



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Electrotechnique  
Machine électrique

Réf. : .....

---

Présenté et soutenu par :  
Boudouh Tarek et Khelif Nader Ressel

Le : Septembre 2020

# Montages hacheurs et ses applications

---

Jury :

Mr. Benchouia Mohamed Toufik	Université de Biskra	Président
Mr. Golea Amar	Université de Biskra	Encadreur
Mr. Rabhi Boualaga	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2019 - 2020

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Électrotechnique  
Option : Machine Électrique

**Mémoire de Fin d'Etudes**  
**En vue de l'obtention du diplôme :**  
**MASTER**

**Thème**

**Montages hacheurs et ses  
applications**

**Présenté par :**

Boudouh Tarek  
Khelif Nader Ressel

**Avis favorable de l'encadreur :**

Mr. Golea Amar

**Avis favorable du Président du Jury**

Benchouia Mohamed Toufik

**Cachet et signature**

# Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

- ✓ Ma chère mère.
- ✓ Mon père, que Dieu ait pitié de lui.
- ✓ Chère petite sœur (Rayenne)
- ✓ Mon frère (Djallale) et sa petite fille (Mayar), Et ma chère sœur (Monia) et ses filles (Nourhan, Nada et Iline)
- ✓ Toute la famille BOUDOUH, parents et enfants.
- ✓ Toute la famille de mon partenaire.
- ✓ Tous ceux qui nous ont encouragés pour réaliser ce travail.
- ✓ Tous mes amis et mes collègues.

Boudouh  
Boudouh

# Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

- ✓ Ma chère mère.
- ✓ Mon cher père.
- ✓ Ma grand-mère.
- ✓ Mes frères (Yasser, Housseem et Wail) et Ma sœur Nada et mon neveu Elyane que j'aime beaucoup.
- ✓ Toute la famille Khelif parents et enfants.
- ✓ La mère de mon ami Amine Tourki que Dieu ait pitié d'elle.
- ✓ Le père de mon binôme que Dieu bénisse son âme.
- ✓ Tous ceux qui nous ont encouragés pour réaliser ce travail.
- ✓ Tous mes amis et mes collègues.

Khelif  
KHELIF

# Remerciements

Ce n'est pas facile d'arriver à accomplir notre travail sans aide ni conseils à cause des problèmes rencontrés tant pratiques que théoriques.

Pour cela nous tenons tout d'abord à remercier Allah tout puissant qui nous a donné la santé, le courage, la volonté et la patience pour terminer ce travail.

Nos remerciements à exprimer notre profonde reconnaissance et notre gratitude à notre encadreur M<sup>R</sup>. Golea Amar Pour l'honneur qu'elle nous a donné en acceptant de nous encadrer et pour son entière disponibilité tout au long de ce travail, et qui a contribué avec son aide précieuse et ses efforts ainsi que son soutien.

Nos remerciements vont aussi à l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail.

Par ailleurs, nous remercions beaucoup tous les enseignants du département de Génie Electrique de la faculté des sciences et de la technologie de l'université de Biskra.

Finalement, nous passons un grand merci à tous nos camarades, nos amis et tous ceux qui nous ont soutenu de prêt ou de loin à la réalisation de ce modeste mémoire.

# Liste des tableaux

## Liste des tableaux

---

### Liste des tableaux

Tableau (I-01) : Niveaux de puissance et fréquence de commutation des semi-conducteur..17

# Liste des figures



### Liste des figures

#### Chapitre I : introduction sur les composants de puissance

Figure (I-01) : Familles des convertisseurs statiques.....	3
Figure (I-02) : Interrupteur utilisé en électronique de puissance et ses caractéristiques statiques.....	5
Figure (I-03) :Symbole d'une diode .....	6
Figure (I-04) : Caractéristique statique de la diode. ....	6
Figure (I-05) : Commutation spontanée .....	7
Figure (I-06): Symbol d'un Thyristor SCR.....	8
Figure (I-07) : Caractéristique du Thyristor réel .....	8
Figure (I-08) : Caractéristique statique et dynamique d'un thyristor. ....	9
Figure (I-09) : Caractéristique statique et dynamique d'un transistor .....	10
Figure (I-10) : Symbole des Transistor bipolaire BJT de type NPN et PNP .....	11
Figure (I-11) : Symbole d'un Transistor MOSFET .....	12
Figure (I-12) : Symbole d'un Transistor bipolaire à grille isolée IGBT .....	13
Figure (I-13): Symbole d'un Thyristor SCR .....	13
Figure (I-14) : GTO symétrique et ses caractéristiques idéales statiques et dynamiques .....	14
Figure (I-15) : GTO asymétrique et ses caractéristiques idéales statiques et dynamiques .....	14

#### Chapitre II : les hacheurs non réversibles

Figure (II-01) :Convertisseur continu/continu (hacheur) .....	16
Figure (II-02) : Différents types de hacheurs .....	17
Figure (II-03) : Structure de convertisseur BUCK .....	18
Figure (II-04) : Eonctionnement de convertisseur BUCK .....	19
Figure (II-05) : Eorme d'onde de la tension $U_s$ (V) .....	19
Figure (II-06) : Structure de convertisseur BUCK à charge RL.....	20
Figure (II-07) : Les fromes d'ondes des grandeurs hacheur série (charge RL) .....	22
Figure (II-08) : Structure de convertisseur BUCK à charge RLE .....	23
Figure (II-09) : Les fromes d'ondes des principales grandeurs hacheur série (charge RLE) ... .....	24
Figure (II-10) : Montage hacheur série avec charge RL .....	25

