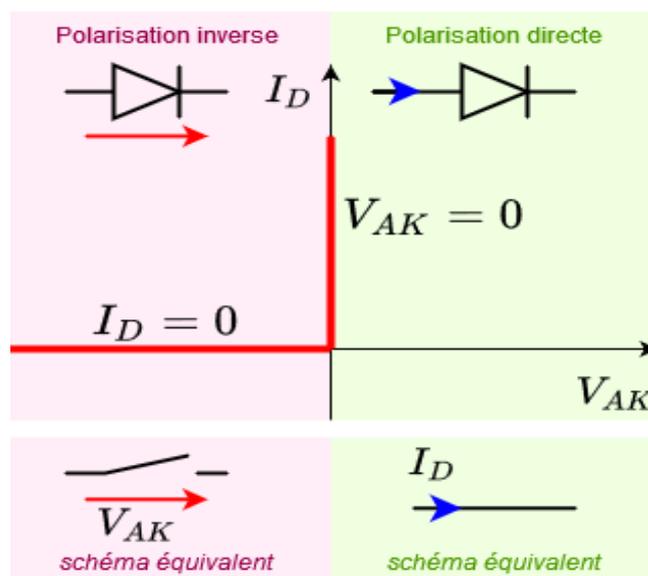


Figure (II.03) : Caractéristique de la diode parfaite

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 aussi bien positives que négatives, lorsqu'il est bloqué. Il n'est pas réversible en courant et ne permet que des courants positifs, c'est-à-dire dans le sens anode cathode, à l'état passant.

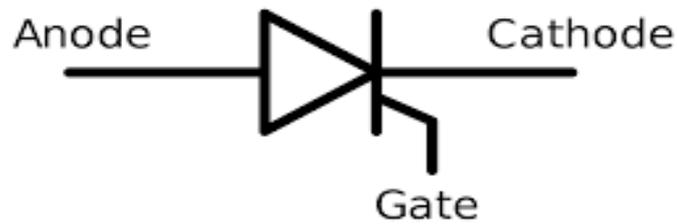


Figure (II.04) : Symbole du thyristor



Figure (II.05) : Diffèrent formes du thyristor

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.

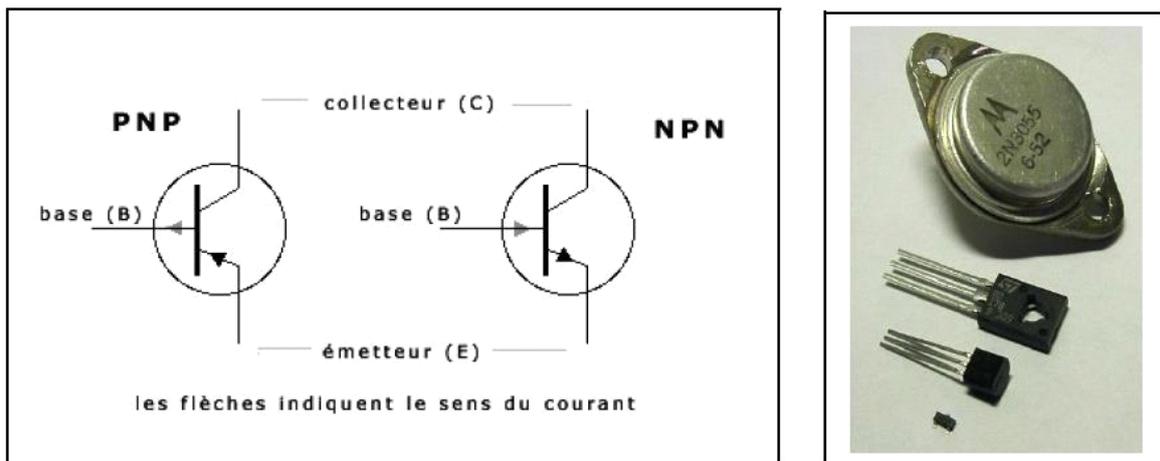


Figure (II.06) : Transistor bipolaire (PNP et NPN)

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

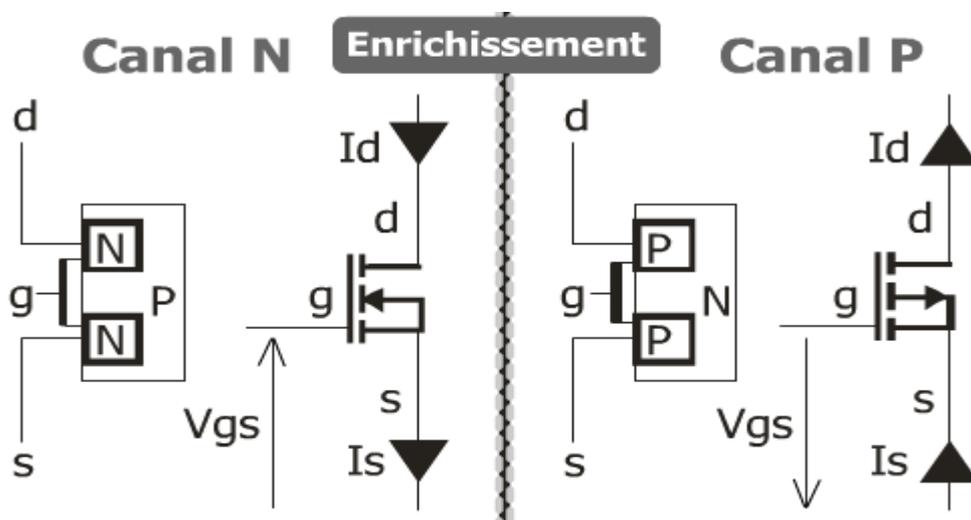


Figure (II.07) : Transistor MOSFET à canal N et P

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 MOSEFT 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 repolarisation de la grille.

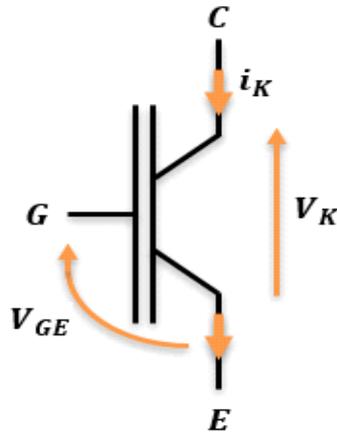


Figure (II.08) : Transistor IGBT

II.3/Les convertisseurs statiques

Les éléments de puissance (tel que transistor, diode, thyristor etc...) permettant de réaliser des montages concrets pour convertisseur d'énergie basée sur des systèmes statique appelés convertisseur.

En définitif les convertisseurs statiques ne sont que des composants électrique à base de semi-conducteurs capables de notifier la tension ou la fréquence de l'onde électrique comme on l'habitude de distinguer deux sortes de tension :

Source de la tension continue.

Source de la tension alternative

II.3.1/ Les différents types de convertisseurs statiques

Il y a quatre types de convertisseurs :

Convertisseur alternatif-continu : Redresseur.

Convertisseur continu-continu : Hacheur.

Convertisseur continu-alternatif : Onduleur.

Convertisseur alternatif-alternatif : Gradateur

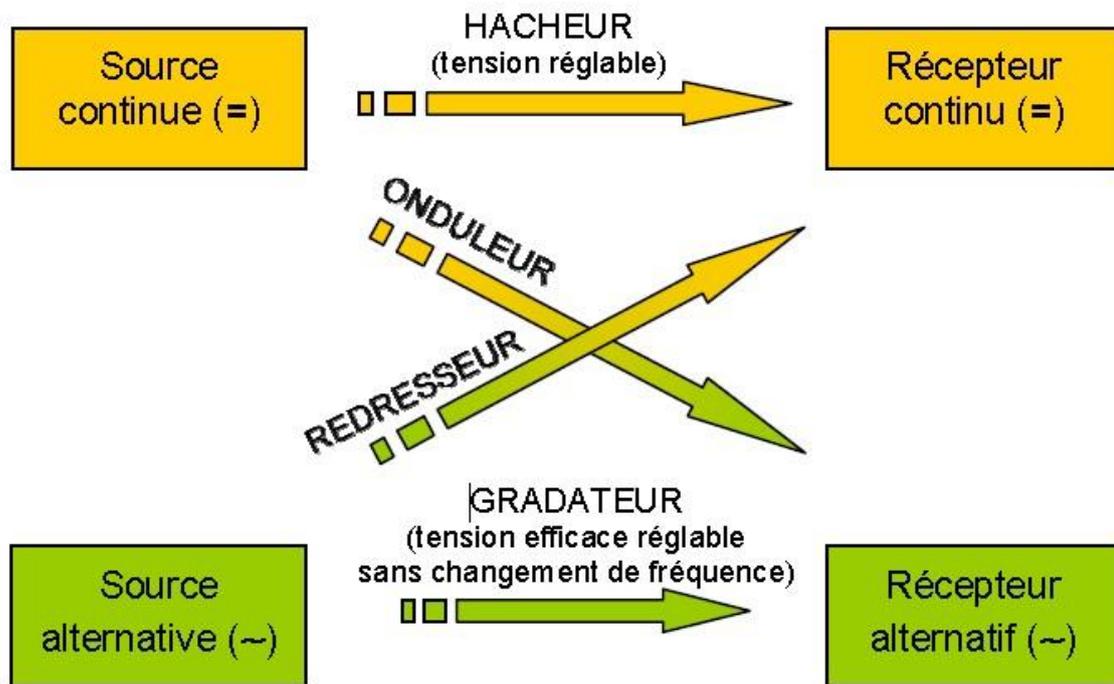


Figure (II-09) : familles des convertisseurs statiques

II.3.2) Redresseurs

C'est un convertisseur alternatif-continu. La tension de sortie est non alternative (valeur moyenne non nulle). Cette valeur moyenne peut être réglée dans le cas d'un redresseur commandé. Ils sont utilisés principalement pour alimenter des charges fonctionnant avec une tension continue ou pour recharger des batteries (en effet, un redresseur est toujours intégré dans les chargeurs de vos PC ou vos téléphones portables).

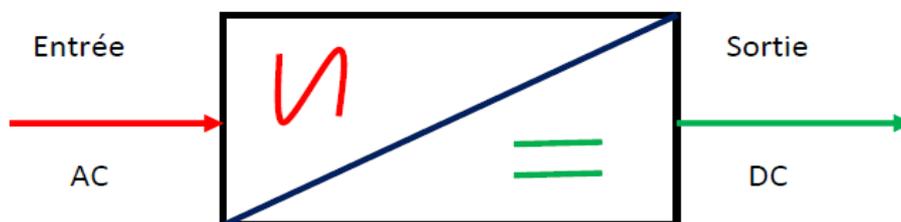


Figure (II-10) : représentation symbolique du redresseur.

II.3.3) Onduleurs

L'onduleur est un convertisseur continu-alternatif, utilisé principalement pour alimenter les charges fonctionnant avec une tension alternative lorsqu'on dispose

d'une source continue (batteries par exemple) ou pour injecter l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques dans le réseau. On distingue 2 types :

-Un onduleur autonome délivre une tension avec une fréquence soit fixe, soit ajustable par l'utilisateur. Il n'a pas toujours besoin de réseau électrique pour fonctionner ; par exemple un convertisseur de voyage que l'on branche sur la prise allume-cigare d'une voiture utilise le 12 V continu du véhicule pour générer du 120 ou 230 V, alternatif en 50 ou 60 Hz ;

-Un onduleur non autonome est un montage redresseur tout thyristors (pont de Graetz) qui, en commutation naturelle assistée par le réseau, auquel il est raccordé, permet un fonctionnement en onduleur (par exemple par récupération de l'énergie lors des périodes de freinage dans les motrices électriques).

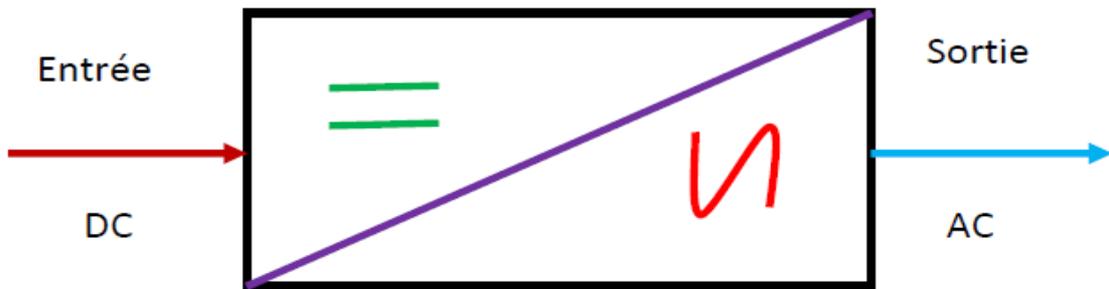


Figure (II-11) : représentation symbolique de l'onduleur.

II.3.4) Gradateur

C'est un convertisseur alternatif-alternatif, qui donne en sortie une tension alternative de même fréquence que la tension d'entrée et dont on peut réduire la valeur efficace de façon continue. Ce convertisseur est essentiellement utilisé pour la varier la vitesse des moteurs alternatifs comme les moteurs asynchrones ou synchrones en

variant leur tension d'alimentation.

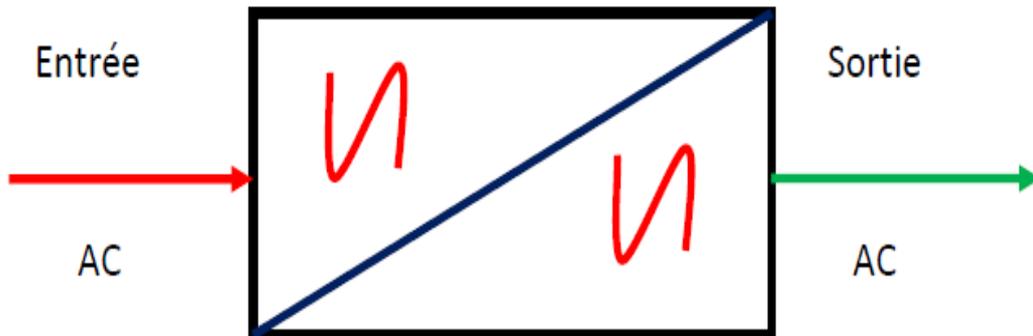


Figure (II-12) : représentation symbolique d'un gradateur.