## Liste des figures

---

Figure (II-11) : Formes d'ondes des tension ( $V_{ch}$ , $V(IGBT)$ , $V_D$ ) (V) .....	25
Figure (II-12) : Formes d'ondes des courants ( $i_{ch}$ , $i(IGBT)$ , $I_D$ ) (A) .....	26
Figure (II-13) : Forme d'onde du courant de sortie $i_{ch}$ (A) dans le régime transitoire et permanent.....	26
Figure (II-14) : Formes d'ondes des courants (A) et des tensions (V) dans le régime permanent .....	27
Figure (II-15) : Schéma d'un hacheur parallèle.....	29
Figure (II-16) : Interrupter K passant .....	29
Figure (II-17): Interrupter K ouverte .....	30
Figure (II-18) : Forme d'ondes des principales grandeurs d'un hacheur parallèle .....	31
Figure (II-19) : Montage hacheur parallèle avec charge RL .....	32
Figure (II-20) : Formes d'ondes du courant $I_L$ (A) et de la tension $V_{ch}$ (V) dans le régime transitoire et permanent.....	32
Figure (II-21) : Formes d'ondes des courants (A) et des tensions (V) dans le régime permanent .....	33
Figure (II-22) : Schéma de bas d'un hacheur à stockage inductive .....	34
Figure (II-23) : Circuit équivalent pour K fermé .....	35
Figure (II-24) : Circuit équivalent pour K ouvert .....	35
Figure (II-25) : Les formes d'ondes des principales grandeurs d'un hacheur à stockage inductif .....	36
Figure (II-26) : Montage hacheur à stockage inductif avec charge R.....	37
Figure (II-27) : Formes d'ondes du courant $I_L$ (A) et de tension $V_{ch}$ (V) dans le régime transitoire et permanent.....	38
Figure (II-28) : Formes d'ondes des tensions (V) dans le régime permanent .....	38
Figure (II-29) : Formes d'ondes des courant (A) dans le régime permanent .....	39
Figure (II-30) : Schéma de bas d'un hacheur à stockage capacitive .....	40
Figure (II-31) : Circuit équivalent pour K fermé .....	41
Figure (II-32) : Circuit équivalent pour K ouvert et D passant .....	42
Figure (II-33) : Formes d'ondes des courants (A) et des tensions .....	43
Figure (II-34) : Montage hacheur à stockage capacitif avec charge R .....	44
Figure (II-35) : Formes d'ondes des courants ( $I_{L1}$ et $I_{L2}$ ) (A) et de la tension $V_{ch}$ (V) dans le régime transitoire et permanent .....	45
Figure (II-36) : Formes d'ondes des tensions (V) dans le régime permanent .....	45
Figure (II-37) : Formes d'ondes des courants (A) dans le régime permanent.....	46

### Chapitre III : les hacheurs réversibles

Figure (III-01) : Synoptique d'un convertisseur DC-DC réversible .....	48
Figure (III-02) : Schéma de base d'un hacheur réversible en courant .....	48
Figure (III-03) : Quadrants de fonctionnement .....	51
Figure (III-04) : Formes d'ondes des courants (A) et des tensions .....	51
Figure (III-05) : Montage hacheur réversible en courant .....	52
Figure (III-06) : Formes d'ondes du courant $i_{ch}$ (A) et de la tension $V_{ch}$ (V) dans le régime transitoire et permanent.....	53
Figure (III-07) : Formes d'ondes du courant $i_{ch}$ (A) et de la tension $V_{ch}$ dans le régime permanent .....	54
Figure (III-08) : Formes d'ondes du courant $i_{ch}$ (A) et de la tension $V_{ch}$ (V) dans le régime permanent .....	54
Figure (III-09) : Structure du hacheur réversible en tension .....	56
Figure (III-10) : Formes d'ondes des courants (A) et des tensions (V) : Commande symétrique .....	57
Figure (III-11) : Quadrants de fonctionnement .....	58
Figure (III-12) : Montage hacheur réversible en tension .....	59
Figure (III-13) : Formes d'ondes du courant $i_{ch}$ (A) et de la tension $V_{ch}$ (V) dans le régime transitoire et permanent.....	60
Figure (III-14) : Formes d'ondes du courant $i_{ch}$ (A) et de la tension $V_{ch}$ (V) dans le régime permanent .....	60
Figure (III-15) : Formes d'ondes du courant $i_{ch}$ (A) et de la tension $V_{ch}$ (V) dans le régime permanent .....	61
Figure (III-16) : Structure du hacheur 4 quadrants .....	62
Figure (III-17) : Les 4 Quadrants .....	62
Figure (III-18) : Formes d'ondes des tensions et des courants (A) .....	64
Figure (III-19) : Formes d'ondes des tensions et des courants (A) .....	65
Figure (III-20) : Montage hacheur quatre quadrants réversible en tension et en courant .....	65
Figure (III-21) : Formes d'ondes du courant $i_{ch}$ (A) et de la tension $V_{ch}$ (V) dans le régime transitoire et permanent.....	66
Figure (III-22) : Formes d'ondes du courant $i_{ch}$ (A) et de la tension $V_{ch}$ (V) dans le régime permanent .....	66
Figure (III-23) : Formes d'ondes du courant $i_{ch}$ (A) et de la tension $V_{ch}$ (V) dans le régime permanent .....	67
Figure (III-24) : Formes d'ondes du courant $i_{ch}$ (A) et de la tension $V_{ch}$ (V) dans le régime permanent .....	68