II.3.5) Hacheur

Un convertisseur à courant continu permet la conversion de continu à continu sans liaison avec une source à courant alternatif.

Le hacheur est un commutateur électronique à fonctionnement périodique qui, alimente à partir d'une source à tension continue fixe, peut fournir à une charge une tension continue variable

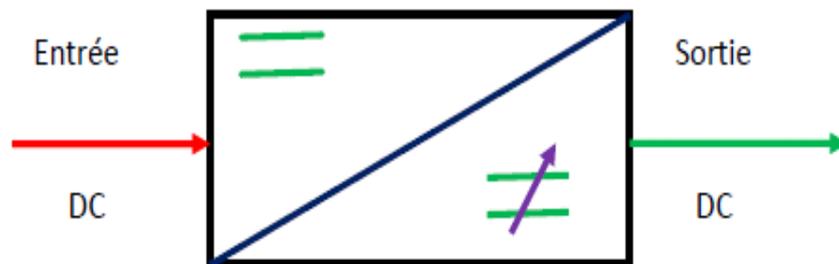


Figure (II-13) : conversion continue/ continu.

Utilisations

Leur utilisation permet le contrôle de la puissance électrique dans des circuits fonctionnant-en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. En forte puissance, il intervient comme organe de réglage de la puissance électrique en continu. Généralement dans les systèmes de contrôle de vitesse ou de couple de machines électriques. En petite et moyenne puissance, ils sont utilisés comme une alimentation (Alimentations à découpages).

Structures fondamentales

Ces convertisseurs autorisent le transfert d'énergie d'une source vers une charge, celles-ci sont :

Soit de nature capacitive (source de tension),

Soit de nature inductive (source de courant).

II.4/ Types des hacheurs

II.4.1/Hacheur non réversible

3.1.1. Hacheur série

- Principe du 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

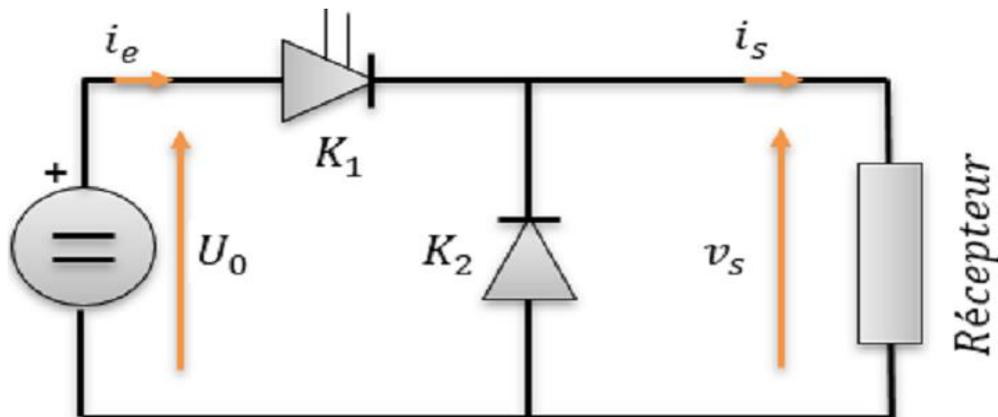


Figure (II.14) : Structure d'hacheur série

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 le hacheur, K_1 est ferme durant αT

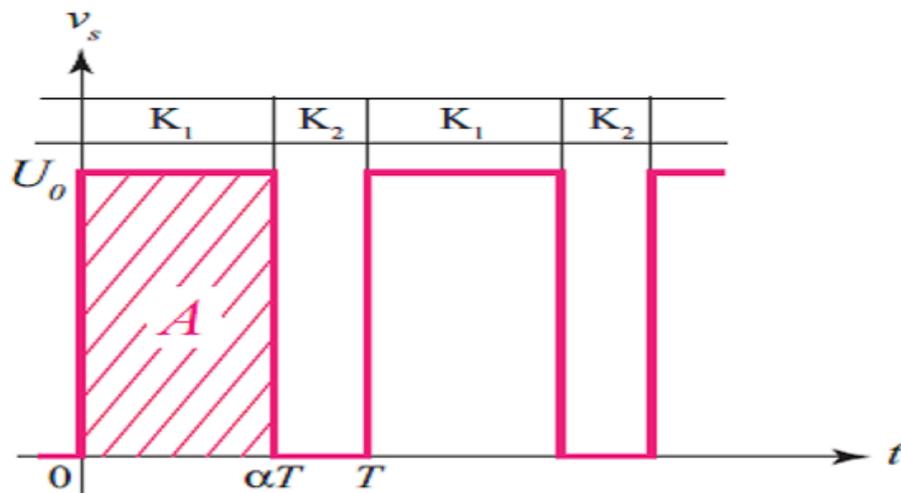


Figure (II.15) : Tension de sortie V_s

La quantité sans unité α constitue le rapport cyclique du 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 $A = \alpha T U_0$, 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 .

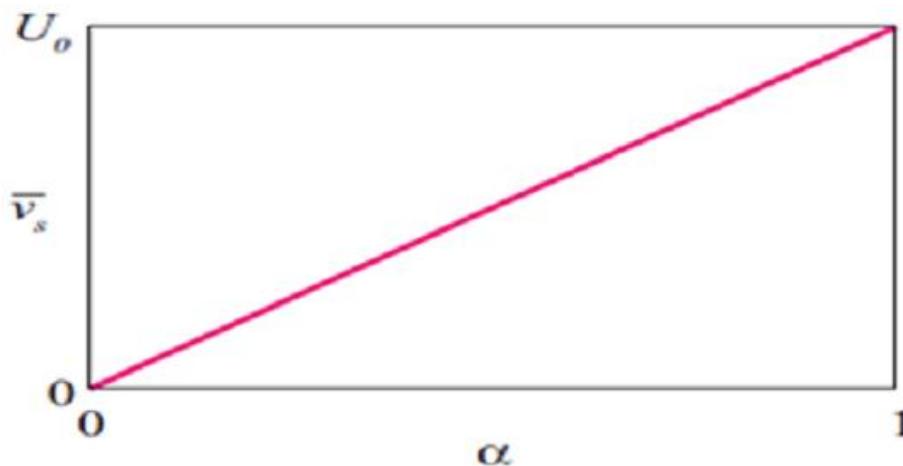


Figure (II.16) : Tension de sortie moyenne V_s

a. Réalisation des interrupteurs

Dans la suite on s'intéressera exclusivement au cas où le récepteur est inductif figure (II.20) (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 $t = T$.

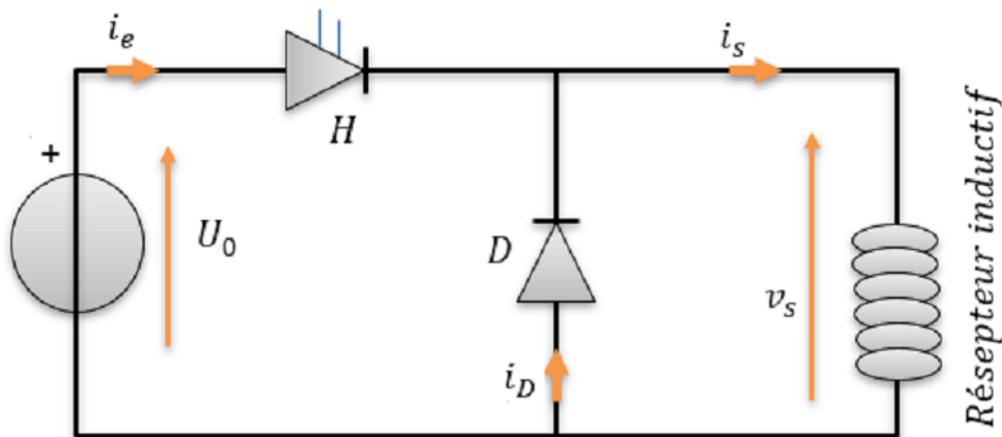


Figure (II.17) : Structure d'hacheur série charge L.

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

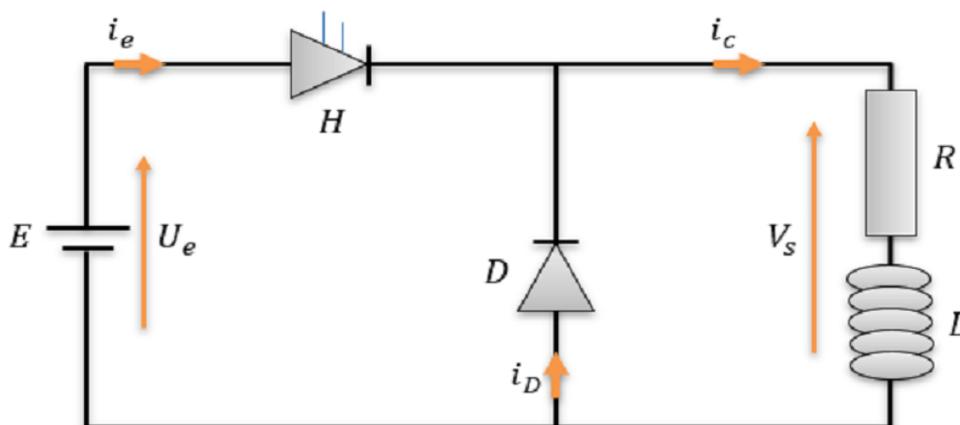


Figure (II.18) : Structure d'hacheur série charge R.L.

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

$$U_e = V_s = R i_c + L \frac{d i_c}{d t} \quad (II.01)$$

$$i_c(t) = I_0 e^{\frac{t}{\tau} + \frac{Ue}{R}}, \tau = \frac{R}{L} \quad (\text{II. 02})$$

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

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

$$i_c(t) = I_1 e^{-(t-\alpha T)/\tau}, \tau = \frac{R}{L} \quad (\text{II. 04})$$

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 par la périodicité de i_c en régime établie.

$$i_s(t = 0) = i_s(t = T)$$

On obtient :

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

$$I_1 = \frac{Ue}{R} \left(\frac{1 - e^{\frac{-\alpha T}{\tau}}}{1 - e^{\frac{-T}{\tau}}} \right) \quad (\text{II. 06})$$

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

$$I_{c \min} = i_0 + \frac{Ue}{R} \quad (\text{II. 07})$$

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

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

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

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

$$\overline{V_s} = L \overline{\frac{dic}{dt}} + Ric \quad (\text{II. 10})$$

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

Fonctions :

$$\alpha Ue = L \overline{\frac{dic}{dt}} + Ric \quad (\text{II. 11})$$

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

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

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

$$\Delta ic = I_{max} - I_{min} = \frac{Ue}{R} \alpha (1 - \alpha) \frac{t}{\tau} \quad (\text{II. 13})$$

$$\Delta ic = I_{max} - I_{min} = \frac{Ue}{R} \alpha (1 - \alpha) T = \frac{Ue}{R} \alpha (1 - \alpha) \frac{1}{f} \quad (\text{II. 14})$$

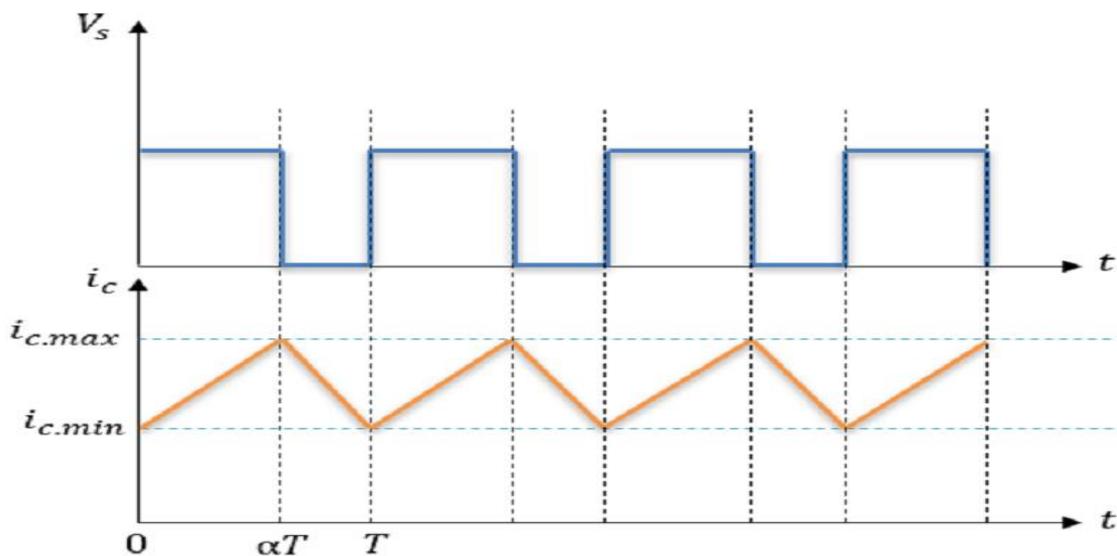


Figure (II.19) : Régime de conduction continue

❖ Conduction discontinue

De 0 à αT : H fermé D ouvert $Ue = Vs$; donc on a :

Avec

$$Ue = Vs = Ric + L \frac{dic}{dt} \quad (\text{II. 15})$$

$$ic(t) = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{Ue}{R}, \tau = \frac{R}{L} \quad (\text{II. 16})$$

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

$$0 = RIc + L \frac{dic}{dt} \quad (II. 17)$$

$$ic(t) = I1e^{-(t-\alpha T)/\tau}, \tau = \frac{R}{L} \quad (II. 18)$$

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

$$0 = RIc + L \frac{dic}{dt} \quad (II. 17)$$

$$ic = 0 \quad (II. 19)$$

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

$ic(t = 0) = 0$ on obtient

$$I_0 = -\frac{Ue}{R} \quad (II. 20)$$

$Ic(t = \alpha T) = I_{max}$ on obtient :

$$I1 = \frac{Ue}{R} \left(1 - e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} \right) \quad (II. 21)$$

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

$$Ic \text{ max} = I1 \quad (II. 22)$$

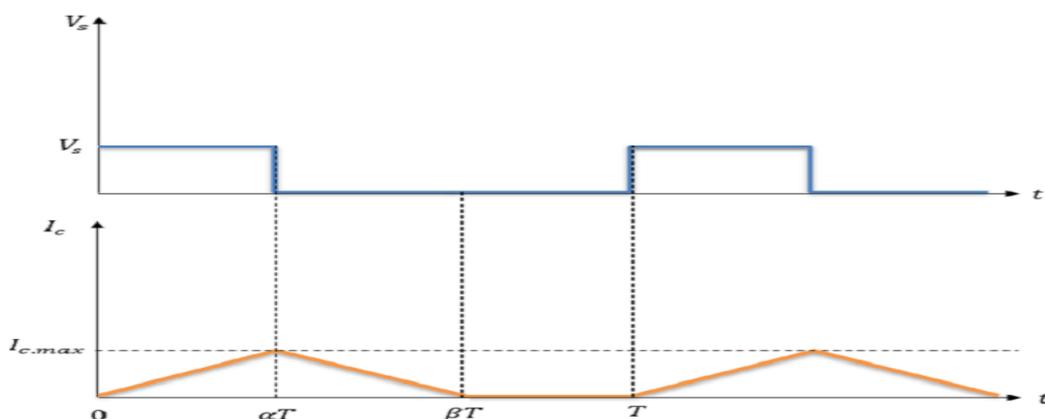


Figure (II.20) : Régime de conduction continue

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 :

$R \rightarrow$ chute de tension ohmique.

$L \rightarrow$ chute de tension inductive.

$E \rightarrow$ f e m moyennes.

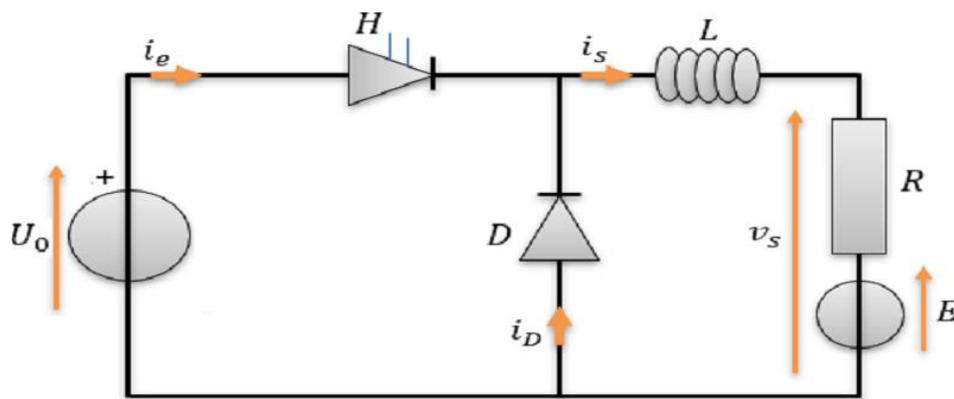


Figure (II.21) : Structure d'hacheur série charge R.L.E

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 bloqué

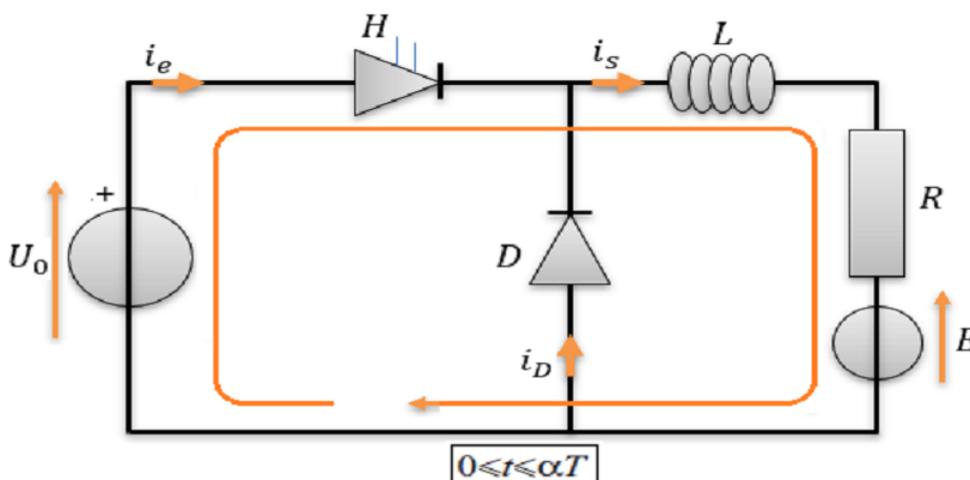


Figure (II.22) : Passant de courant pour H fermée

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

$$U_0 - RI_s - L \frac{dis}{dt} - E = 0 \quad (II.23)$$

Avec
$$I_s(t) = i_0 e^{\frac{-t}{\tau}} + \frac{U_0 - E}{R} \quad (II.24)$$

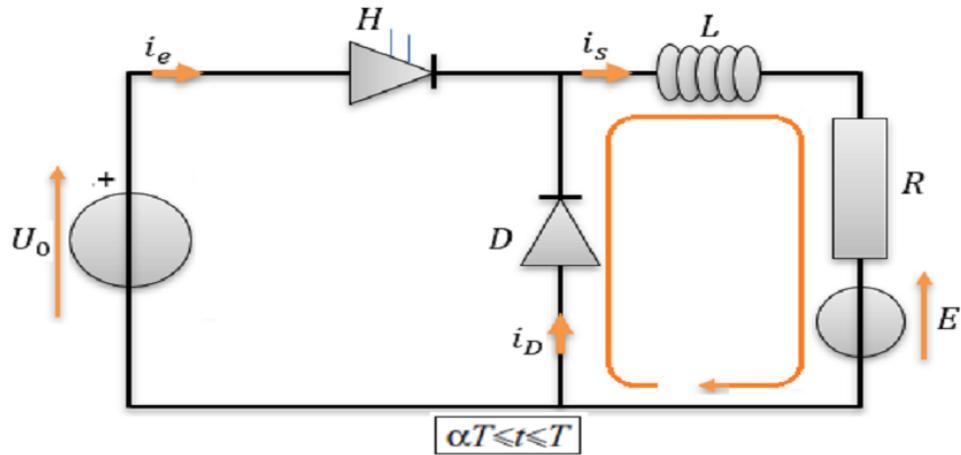


Figure (II.23) : Passant de courant pour H ouvert

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

$$RI_s + L \frac{dis}{dt} + E = 0 \quad (II.25)$$

$$I_s(t) = i_0 e^{\frac{-t}{\tau}} + \frac{U_0 - E}{R} \quad (II.24)$$

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.

$$I_0 = \frac{U_0}{R} \left(\frac{e^{\frac{-T(1-\alpha)}{\tau}} - 1}{1 - e^{\frac{-T}{\tau}}} \right) \quad (II.26)$$

$$I_1 = \frac{U_0}{R} \left(\frac{1 - e^{\frac{-\alpha T}{\tau}}}{1 - e^{\frac{-T}{\tau}}} \right) \quad (II.27)$$

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 :

$$i_s \min = I_0 + \frac{U_0 - E}{R} \quad (II.27)$$

$$i_s \max = I_1 - \frac{E}{R} \quad (II.28)$$

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

$$V_s = L \frac{di_s}{dt} + Ri_s + E \quad (II.29)$$

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

$$V_s = L \frac{di_s}{dt} + Ri_s + E \quad (II.30)$$

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

$$\alpha U_e = L \overline{\frac{di_s}{dt}} + \overline{Ri_s} + E \quad (II.31)$$

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

$$\overline{i_s} = \frac{\alpha U_0 - E}{R} \quad (II.32)$$

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 $R \cdot i_s$ est négligeable devant la f.é.m. E du récepteur. En effet, dans ce cas on a :

$$V_s = \alpha U_0 = E + Ri_s = E \quad (II.33)$$

$$\Delta i_s = \frac{U_0 T}{R \tau} \alpha (1 - \alpha) = \frac{(1 - \alpha) U_0}{L} \alpha T = \frac{(U_0 - \alpha U_0)}{L} \alpha T \quad (II.34)$$

$$\Delta I_s = \frac{(U_0 - E)}{L} \alpha T = \frac{(U_0 - E) \alpha}{L f} \quad (\text{II.35})$$

❖ Conduction discontinue

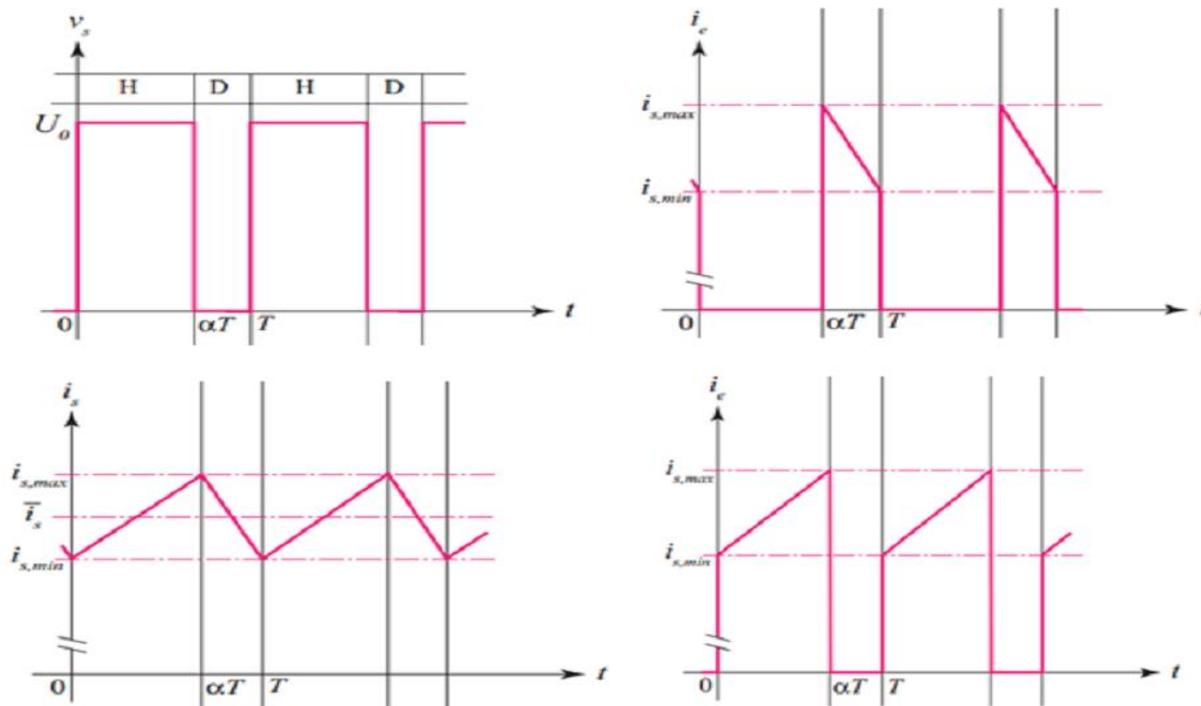


Figure (II.24) : Régime de conduction continue charge R.L.E

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

$$U_0 - R I_s - L \frac{di_s}{dt} - E = 0 \quad (\text{II.36})$$

$$I_s(t) = i_0 e^{\frac{-t}{\tau}} + \frac{U_0 - E}{R} \quad (\text{II.24})$$

$$\tau = \frac{L}{R}$$

- De αT à βT , H est bloqué et D est passant

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

$$U_0 = E \quad (\text{II.37})$$

$$I_s = 0 \quad (\text{II.38})$$

L'expression des constantes I_0 et I_1 en fonction des paramètres du montage on écrit

$$I_s(t = 0) = 0 \text{ on obtient}$$

$$I_0 = \frac{E-U_0}{R} \quad (\text{II.39})$$

$I(\alpha T) = I_{max}$ on obtient :

$$I_1 = \frac{U_0}{R} + \frac{E-U_0}{R} e^{-\alpha T/\tau} \quad (\text{II.40})$$

Donc
$$I_{max} = I_1 - \frac{E}{R} \quad (\text{II.41})$$

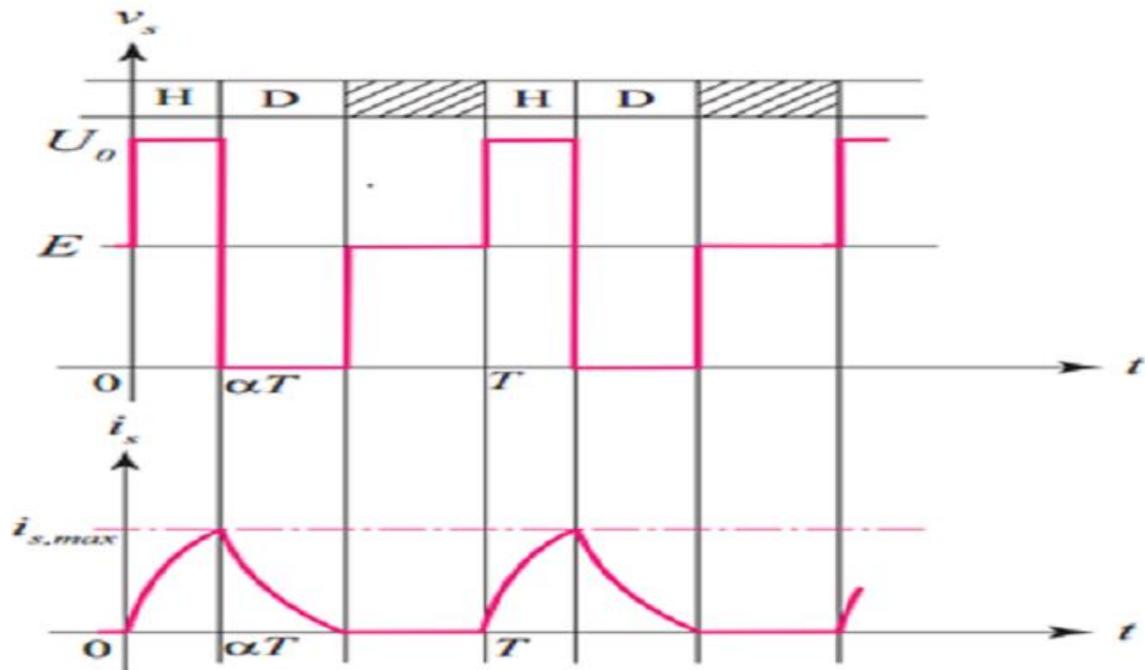


Figure (II.25) : Régime de conduction discontinu R.L.E

II.4.1.2/ Hacheur parallèle

La configuration du hacheur est présentée dans la figure (II.33). Quand le 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.