## Liste des figures

---

Figure (III-25) : Formes d'ondes du courant  $i_{ch}$  (A) et de la tension  $V_{ch}$  (V) dans le régime permanent ..... 68

### Chapitre IV : Réglage de vitesse de la MCC

Figure (IV-01) : Schéma de principe d'une chaîne de régulation .....	71
Figure (IV-02) : Système de commande .....	71
Figure (IV-03) : Performances d'un système de commande .....	72
Figure (IV-04) : Schéma bloc d'un système en boucle fermée .....	72
Figure (IV-05) : Principe de commande par Hystérésis .....	73
Figure (IV-06) : Modulation hystérésis .....	73
Figure (IV-07) : Schéma électrique du MCC à excitation séparée .....	75
Figure (IV-08) : Schéma bloc simplifié du système de contrôle .....	78
Figure (IV-09) : Schéma de régulation associée hacheur-moteur .....	79
Figure (IV-10) : Formes d'ondes de la vitesse $\omega$ (tr/min) avec sa référence $\omega_{ref}$ (tr/min) .....	80
Figure (IV-11) : Formes d'ondes du couple $C_{em}$ (N.m) avec sa référence .....	80
Figure (IV-12) : Formes d'ondes du courant d'induit $i_a$ (A) avec sa référence $i_{a,ref}$ (A) ..	81
Figure (IV-13) : Forme d'onde de la tension de sortie $V_{ch}$ (V) .....	81
Figure (IV-14) : Formes d'ondes du Modulation hystérésis .....	82
Figure (IV-15) : Formes d'ondes du courant d'induit $i_a$ (A) et de la tension de sortie $V_{ch}$ (V) en régime permanent .....	82
Figure (IV-16) : Schéma de régulation associée hacheur-moteur .....	84
Figure (IV-17) : Formes d'ondes de la tension de sortie $V_{ch}$ (V) et du courant d'induit $i_a$ (A) .....	85
Figure (IV-18) : Formes d'ondes du couple $C_{em}$ (N.m) et de la vitesse de rotation $\omega$ (tr/min) .....	85

# Liste des symboles

## Liste des symboles :

---

### Liste des symboles :

IK(VK) : Courant de l'interrupteur semi-conducteur en fonction de sa tension

(A) : Anode

(K) : Cathode

(G) : Gâchette dans le thyristor

IAK: Courant anode-cathode

VAK : Tension anode-cathode

Vseuil : Tension de seuil

ID : Courant dans la diode

I<sub>gk</sub> : Courant gâchette-cathode

V<sub>gk</sub> : Tension gâchette-cathode

i<sub>B</sub> : Courant de base (courant de commande)

i<sub>C</sub> : Courant de collecteur

i<sub>E</sub> : Courant de l'émetteur

i<sub>csat</sub> : Courant de collecteur dans le cas de saturation

V<sub>CE</sub> : La tension entre les électrodes du collecteur et l'émetteur

V<sub>DS</sub> : La tension entre les électrodes de Drain et Source

V<sub>GS</sub> : La tension entre les électrodes de Grille et Source

G : Grille dans la MOSFET et L'IGBT

$\alpha$  : Le rapport cyclique

U<sub>smoy</sub>: La valeur moyenne de tension

W : Energie électromagnétique

(DRL) : Diode de roue libre

T: La période de hachage

T1, T2, T3, T4, Q : L'interrupteur de semi-conducteur

$\tau$  : Constant de temps électrique

U<sub>smoy</sub> : La tension moyenne de sortie

E, U<sub>e</sub>, V<sub>e</sub> : La tension d'entre

## Liste des symboles :

---

$U, U_s, V_s$  : La tension de sortie

$i_s$  : Courant de sortie

$i_e$  : Courant d'entrée

$\Delta i_s, \Delta i_1, \Delta i_2$  : Ondulation de courant

$\Delta i_{smax}$  : Ondulation de courant maximal

$V_Q, U_Q$  : La tension aux bornes de l'interrupteur Q

$i_Q$  : Courant de l'interrupteur Q

$U_{DR}$  : La tension aux bornes de la diode de roue libre

$V_D$  : La tension aux bornes de la diode

$U_{L1}, U_{L2}, V_L$  : La tension aux bornes de l'inductance

$i_{DR}$  : Courant de diode de roue libre

$I_C$  : Courant de condensateur

$U_C$  : Tension de condensateur

$\varepsilon(p)$  : L'erreur

MCC : Moteur a courant contenue

$R_{ind}$  : La résistance de l'induit

$U$  : La tension d'alimentation de circuit de l'induit.