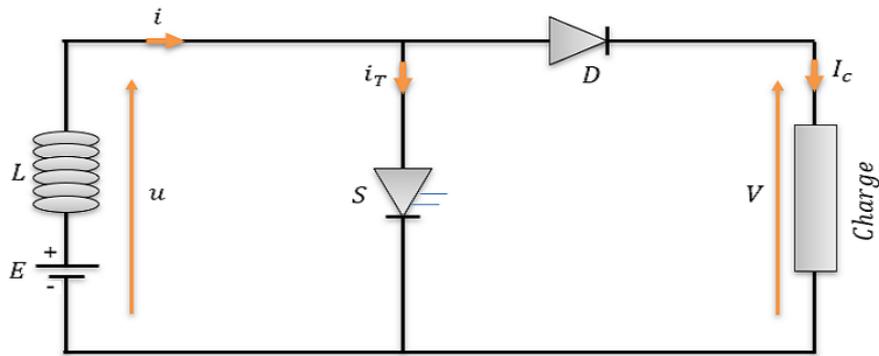


Figure (II.26) : Structure Hacheur parallèle

Pour $0 < t < \alpha T$

S est conducteur, D est bloqué

$$U = 0$$

Pour $\alpha T < t < T$

S est bloqué et D est conducteur

$$U = V$$

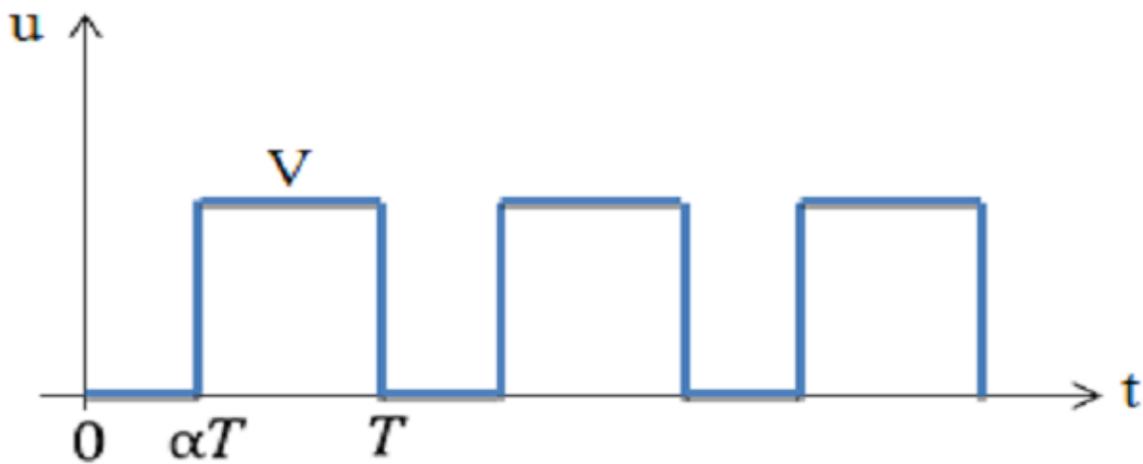


Figure (II.27) : Chronogramme de tension V

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. 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.28).

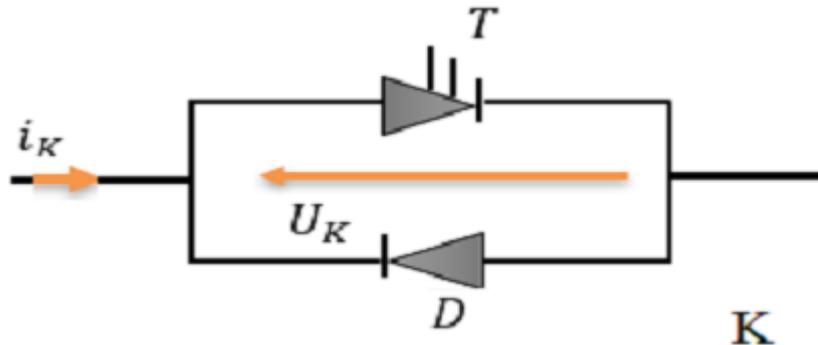


Figure (II.28) : Schéma d'Interrupteur réversible en courant

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.

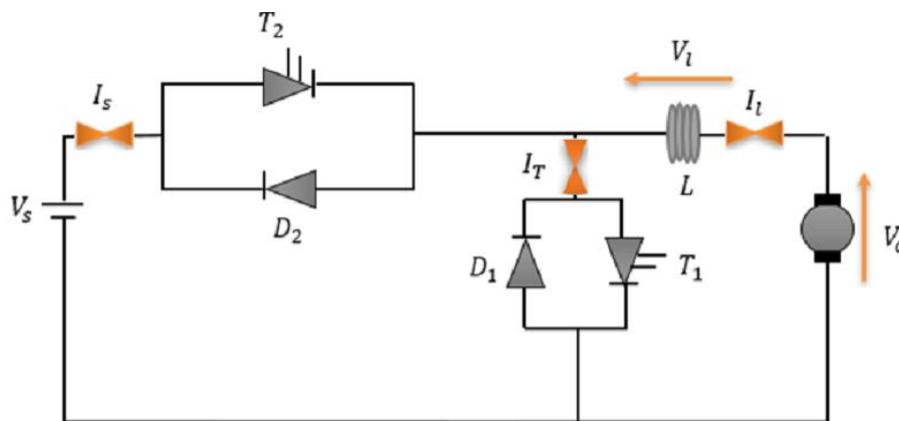


Figure (II.29) : Structure d'un hacheur série réversible en courant

La structure de le hacheur série réversible en courant est donnée par la figure (II.29). C'est la structure de le 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 du hacheur réversible en tension est donné par la figure (II.30).

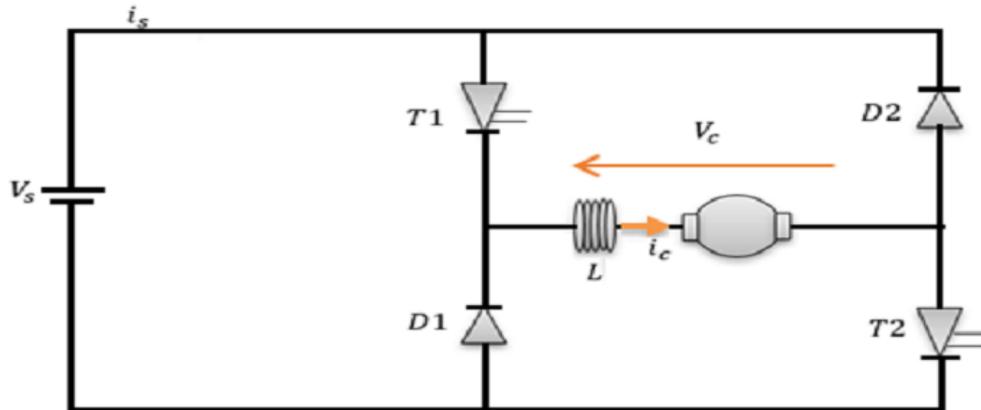


Figure (II.30) : Schéma de Principe d'un hacheur réversible en tension

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 le 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 le 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.31).

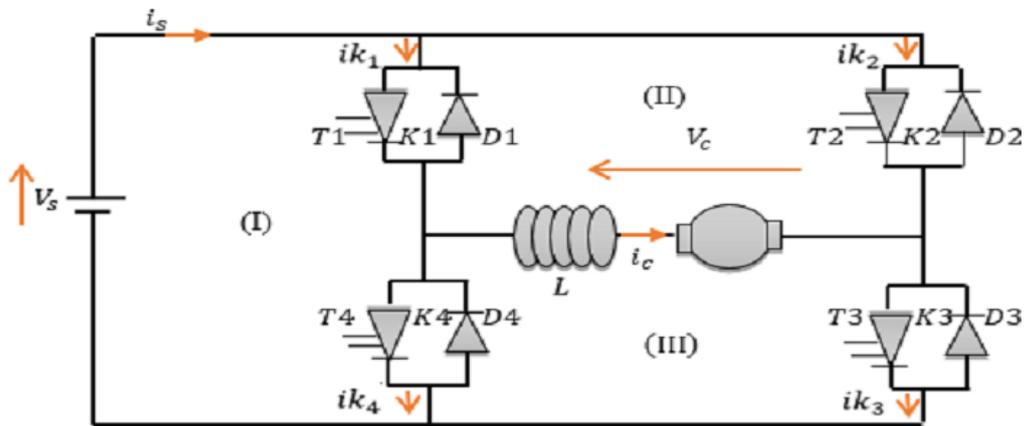


Figure (II.31) : Schéma de principe du hacheur réversible en tension et en courant

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.

II.5/ Conclusion

Le 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. Le 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 III

Association machine
Courant Continu-
Hacheur

III.1/ Introduction

L'usage du moteur à courant continu à vitesse variable a été et reste très répandu dans un grand nombre d'applications, cela s'explique par la simplicité de son fonctionnement, de son alimentation et de sa commande.

Fondamentalement, la structure du moteur comprend deux enroulements, l'enroulement d'induit et l'enroulement d'excitation. Le couple électromagnétique ne dépend que de deux courants, il est indépendant de la vitesse et de la position du rotor. Il en résulte un fonctionnement simple qui permet de commander le moteur facilement aussi bien en vitesse qu'en position ou en couple. On impose ses différentes commandes à partir des réglages des tensions d'alimentations de l'induit ou de l'inducteur. On préfère utiliser la première méthode, car dans ce cas la rigidité des caractéristiques est meilleure. Il y a aussi moins de perte et la gamme de réglage est plus large.

Les réglages de la tension sont facilement obtenus à partir de convertisseurs statiques, tel que les hacheurs, qui sont aisés à construire et à commander.

III.2 / Variation de la tension de sortie d'un hacheur

Le fonctionnement des hacheurs abaisseur a été traité dans le chapitre II. Nous avons montré que pour varier la tension de sortie du hacheur, on doit varier le rapport cyclique. À partir de la définition du rapport cyclique, on peut concevoir deux procédés de réglages :

- Variation du temps d'enclenchement à période de commutation constante.
- Variation de la période de commutation à durée de fermeture constante.

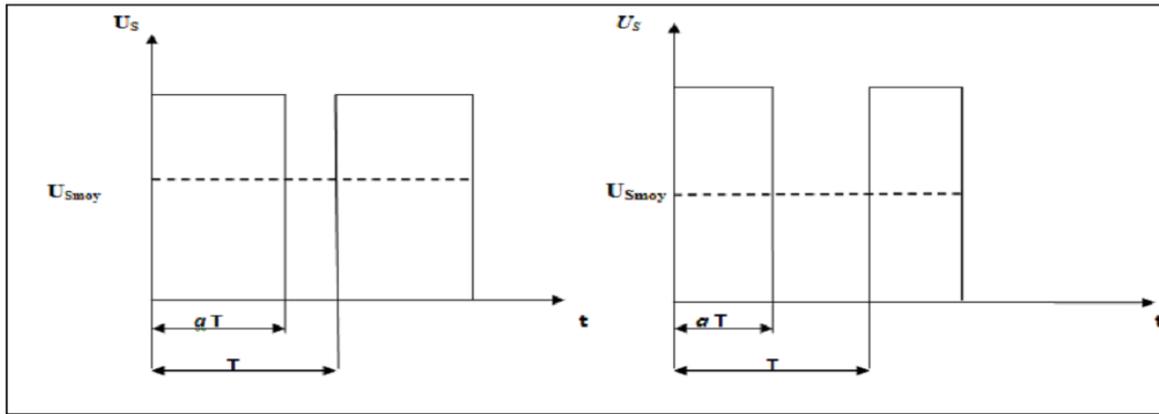


Figure (III-01) : Variation de la durée de fermeture.

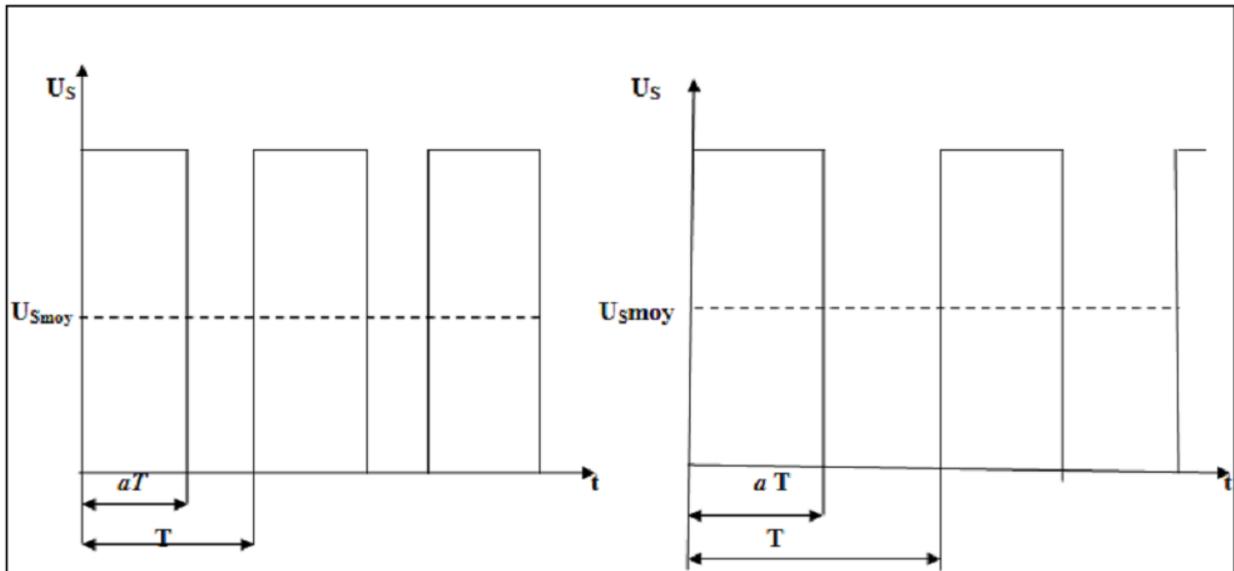


Figure (III-02) : Variation de la période.

Le système hacheur-moteur a été conçu afin d'avoir un fonctionnement à vitesse variables, mais le fonctionnement sans régulation présente un certain nombre d'inconvénient tel qu'un important courant au démarrage, une diminution de la vitesse de rotation en cas d'augmentation de la charge. De ce fait, et pour effectuer une certaine tâche avec des performances donnée, le système doit être asservi.