$I_{ind}$  : Courants dans le circuit de l'induit

$K$  : La constante du moteur

$\Phi$  : Flux magnétique

$\omega$  : Vitesse de rotation.

$r_{ex}$  : La résistance de l'inducteur

$U_{ex}$  : La tension d'alimentation de circuit de l'inducteur

$I_{ex}$  : Courants dans le circuit de l'inducteur

$C_{em}$  : Couple électromagnétique

$C_r$  : Couple résistant

$f$  : Coefficient de frottement du moteur

$J$  : Le moment d'inertie de l'ensemble moteur charge.

$\xi$  : Coefficient d'amortissement

$\omega_0^2$  : Fréquence propre d'oscillation.

## Liste des symboles :

---

PI : Correcteur Proportionnel Intégral

$\tau_1$  : Constante de temps associée au régulateur PI et qui définit la bande passante.

$k_{i1}$ ,  $k_{p1}$  : Les paramétré de calculateur PI



### Résumé (français et arabe)

L'étude présentée dans ce mémoire est consacrée à l'étude des différents montages hacheurs et leurs applications. Les différentes configurations sont analysées théoriquement puis simulées en utilisant le logiciel PSIM.

La deuxième partie de ce travail a été consacrée à l'application d'un hacheur quatre quadrants pour contrôler un moteur à courant continu, en utilisant un régulateur PI pour la vitesse et un réguler d'hystérésis pour le courant.

#### ملخص

الدراسة المقدمة في هذه المذكرة كرسيت في الجزء الاول منها للدراسة النظرية لمفاتيح أشباه الموصلات التي تعتبر العناصر الأساسية المكونة للمطبرات، و في الجزء الثاني لدراسة المطبرات نظريا ثم باستخدام المحاكاة. اما الجزء الثاني من هذا العمل فقد خصص للتحكم في محرك تيار مستمر باستخدام مطبر عكوس في التيار و الجهد.

# Sommaire

### Sommaire

I/ Introduction Général : .....	1
---------------------------------	---

### Chapitre I : Introduction sur les composants de puissance

I.1/ Introduction :.....	2
I.2/ Les convertisseurs statiques :.....	2
I.2.1/ Les différents types de convertisseurs statiques : .....	2
I.3/ Les différents types de source et de charge : .....	3
I.3.1/ Les sources :.....	3
I.3.2/ Les charges : .....	4
I.4/ Interrupteurs à semi-conducteur : .....	4
I.4.1/ Classification des interrupteurs à semi-conducteur :.....	4
I.4.2/ Caractéristiques des interrupteurs à semi-conducteur :.....	4
I.4.2.1/ Caractéristiques statiques :.....	4
I.4.2.2/ Caractéristiques dynamiques :.....	5
I.4.2.3/ Mode de commutation : .....	5
I.4.2.4/ L'interrupteur parfait : .....	5
I.4.3/ Les interrupteurs non commandable (La diode) :.....	6
I.4.3.1/ Les caractéristiques statiques : .....	6
I.4.3.2/ Fonctionnement théorique :.....	7
I.4.3.3/ Caractéristiques dynamiques :.....	7
I.4.3.4/ Les types de diodes et leurs utilisations :.....	7
I.4.4/ Le thyristor :.....	8
I.4.4.1/ Caractéristiques statiques :.....	8
I.4.4.2/ Fonctionnement : .....	9
I.4.4.3/ Caractéristique dynamique :.....	9
I.4.4.4/ Application des thyristors :.....	9
I.4.4.5/ Les types de thyristors :.....	9
I.4.5/ Les interrupteurs entièrement commandés : .....	10
I.4.5.1/ Le transistor :.....	10
I.4.5.2/ Le GTO : .....	13

## Sommaire

---

I.5/ Comparaison entre les différents interrupteurs entièrement commandables : .....	15
I.6/ Conclusion : .....	15

### Chapitre II : Les hacheurs non réversibles

II.1/ Introduction : .....	16
II.2/ Généralité sur les hacheurs : .....	16
II.3/ Domaine d'utilisation des hacheurs : .....	16
II.4/ Différents types des hacheurs : .....	17
II.4.1/ Hacheurs réversibles : .....	17
II.4.2/ Hacheurs non réversibles : .....	17
II.5/ Mode de fonctionnement : .....	18
II.6/ Les hacheurs à liaison directe : .....	18
II.6.1/ Hacheur série (Buck) : .....	18
II.6.1.1/ Principe de Fonctionnement : .....	19
II.6.1.2/ Analyse de fonctionnement : .....	20
II.6.1.3/ Simulation : .....	25
II.6.2/ Hacheur parallèle (BOOST) : .....	29
II.6.2.1/ Principe de fonctionnement : .....	29
II.6.2.2/ Analyse du fonctionnement : .....	30
II.6.2.3/ Simulation : .....	33
II.7/ Les hacheurs à liaison indirecte ou à accumulation : .....	34
II.7.1/ Hacheur à stockage inductif ou parallèle-série (Buck-Boost) : .....	34
II.7.1.1/ Principe de fonctionnement : .....	35
II.7.1.2/ Analyse de fonctionnement : .....	35
II.7.1.3/ Simulation : .....	37
II.7.2/ Hacheur à stockage capacitif : .....	40
II.7.2.1/ Principe et analyse du fonctionnement : .....	40
II.7.2.2/ Ondulations des courants et de tensions : .....	44
II.8/ Conclusion : .....	47

### Chapitre III : Les hacheurs réversibles

III.1/ Introduction : .....	48
III.2/ Montages réversibles : .....	48
III.2.1/ Hacheur deux quadrants réversible en courant : .....	48
III.2.1.1/ Fonctionnement du hacheur réversible en courant : .....	49
III.2.1.2/ Simulation : .....	52
III.2.2/ Hacheur deux quadrants réversible en tension : .....	56
III.2.2.1/ Fonctionnement du hacheur réversible en tension : .....	56
III.2.2.2/ Simulation : .....	59
III.2.3/ Hacheur quatre quadrants (réversible en tension et en courant).....	62
III.2.3.1/ Fonctionnement en modulation +Ue/-Ue (commande symétrique) :.....	62
III.2.3.2/ Fonctionnement en modulation +Ue/0/-Ue (commande alternée):.....	64
III.2.3.3/ Simulation : .....	65
III.3/ Conclusion : .....	69

### Chapitre IV : Réglage de vitesse de la MCC

IV.1/ Introduction : .....	70
IV.2/ Généralité sur la régulation : .....	70
IV.2.1/ Conception d'un système de commande : .....	71
IV.2.2/ Performances des systèmes réglés :.....	71
IV.2.3/ Système en boucle fermée : .....	72
IV.3/ Modulation par Hystérésis :.....	73
IV.3.1/ Comparaison entre modulation par hystérisés et MLI :.....	74
IV.3.2/ Les avantages et les inconvénients de la commande par hystérésis : .....	74
IV.4/ Moteur à courant continu :.....	74
IV.4.1/ Types de moteur à courant continu .....	74
IV.4.1.1/ Moteur à Excitation séparée : .....	75
IV.4.2/ Modélisation du moteur :.....	76
IV.4.3/ Simulation du MCC à excitation séparée : .....	76
IV.5/ Le correcteur : .....	77
IV.5.1/ Le correcteur proportionnel intégral (PI) :.....	77

## Sommaire

---

IV.5.1.1/ Calcul les paramètres $k_{p1}$ et $k_{i1}$ du régulateur PI : .....	78
IV.6/ Simulation : .....	79
Conclusion Général : .....	87
Bibliographie	

# **Introduction Général**

### Introduction Général

L'électronique de puissance étudie les dispositifs réalisant la conversion et le contrôle de l'énergie. Ces dispositifs, appelés convertisseurs statiques, permettent le transfert de l'énergie électrique entre un générateur et un récepteur souvent de nature différente. Leur rôle consiste à adapter la source d'énergie aux exigences de la charge. Pour cela, ils sont amenés à modifier les caractéristiques des grandeurs transmises (tension, fréquence...) voire même à changer la forme de l'énergie (continu, alternatif...) [4].

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu, permettant de générer une source de tension continue variable à partir d'une source de tension continue fixe. Ils se composent de condensateurs, d'inductance et d'interrupteurs statiques. Ils consomment moins de puissance. C'est pour cette raison que les hacheurs ont de très bons rendements [33]. Ils sont largement utilisés dans les équipements pour munir en puissance plusieurs instruments électroniques comme les PC, et aussi en applications spécialisés de la haute puissance telle que le chargement des batteries, la gravure, la soudure, ...etc. En plus du contrôle et la transformation abaisseuse et ou élévatrice de la tension continue, les circuits convertisseurs DC-DC peuvent aussi engendrer une isolation de tension à travers un petit transformateur à haute fréquence [14].

Selon le sens de parcours de l'énergie électrique entre la source et la charge, on distingue deux familles de hacheurs : réversibles et non réversibles. Pour ces derniers, l'énergie électrique ne peut donc aller que de la source vers la charge. Mais concernant les hacheurs réversibles, il est possible d'inverser le sens de parcours de l'énergie en assurant une réversibilité en courant et/ou en tension [10].

L'objectif de notre travail est l'étude des hacheurs réversibles et non réversibles en détails et l'analyse par simulation du fonctionnement de chaque type pour valider cette étude théorique et ainsi réaliser une application association hacheur-moteur.

Cette étude est organisée en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons les interrupteurs à semi-conducteur tout en indiquant leur principe, caractéristiques statique et dynamique, types, ainsi que leurs applications.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude théorique des hacheurs non réversibles avec l'analyse par simulation de leur fonctionnement.

Le troisième chapitre sera consacré à l'étude théorique des hacheurs réversibles avec l'analyse par simulation de leur fonctionnement.

Le quatrième chapitre est réservé à une application d'un hacheur quatre quadrants associé au moteur à courant continu. La régulation de la vitesse est assurée par un régulateur classique du type PI. La régulation du courant est assurée par un régulateur à hystérésis. Les résultats de simulation seront effectués par le logiciel PSIM.