III.3/ Les critères de performances de la régulation

Un système asservi est conçu pour répondre à un précis. La grandeur de la sortie d'un système asservi est étroitement dépendante de la grandeur d'entrée. Cette

relation doit être vérifiée malgré la perturbation externe qui affectent le processus.

Dans la plupart des cas il s'agit pour la sortie de (recopier) l'entrée l'écart de réglage, qui est la différence entre l'entrée et la sortie, joue donc un rôle majeur dans l'appréciation des performances d'un tel système.

Pour un système de régulation, on observe l'écart de réglage $e(t)$ afin de vérifier que le régime transitoire dû à une perturbation temporaire ou persistante, est convenablement amortie et que l'effet de cette perturbation sur la sortie n'est plus observable au bout d'un temps spécifié sur le cahier de la charge.

Les performances d'un asservissement s'apprécient au regard des deux critères essentiels qui sont la stabilité et la précision. Cette tâche sera effectuée par un organe très important qui est le régulateur (correcteur, compensateur), qui doit être tout d'abord calculé : c'est la synthèse. Mais tout d'abord on doit chercher le modèle mathématique du processus à commander. Si, comme le cas d'une variation de vitesse à courant continu, il y a plusieurs grandeurs à régler (courant, vitesse, etc...), on réalise un réglage en cascade.

On calcule tout d'abord le circuit de réglage le plus interne pour aller vers le plus externe. Dans le cas d'un hacheur à thyristors on réalise le schéma suivant :

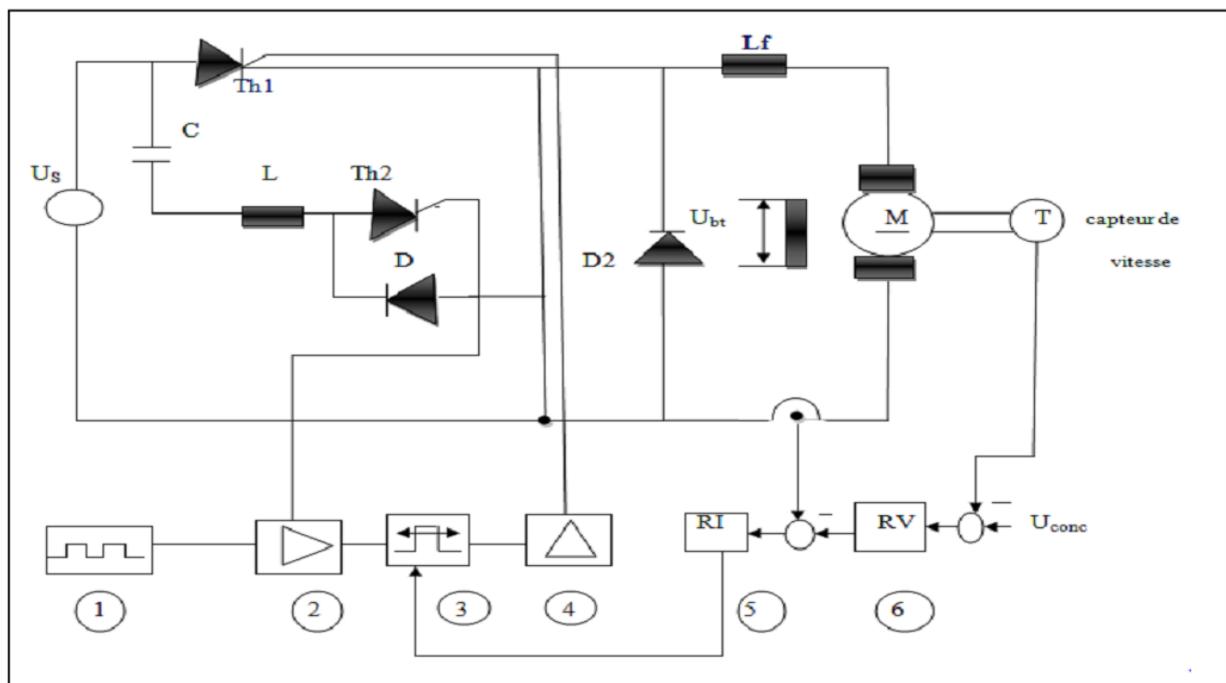


Figure (III-03) : Le circuit de commande.

Le circuit de commande se compose de :

- 1- Horloge.
- 2- 4amplificateur d'impulsion.
- 3- Organe de commande.
- 5- régulateur de courant.
- 6- régulateur de vitesse.

La boucle interne est la boucle de réglage du courant d'induit, et la boucle externe réalise le réglage de la vitesse de rotation. On peut aussi voir que le réglage de la tension d'induit se fait par variation de la largeur des impulsions de la tension à la sortie du hacheur. On utilise un tachy-générateur pour la mesure de vitesse ainsi qu'un capteur de courant. Les deux capteurs délivrent une tension qui sera l'image de la vitesse et de courant. La régulation de vitesse traite l'écart entre la consigne de la vitesse et sa valeur réelle. Sa sortie sera à son tour la consigne pour la boucle de courant.

L'organe de commande envoie des impulsions à des instants qui dépendent de la loi de réglage à la sortie du régulateur de courant et synchronisé par rapport aux impulsions de l'horloge. Dans le cas d'un hacheur à IGBT2 n'existe pas. La durée des impulsions sera aussi différente, puisque pour garder l'IGBT fermé, il faut maintenir l'impulsion appliquée à sa base. Ce schéma de principe, correspond le schéma bloc suivant :

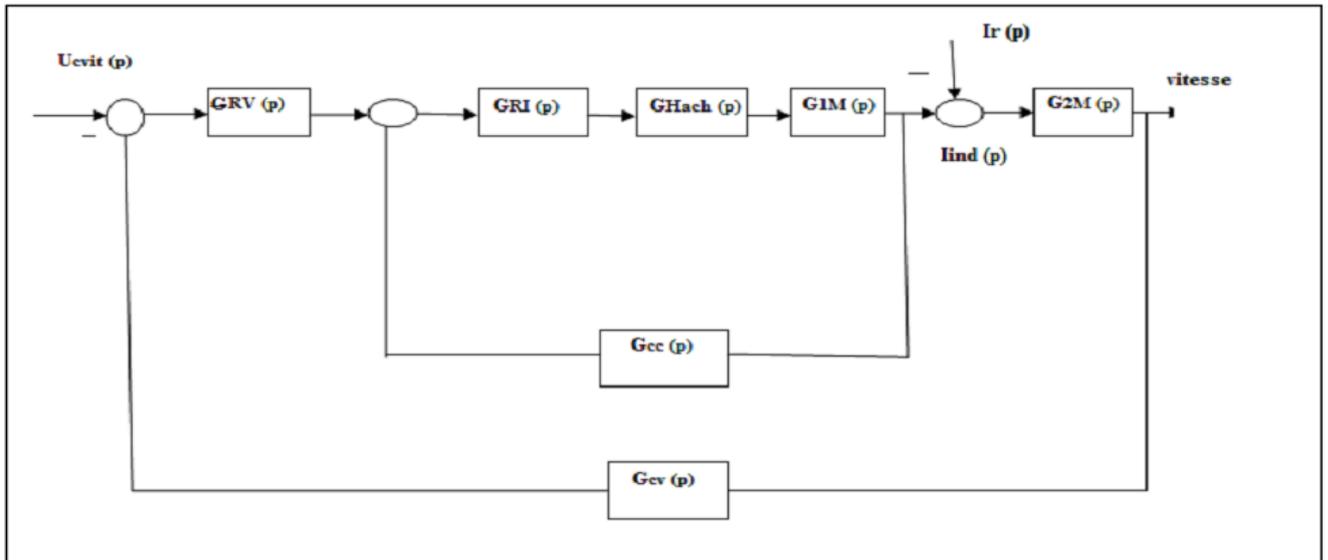


Figure (III-04) : Le schéma bloc de l'association MCC-Hacheur.

Il est donc nécessaire de faire la modélisation du moteur, du hacheur, des capteurs de vitesse et du courant afin de déterminer les fonctions de transfert mises en jeu et de calculer celles des régulateurs.

III.4/ Modélisation en régime dynamique

III.4.1/ Fonction de transfert du moteur à courant continu à excitation séparée

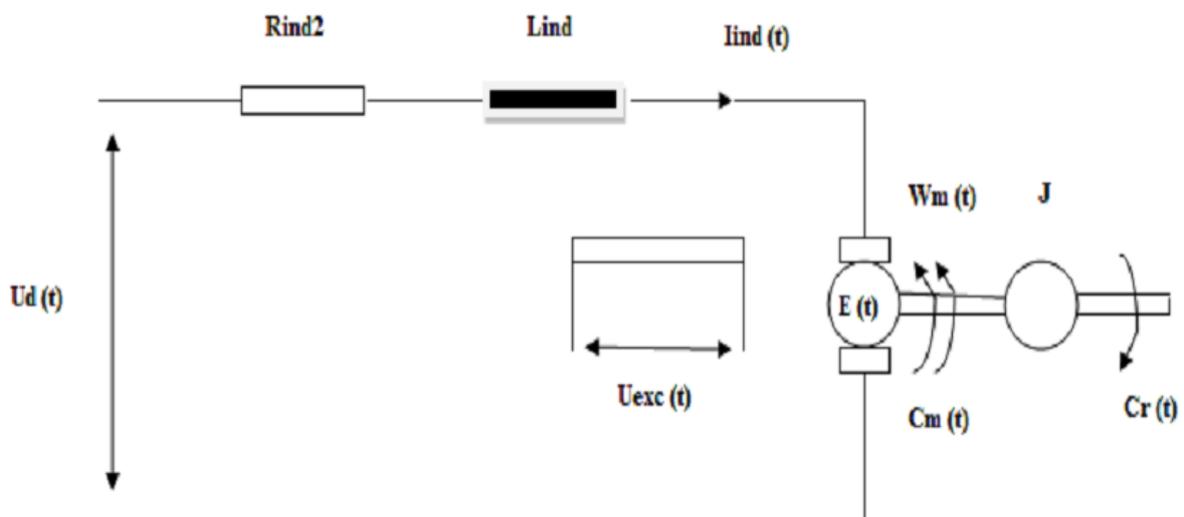


Figure (III-05) : Moteur à courant continu à excitation séparé.

Le comportement dynamique du moteur à courant continu est décrit par les équations

Suivantes :

$$U_d(t) = R_{ind} I_{ind}(t) + L_{ind} \frac{di_{ind}}{dt} + e(t) \quad (III-1)$$

$$e(t) = k \varphi \omega_m(t) \quad (III-2)$$

$$C_m(t) = k \varphi I_{ind}(t) + L_{ind} \frac{di_{ind}}{dt} + e(t) \quad (III-3)$$

On utilise aussi l'équation générale de la dynamique :

$$C_m(t) - C_r(t) = J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (III-4)$$

$C_r(t)$: étant le couple charge et J le moment d'inertie ramener à l'arbre du moteur.

$U_d(t)$: Tension d'alimentation de l'induit du moteur (dans notre cas fourni par le hacheur).

R_{ind} : Résistance du circuit d'induit.

$L_{ind} \Sigma + L_{SI}$: Inductance sommaire du circuit d'induit.

$K\varphi$: Constante du moteur.

$e(t)$: (f.c.é.m.) Du moteur.

Puisqu'on veut calculer des fonctions de transfert, On appliquera donc la transformation de Laplace sur les équations précédentes.

$$C_d(p) = R_{ind} I_{ind}(p) + p L_{ind} \Sigma \cdot I_{ind}(p) + k\varphi I_{ind}(p) + k\varphi W_M(p) \tag{III-5}$$

$$C_M(p) = k\varphi \cdot I_{ind}(p) \tag{III-6}$$

$$C_M(p) - C_r(p) = PJ W_M(p) \tag{III-7}$$

Qui seront traduites en un schéma bloc pour obtenir :

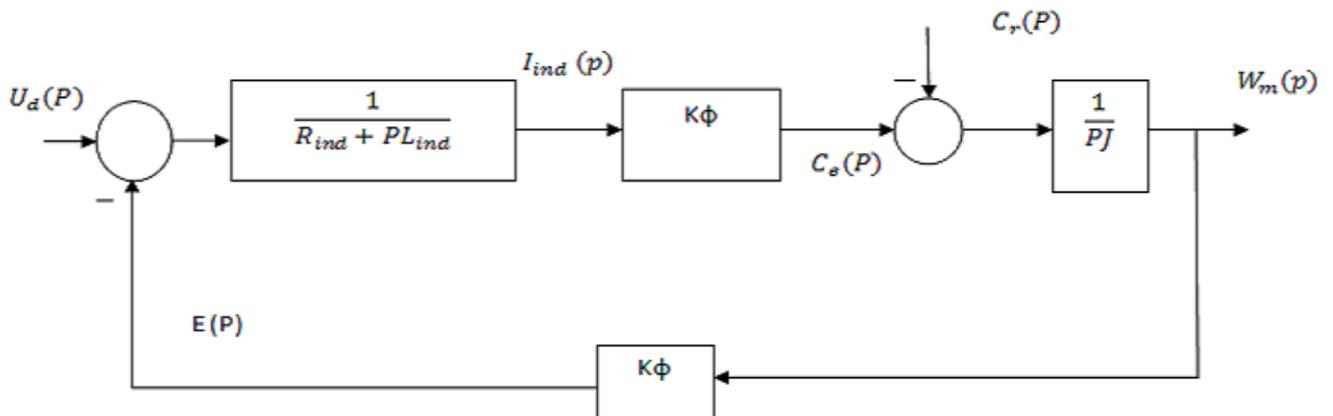


Figure (III-06) : Schéma fonctionnel moteur à courant continu.