# Chapitre I

Introduction sur les composants de  
puissance

**I.1/ Introduction :**

L'Electronique de Puissance a pour vocation de maîtriser le transfert d'énergie entre une source et une charge, en assurant une conversion à haut rendement. Pour cela, des semi-conducteurs sont utilisés en interrupteurs, et associés à des composants passifs [1].

L'élément clé de la conversion est l'interrupteur statique qui va permettre, en interrompant ou non le transfert d'énergie entre les divers éléments du circuit, de gérer les valeurs moyennes des courants et des tensions [2].

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 et inverses à l'état passant [3].

**I.2/ 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 [3].

En définitif les convertisseurs statiques ne sont que des composants électriques à base de semi – conducteurs capables de notifier la tension ou la fréquence de l'onde électrique comme ou l'habitude de distinguer deux sortes de tension [3] :

- Source de la tension continue.
- Source de la tension alternative.

**I.2.1/ 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 [3].

**Redresseurs :**

Destiné à alimenter une charge de type continu, qu'elle soit inductive ou capacitive à partir d'une source alternative. La source est la plupart du temps, du type tension. Il est utilisé par exemple pour : L'alimentation de moteur à courant continu [3].

**Onduleurs :**

Permet de délivrer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique continue. C'est la fonction inverse d'un redresseur [3].

**Gradateur :**

Destiné à modifier un signal électrique dans le but de faire varier sa tension efficace de sortie et de modifier ainsi la puissance dans la charge [3].

**Hacheur :**

Permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue avec un rendement élevé. Les hacheurs de puissance sont utilisés pour la variation de vitesse du moteur à courant continu. En plus faible puissance, ils sont un élément essentiel des alimentations à découpage [3].

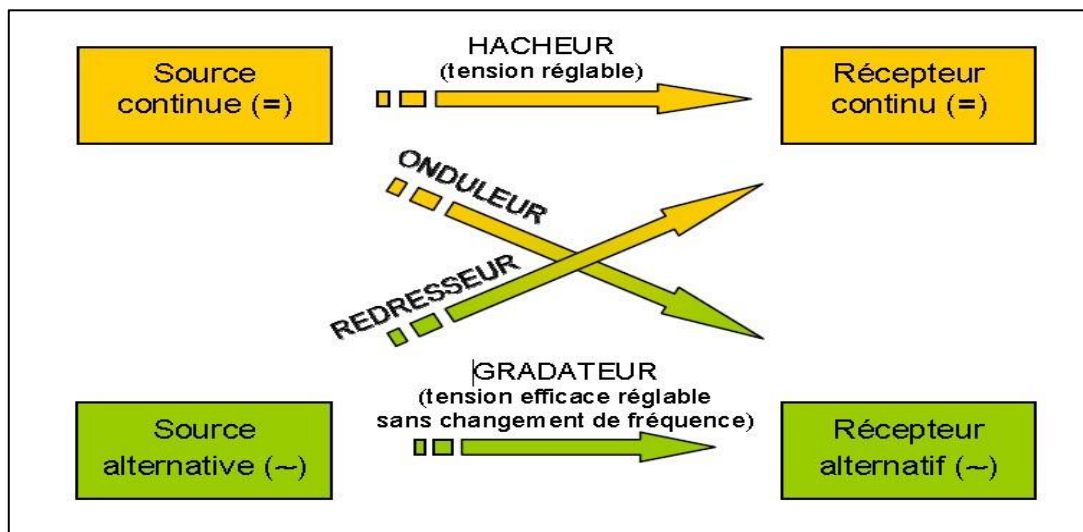


Figure (I-01) : familles des convertisseurs statiques [6]

**I.3/ Les différents types de source et de charge :**

La source est le dispositif qui va apporter l'énergie électrique. La charge est le dispositif qui va utiliser cette énergie (la consommer ou éventuellement la transformer) [3].

**I.3.1/ Les sources :**

Les principales sources alternatives sont :

Le réseau électrique triphasé (1 ou plusieurs phases), les alternateurs (machine électrique Convertissant l'énergie mécanique en énergie électrique dans les centrales notamment), les Onduleurs (indispensables pour obtenir de la fréquence variable comme dans les TGV) [3].

Les principales sources continues.

Les dispositifs électrochimiques (piles, batteries).

Les génératrices à courant continu, les sorties des redresseurs et des hacheurs (ou des alimentations à découpage) [3] ....

### I.3.2/ Les charges :

Il S'agira de moteurs électriques (alternatifs ou continus) et de divers appareils électriques (dont l'entrée comporte souvent un ou plusieurs convertisseurs) .... [3].

### I.4/ Interrupteurs à semi-conducteur :

Un interrupteur à semi-conducteur est formé par un ou plusieurs composants semi-conducteurs. Sa résistance peut varier entre une valeur très élevée ou une valeur très faible, Dans tous les cas, tout interrupteur peut présenter deux états stables en régime statique [4] :

1. A l'état passant (ON) : l'interrupteur est dit conducteur, fermé ou amorcé.
2. A l'état bloqué (OFF) : l'interrupteur est dit non-conducteur, ouvert ou bloqué.