On néglige, dans la plus part des cas, la boucle retour de la << >>

Le schéma bloc deviendra alors :

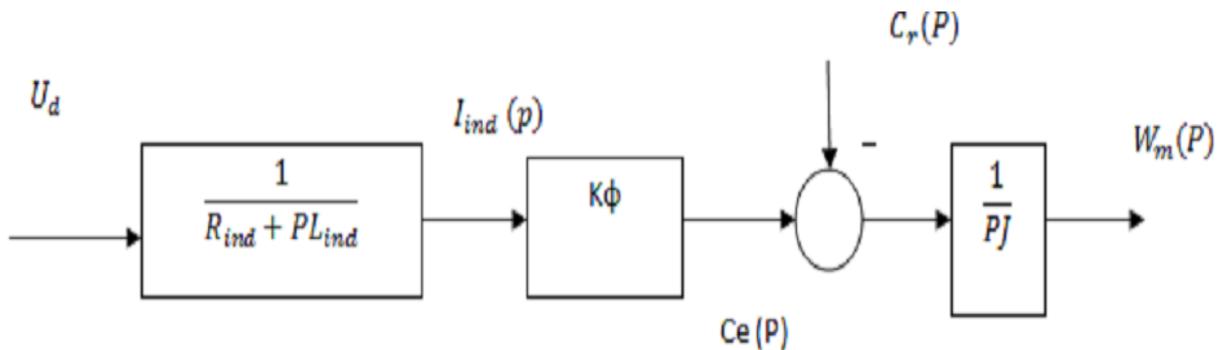


Figure (III-07) : schéma de bloc ouvert

III.4.1.1/ Calcul des paramètres du moteur :

Le moteur utilisé possède les paramètres suivants :

$P_n(KW)$	$N_n(te/m)$	$I_n (A)$	$U_n (V)$	$\eta_n (\%)$	$R_{ind}(\Omega)$	$R_{cm}(\Omega)$	$R_{p.asc}(\Omega)$	$J(Kgm^2)$
1.5	3000	9	220	76	1.3	0.063	0.3	0.045

$$K\phi = \frac{U_n - R_{ind} \cdot I_n}{W_n} = 0.663V/ rad \tag{III- 8}$$

Avec :

$$W_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30} \tag{III-9}$$

$$L_{ind\Sigma} = L_{ind} + L_{si} \tag{III-10}$$

Avec L_{si} : inductance du self de lissage

$$L_{ind} = \beta \frac{U_n}{p \cdot W_n \cdot I_n} \tag{III-11}$$

Et en prend :

$$\beta = 0,25 ; p = 1 \Rightarrow L_{ind} = 0,25 \frac{220}{3,14 \cdot 16,9} = 0,0194H \tag{III-12}$$

La self de lissage est utilisée pour limiter les ondulateurs du courant à la sortie de Hacheur. Elle sera placée en série avec la charge.

Les ondulateurs du courant exprimé en % sont donnés par la relation suivant :

$$\Delta_{SL} = \frac{U_1}{L_{SI}} \cdot \frac{\alpha (1-\alpha)}{fc} \tag{III-13}$$

α : Rapport cyclique.

f_c : Fréquence de commutation.

Nous prenons $f_c = 0.80$ HZ, pour la valeur α , on prendra 0,5 car c'est la valeur qui

Correspond au maximum de l'ondulation du courant.

$$L_{SI} = \frac{U_1 \cdot \alpha(1-\alpha)}{f_c \Delta I} \quad (\text{III-14})$$

On prendra :

$$\frac{\Delta I}{I_n} = 10\% \Rightarrow \Delta I = 10\% I_n = 0,1 I_n = 0,9A \quad (\text{III-15})$$

$$L_{SI} = \frac{300}{4.800 \cdot 0,9} = 0.104H \quad (\text{III-16})$$

$$L_{ind\Sigma} = 0.1235H \quad (\text{III-17})$$

III.4. 1. 2/ Modèle dynamique du hacheur

Pour rester dans le cadre des asservissements linéaires, On admettra des imitions qui sont justifiées dans les cas suivants :

- Bande passante de la régulation réduite par rapports à la fréquence de Commande.
- Courant suffisamment lissé pour que les grandeurs instantanées soient proches De leurs valeurs moyennes.
- Exclusion de cas linéaires, comme le régime discontinu.

Avec ses hypothèses, on peut assimiler le convertisseur à un amplificateur de gain K_{con} , qui se calcule à partie de la caractéristique de transfert en régime statique. Dans le cas d'un hacheur abaisseur, cette caractéristique est exprimée par la relation :

$$U_2 = \alpha U_1 \Rightarrow \frac{U_2}{U_1} = \alpha \quad (\text{III-18})$$

Dans la représentation graphique est :

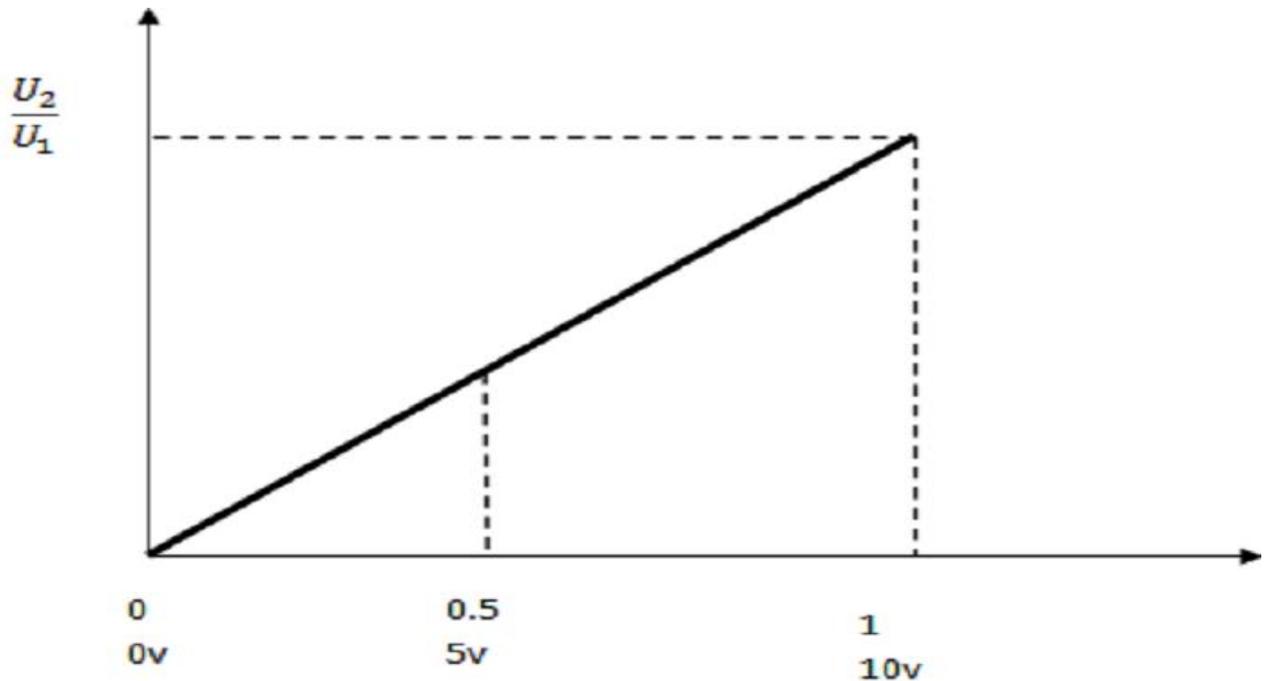


Figure (III-08) : Graphe représentatif.

$$K_{\text{conv}} = \frac{U_2}{U_{\text{conv}}} = \frac{220}{10} = 22 \quad (\text{III-19})$$

III. 4.1. 3/ Modèle dynamique du capteur de courant

Le capteur de courant sert à donner l'image du courant d'induit en tension. On y trouve un filtre pour réduire les ondulations de la tension de sortie. On attribut à cet ensemble la fonction de transfert suivant :

$$G_{e_c}(p) = \frac{K_{cc}}{1+pT_{CC}} \quad \text{avec } T_{cc} = 0.005\text{S} \quad (\text{III-20})$$

Et :

$$K_{cc} = \frac{U_{Smax}}{I_{max}} = \frac{10}{2,5 \cdot 9} = 0,44 \quad (III-21)$$

III. 4.1.4/ Modèle dynamique du capteur de vitesse :

Il donne l'image de la vitesse de tension. On peut l'assimiler à un objet proportionnel.

$$K_{cv} = \frac{10}{W_{max}} = 0.016 \text{vs/rad} \quad (III-22)$$

On peut maintenant dresser le schéma bloc global du système réglé :

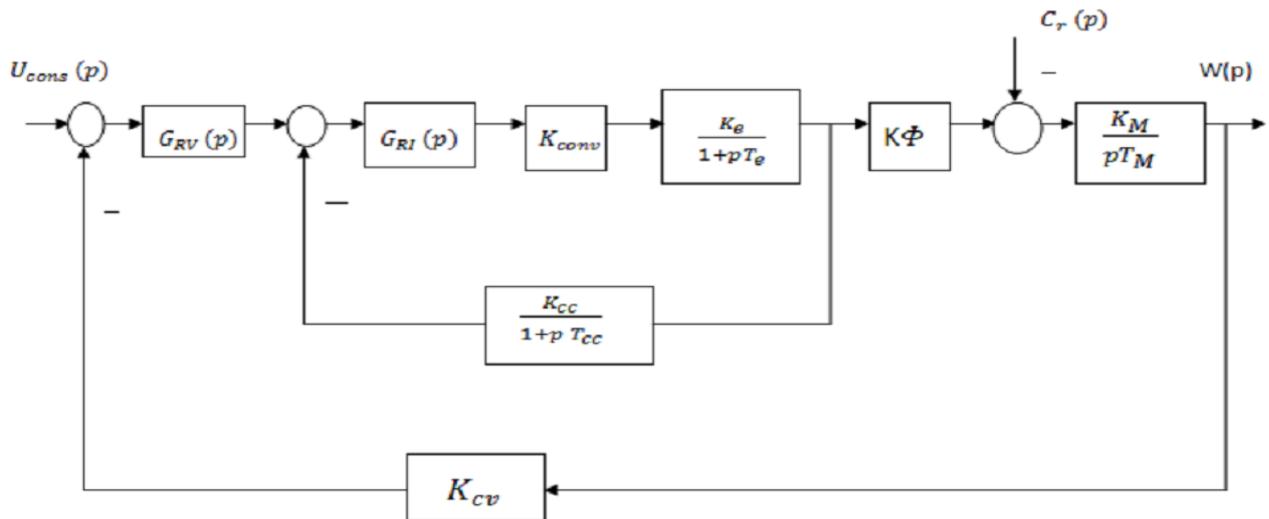


Figure (III-09) : Schéma bloc globale du système réglé.

$$K_e = \frac{1}{R_{ind}} = 0.77 \text{ 1}/\Omega \quad (III-23)$$

$$T_M = \frac{J R_{ind}}{(K\theta)^2} = 0.133 \text{s} \quad (III-24)$$

$$T_e = \frac{L_{ind}\Sigma}{R_{ind}} = 0.095s \tag{III-25}$$

$$K_M = \frac{R_{ind}}{(K\theta)^2} = 2.96 \tag{III-26}$$

Le schéma bloc après insertion de la valeur calculée devient :

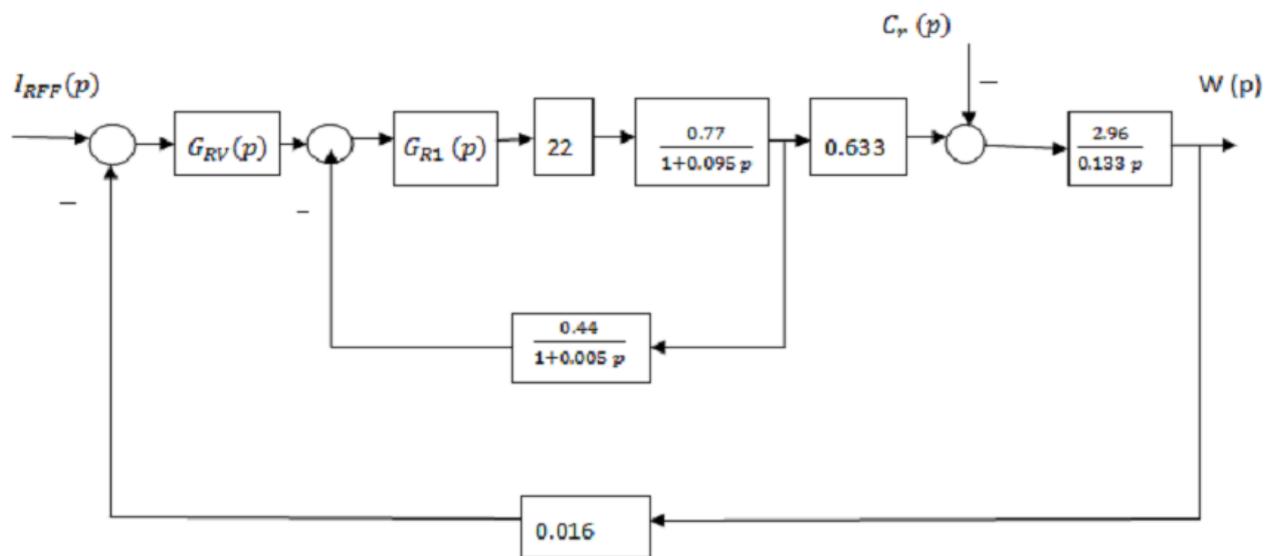


Figure (III-10) : schéma bloc après insertion de la valeur calculée.

III.5/ Synthèse des régulations de courant et de vitesse :

Après avoir calculé les différents modèles des composantes de la régulation, on procède sur calcul de la structure et des paramètres des régulateur de courants et de la vitesse. On est eu présence d'un système de réglage en boucle multiple. Pour calculer les régulateurs. On commence par la boucle la plus interne et on va vers la boucle la plus externe.