#### I.4.1/ Classification des interrupteurs à semi-conducteur :

Ils peuvent être classés en trois groupes :

- **Les diodes** : composants non commandables, où les états ON et OFF dépendent des grandeurs électriques du circuit [5].
- **Les thyristors** : composants commandables à l'amorçage par un courant à la gâchette [5], et au blocage par un circuit extérieur [30].
- **Les interrupteurs entièrement commandables** : À l'opposé de la diode, dont toutes les commutations sont spontanées (commandable à l'amorçage ainsi qu'au blocage) comme : IGBT, TRANSISTOR, MOSFET [5] ...

#### I.4.2/ Caractéristiques des interrupteurs à semi-conducteur :

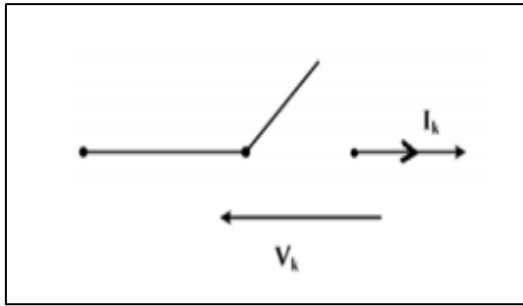
Pour caractériser complètement un interrupteur, il faut donc connaître d'une part sa caractéristique statique et d'autre part ses caractéristiques dynamiques :

##### I.4.2.1/ Caractéristiques statiques :

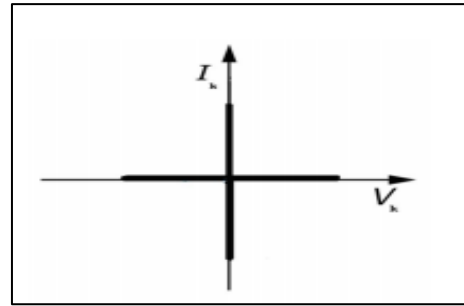
La caractéristique statique  $IK(VK)$ , qui représente l'ensemble des points de fonctionnement de l'interrupteur, comporte deux branches situées dans les deux quadrants tels que :  $VK. IK > 0$  [4].

Dans le cas des interrupteurs à semi-conducteurs, la caractéristique statique peut se réduire à un certain nombre de segments du plan  $IK(VK)$ , cette caractéristique a au moins deux demi-axes (ou deux segments) [4].

Suivant le nombre de segments, les interrupteurs peuvent être à deux, trois ou quatre segments [4].



a) : interrupteur en convention récepteur



b) : caractéristique statique idéalisée d'un interrupteur.

**Figure (I-02) :** Interrupteur utilisé en électronique de puissance et ses caractéristiques statiques [4].

#### I.4.2.2/ Caractéristiques dynamiques :

Ce régime est défini par le passage de l'état passant à l'état bloqué, ou inversement, ce qui correspond, dans le plan  $IK(VK)$ , au passage du point de fonctionnement d'un demi-axe à un demi-axe perpendiculaire [4].

La trajectoire suivie par le point de fonctionnement constitue la caractéristique dynamique de commutation de l'interrupteur [4].

#### I.4.2.3/ Mode de commutation :

Aussi bien pour l'amorçage que pour le blocage, deux modes de changement d'état sont à distinguer :

1. La commutation commandée.
2. La commutation spontanée [4].

#### I.4.2.4/ L'interrupteur parfait :

Un interrupteur est considéré comme parfait :

- S'il est possible de commander ou de contrôler son ouverture et sa fermeture.
- Si la durée de la commutation est très courte devant la période de fonctionnement du convertisseur.
- S'il ne provoque pas de perturbation dans un montage, à cause de ses caractéristiques propres.
- S'il ne consomme aucune puissance [6].

Dans les paragraphes suivants, nous présentons quelques composants de puissance :

**I.4.3/ Les interrupteurs non commandable (La diode) :**

La diode de puissance est un composant non commandable. Elle n'est pas réversible en tension et ne supporte qu'une tension anode-cathode négative ( $V_{AK} < 0$ ) à l'état bloqué. Elle n'est pas réversible en courant et ne supporte qu'un courant dans le sens anode cathode positif à l'état passant ( $I_{AK} > 0$ ) [3].