On commencera donc par la boucle de courant et puis on posera à la boucle de vitesse. On appliquera une méthode exposé dans [4], que nous présentons brièvement ;

III.5.1/ Méthode de calcul des régulateurs à partir des fonctions de transfert

Pour une fonction de transfert du type

$$G_s(p) = \frac{K_S}{\prod_{i=1}^n (1+p T_i)} \quad (\text{III-27})$$

Qui prend la forme, pour $n= 2$

$$G_s(p) = \frac{K_S}{1+ A_1 p + A_2 p^2} \quad (\text{III-28})$$

Pour prendre un régulateur du type PI avec la fonction de transfert :

$$G_R(p) = \frac{K_R}{p} (1 + p T_D) \quad (\text{III-29})$$

Les paramètres du régulateur se calculant comme suit :

$$K_R = \frac{1}{K_S a_k C'_1} \quad (\text{III- 30})$$

$$\text{Avec} \quad C'_1 = C_1 - T_1 = A_1 - T_1$$

T_1 étant le grand constante du temps et pour un dépassement maximal $e_{max} = 5\%$

On prendra $a_k = 1.9$ et $T_D = T_1$

Pour une fonction de transfert du type

$$G_s(p) = \frac{K_{Is} (1+ B_i p)}{p (1+ A_1 p + A_2 p^2)} \quad (\text{III-31})$$

On prendra un régulateur du type p

$$K_k = \frac{1}{K_{Is} a_k C_1} \tag{III-32}$$

Avec $C_1 = A_1 - B_1$ et $a_k = 1.9$

III. 5. 2/ Application de la méthode

III. 5.2.1/ Boucle de courant

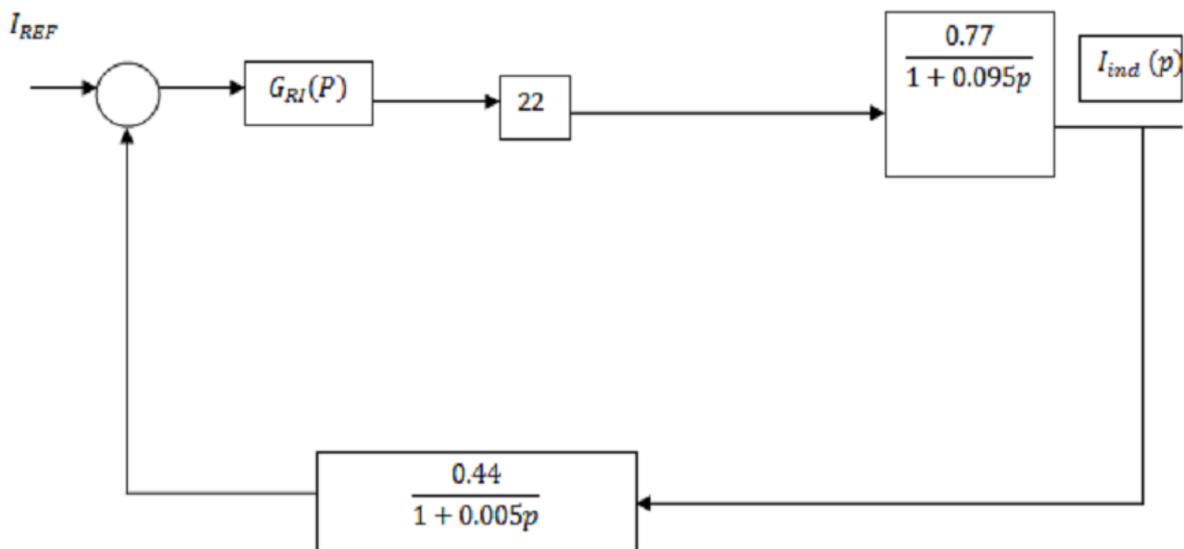


Figure (III-11) : Structure de boucle de courant.

La fonction de transfert de l'installation à réglée :

$$G_S(p) = 22 \cdot \frac{0.77}{1+0.095p} \cdot \frac{0.44}{1+0.005p} = \frac{7.453}{(1+0.095p)(1+0.005p)} \tag{III-33}$$

La grande constante du temps vaut $T1 = 0.095s$

Cette fonction sera mise sous la forme :

$$G_S(p) = \frac{7.453}{0.000475 p^2 + 0.1 p + 1} \tag{III-34}$$

$$A_1 = 0.1 \quad \text{et} \quad A_2 = 0.000475$$

D'après la méthode exposée au par amant on prendra, pour cette fonction de transfert un

Régulateur du type PI.

$$G_R(p) = \frac{K_R}{p} (1 + p T_D) \quad \text{(III-35)}$$

$$\text{Avec} \quad K_R = \frac{1}{K_S \cdot a_k \cdot C_1'} = \frac{1}{7,453 \cdot 1,9 \cdot 0,005} = \frac{1}{0,0708} = 14,124 \quad \text{(III-36)}$$

$$C_1' = A_1 - T_1 = 0,1 - 0,095 = 0,005$$

$$K_R = 14,124 \quad \text{Et} \quad T_D = T_1 = 0,095s$$

$$G_R(p) = \frac{14,124}{p} (1 + 0,095p) \quad \text{(III-37)}$$

Afin de vérifier le comportement de la boucle de courant, on se propose de calculer la réponse impulsionnelle de la boucle fermée. Elle représente la transformée inverse de la place de la fonction de transfert de la boucle fermée.

$$g_{fI}(t) = L^{-1}\{G_{fI}(p)\} \quad \text{(III-38)}$$

On commence donc par calculer la fonction de transfert de la boucle fermée de courant

$$G_{fI}(t) = \frac{G_{RI}(p) \cdot G_{Hach}(p) \cdot G_M(p)}{1 + G_{RI}(p) \cdot G_{Hach}(p) \cdot G_M(p) \cdot G_{CC}(p)} \quad \text{(III-39)}$$

$$G_{fI}(p) = \frac{\frac{14,12}{p} \cdot (1 + 0,095 p) \cdot 22 \cdot \frac{0,77}{(1 + 0,095 p)}}{1 + \frac{14,124}{p} (1 + 0,095 p) \cdot 22 \cdot \frac{0,77}{(1 + 0,095 p)} \cdot \frac{0,44}{(1 + 0,005 p)}} \quad \text{(III-40)}$$

Qui devient après simplification :

$$G_{fI}(p) = \frac{239,26+1,196p}{0,005 p^2 + p+105,27} \quad (\text{III-41})$$

$$G_{fI}(p) = L^{-1} \left\{ \frac{239,26+1,196 p}{0,005 p^2 + p+105,27} \right\} \quad (\text{III-42})$$

$$G_{fI}(p) = e^{-100t} [239 \cos(105,14t) + 218 \sin(105,14 t)] \quad (\text{III-43})$$

III. 5 .2.2/ Boucle de vitesse :

Une fois le calcul de la boucle de courant achevée, on passe à la boucle de vitesse :

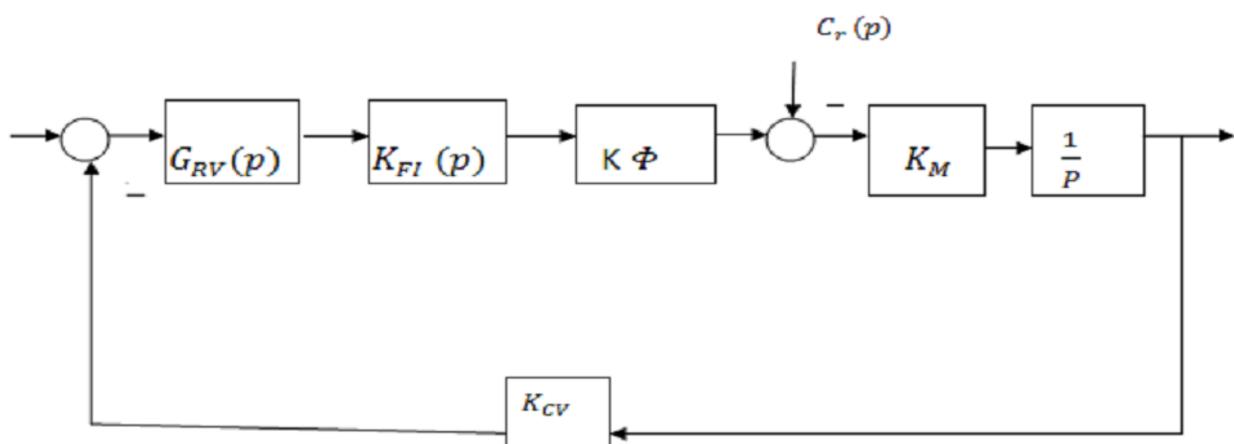


Figure (III-12) : structure de boucle de vitesse.

D'après la commande on calcul la fonction de transfert v de la boucle ouverte :

$$G_{ov}(p) = G_{fI}(p) \cdot k\phi \cdot k_M \cdot \frac{1}{p} \cdot k_{cv} \quad (\text{III-44})$$

$$G_{ov}(p) = \frac{(239,26+1,196 p)}{0,005 p^2 + p+105,27} \cdot 0,663 \cdot 22,25 \cdot \frac{1}{p} \cdot 0,016 \quad (\text{III-45})$$

$$G_{ov}(p) = \frac{0,236 \cdot (239,26+1,196 p)}{p(0,005 p^2 + p+105,27)} \quad (\text{III-46})$$

Qu'on mettra sous la forme :

$$G_S(p) = \frac{K_{Is} (1 + B_1 \cdot p)}{p (1 + A_1 p + A_2 p^2)} \quad (\text{III-47})$$

$$G_S(p) = \frac{0,536 (1 + 0,005 p)}{p (1 + 0,0094 p + 4,75 \cdot 10^{-5} p^2)} \quad (\text{III-48})$$

Dans ce cas, et d'après la méthode exposée auparavant, on prendra un régulateur du type p

$$K_R(p) = 22,316$$

Une fois tous les calculs achevés, nous procédons maintenant à la simulation du système régulé en courant et en vitesse. L'outil utilisé est le SIMULINK du matlab. On saisit le schéma bloc global dans une page SIMULINK, et on donne l'entrée une consigne de vitesse sous forme d'un échelon unité. On relève la réponse en courant et la réponse en vitesse, dans le cas où la charge est nul.

III.6/Schéma et résultat de simulation PSIM

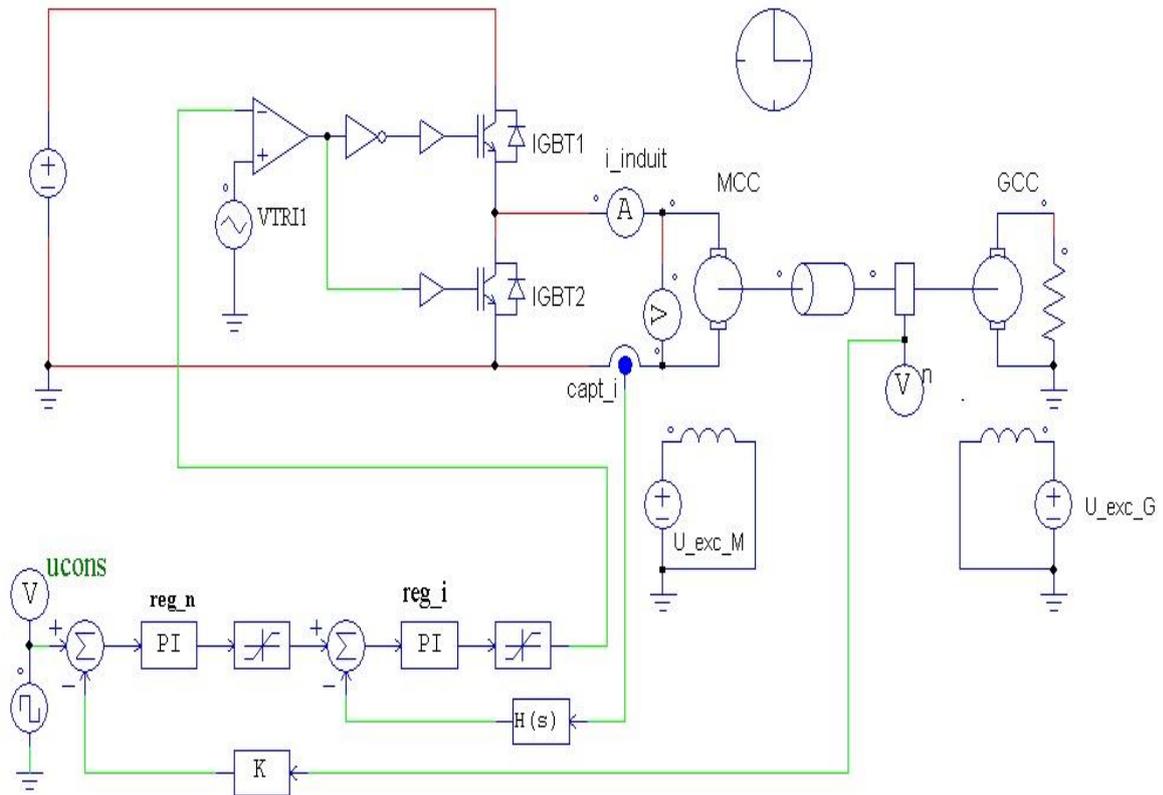


Figure (III-13) : Association hacheur-moteur.

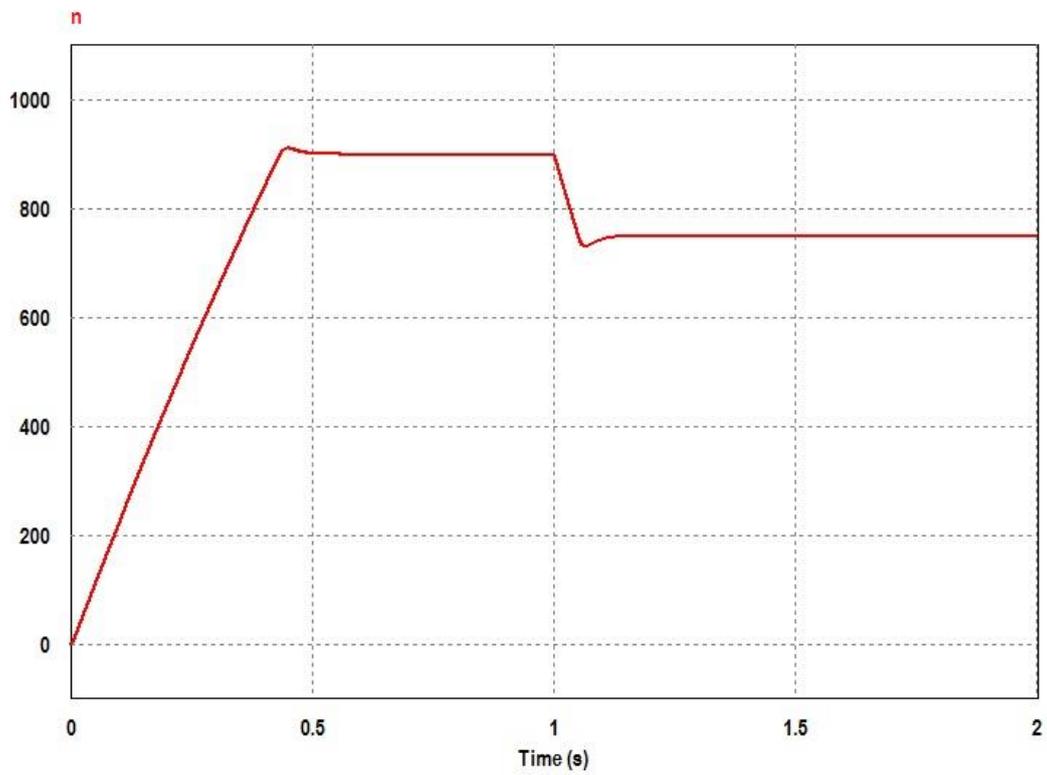


Figure (III-14) : Résultat de simulation hacheur-moteur de vitesse

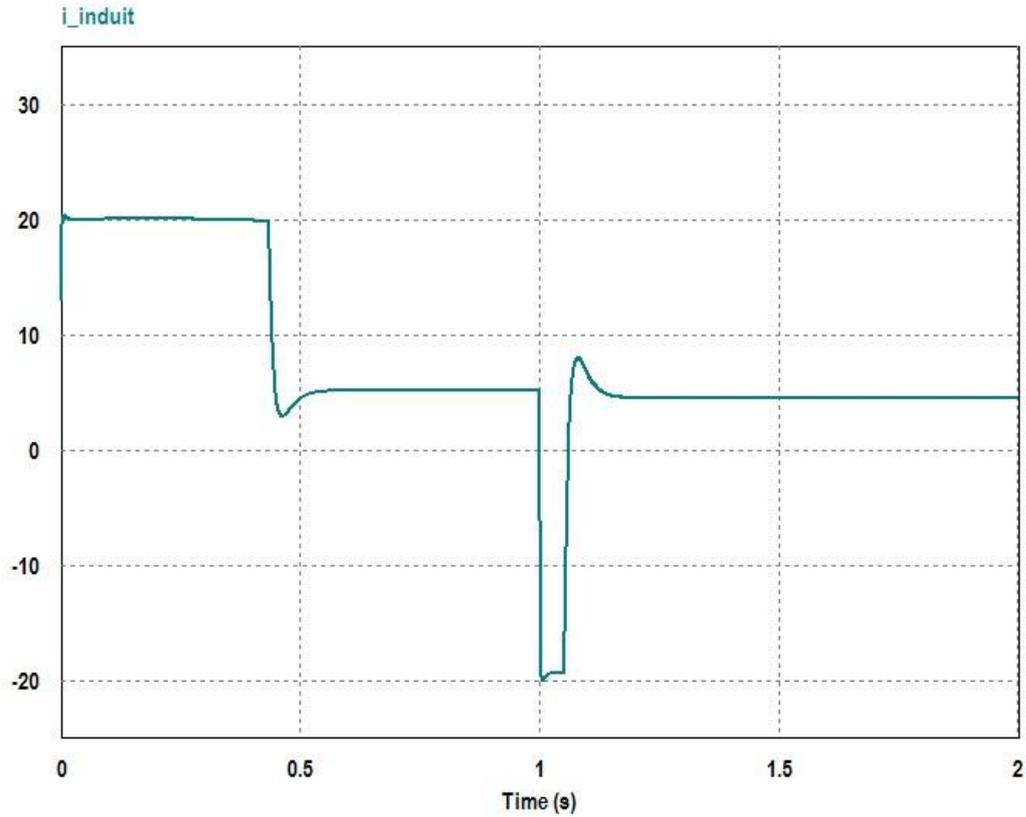


Figure (III-15) : Résultat de simulation hacheur-moteur de courant.

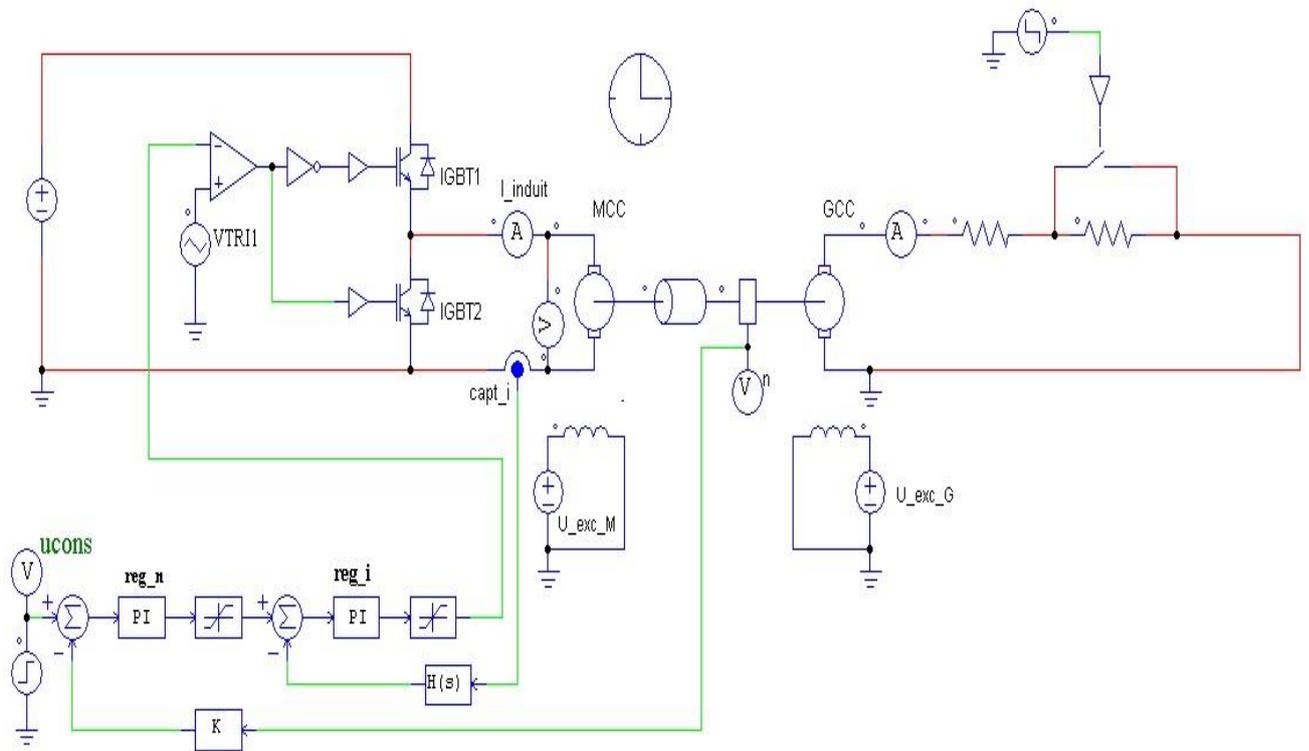


Figure (III-16) : Schéma de simulation de l'association Mcc- hacheur variation de la charge

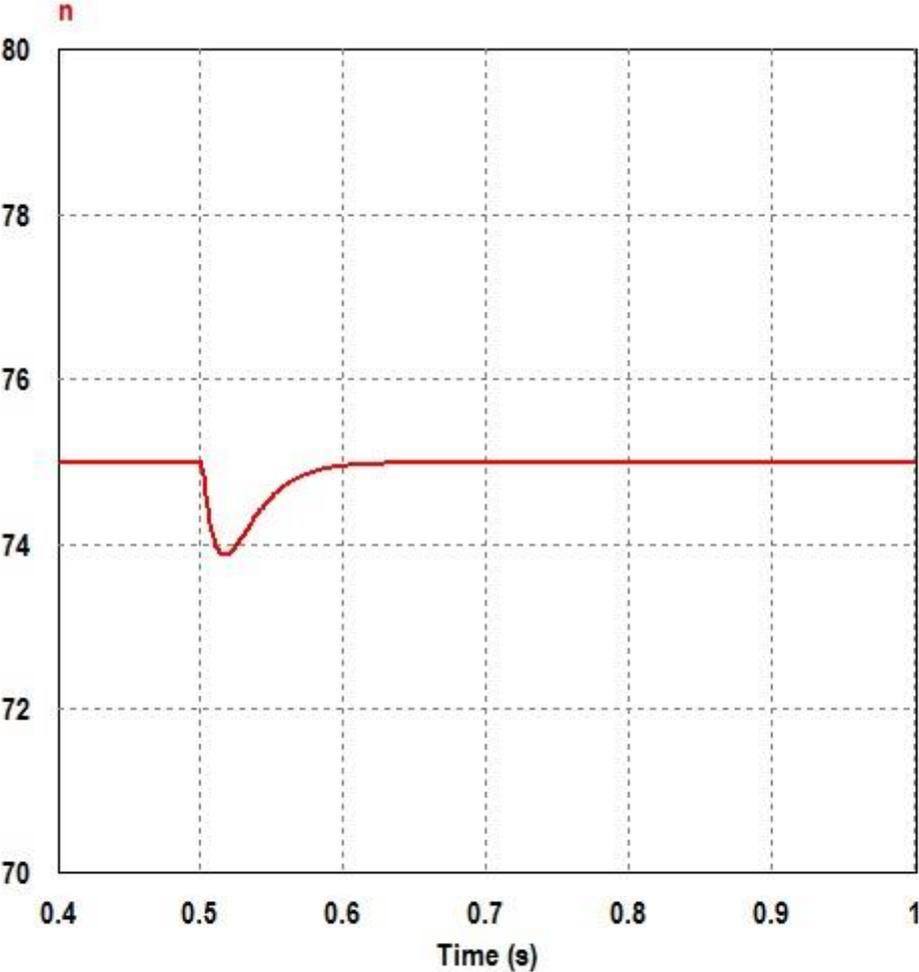


Figure (III-17) : Résultat de simulation de vitesse hacheur-moteur variation de la charge

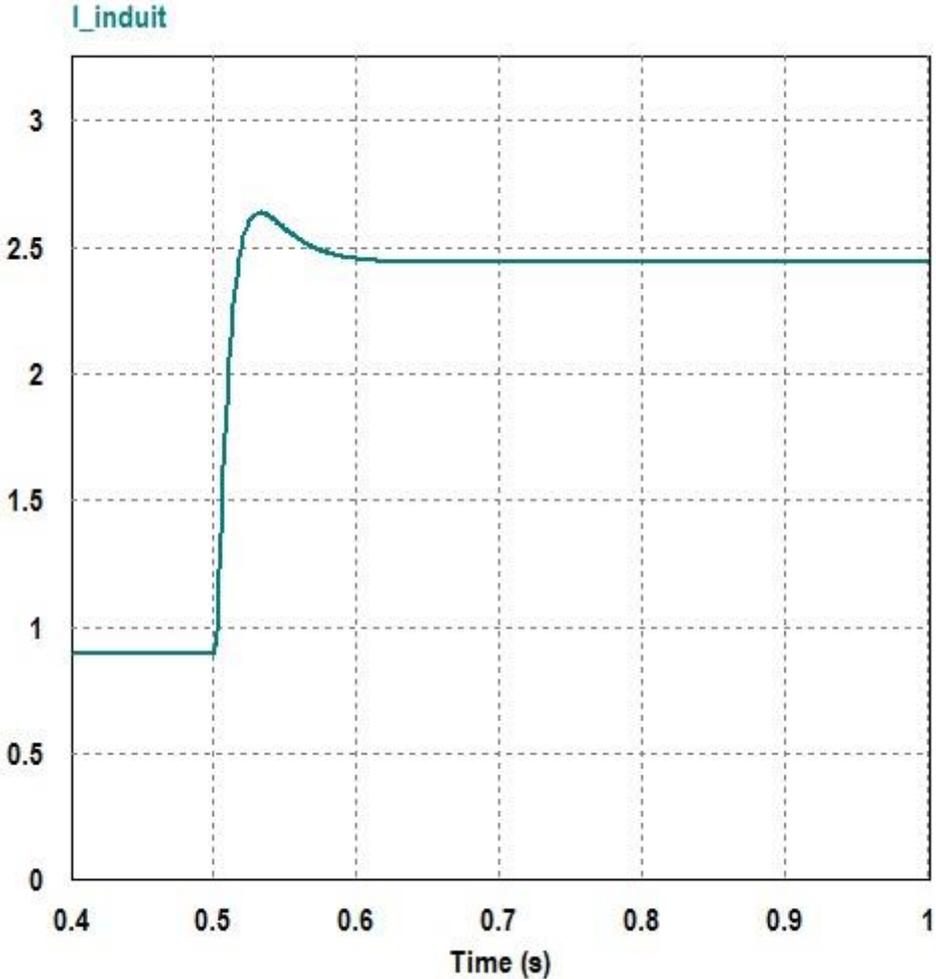


Figure (III-18) : Résultat de simulation de courant hacheur-moteur variation de la Charge

Conclusion générale

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 le moteur à courant continu à excitation indépendante et sa structure et son principe de fonctionnement ainsi que ses avantages et inconvénients et suivant ces caractéristiques, on a vu 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 vu 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 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 montrer les résultats de simulation avec le logiciel MATLAB et PSIM

Bibliographique

Références bibliographique

[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] Benzenati Siham, Rabiai Meriem, « Commande floue d'un moteur à courant continu à excitation séparée », Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira Bejaia, 2013.

[6] Youssef Agrebi Zorgani, Hicham Zayani, « Cours commande électrique des machines », Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Sfax, 2014

[7] www.elec.jbd.free.fr, « Machine électromagnétique », Chapitre 13.

[8] Fabrice DESCHAMP, « Cours BAC S SI – Convertir L'énergie – Machine à Courant Continu » Sciences de L'ingénieur, LYCEE JACQUES PREVERT.

[9] A.Rufer, P.barrade, « Cours d'électronique de puissance conversion DC/DC », Ecole polytechnique de France.

Bibliographique

[10] Zemouri Azzedine, « Etudes expérimentales d'un convertisseur DC/DC contrôlé par une commande robuste », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2014.

[11] <https://studylibfr.com/doc/1851203/les-transistors-les-differents-types-de-transistors>.

[12] Soyed Abdessami, « cours d'électronique de puissance chapitre (1) ».

[13] Alain Cunière, Gilles Feld, Michel Lavabre, « électronique de puissance », Chapitre 07, 2012.

[14] Amine AYAD, « Etude et réalisation d'une commande MLI pilotant un hacheur série » Mémoire de Master, Université Abou BekrBelkaid Tlemcen, 2014.

[15] Cours d'électronique de puissance conversion DC/DC Ecole polytechnique de France, professeur A.Rufer, P.barrade.