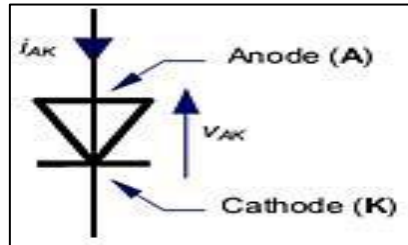
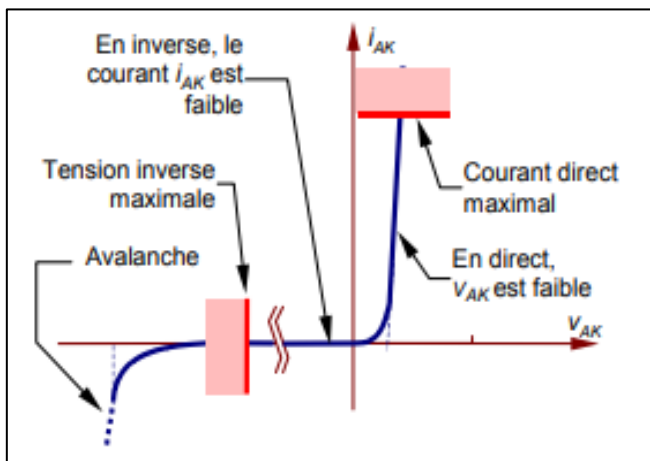
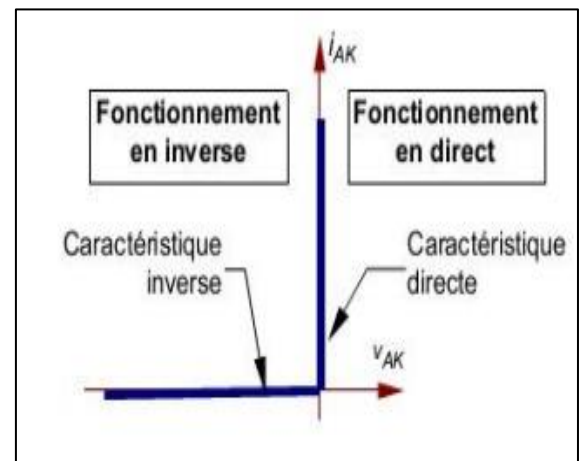


Figure (I-03) Symbole d'une diode [3].

**I.4.3.1/ Les caractéristiques statiques :**



a) caractéristique de la diode réelle



b) caractéristique de la diode parfaite

Figure (I-04) : caractéristique statique de la diode. [3]

Dans le cas parfait :

Sa caractéristique idéalisée  $i_{ak}=f(v_{ak})$  est identique à celle d'une résistance nulle pour les courants positifs (circuit fermé) et celle d'une résistance infinie pour les tensions négatives (circuit ouvert) [7].

On dit aussi que la diode a une caractéristique à deux segments.

Dans le cas réel :

La caractéristique réelle présente en fait une faible tension de seuil dans le sens passant (0,6 V pour une diode de signal classique) et un très faible courant de fuite dans le sens bloqué (quelques nA) [7].

### I.4.3.2/ Fonctionnement théorique :

La diode est un dipôle à semi-conducteur (jonction P-N), qui possède deux régimes de fonctionnement : bloqué et passant.

Diode bloquée : état de la diode quand  $V_{AK} < V_{seuil}$ , ce qui empêche le passage du courant dans la diode ;  $I_D = 0$ .

Diode passante : état de la diode quand  $V_{AK} \geq V_{seuil}$ , ce qui entraîne  $I_D \neq 0$  [21].

#### ❖ Tension de seuil :

Correspond à la tension à partir de laquelle la diode commence à conduire quand elle est polarisée dans le sens passant. Dit autrement et de manière sans doute plus juste : une diode ne conduit que lorsque son anode est portée à un potentiel plus positif que sa cathode, et que la différence de potentiel entre anode et cathode atteint la tension de seuil [22].

### I.4.3.3/ Caractéristiques dynamiques :

La diode n'est pas commandable à fermeture et à l'ouverture (commutation spontanée) [4].

La commutation spontanée ne dépend que du circuit extérieur ; l'interrupteur commute naturellement car le point de fonctionnement se déplaçant sur la caractéristique statique passe par zéro [4].

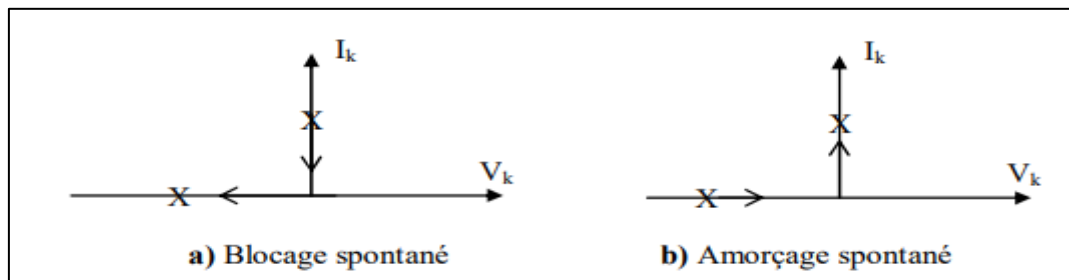


Figure (I-05) : Commutation spontanée [4]

### I.4.3.4/ Les types de diodes et leurs utilisations :

La construction d'une diode exige un certain nombre de compromis, entre rapidité de commutation et pouvoir de coupure. On peut classer les diodes suivant leur utilisation en trois grandes catégories :

**Diodes de signal** : Ce sont des diodes rapides, destinées aux applications faibles puissances.

**Diodes de redressement (lentes)** : Ce sont des diodes lentes à pouvoir de coupure important, destinées au redressement des tensions et courants de la fréquence du réseau EDF (50 Hz). C'est ce type de diodes que l'on trouve dans les ponts de Graëtz sous forme intégrée.

**Diodes rapides de puissance** : Rapidité et pouvoir de coupure sont ici optimisés, au détriment du prix, ces diodes sont destinées au redressement dans les alimentations à découpages où on

travaille à des fréquences allant de 20 kHz à 1 MHz ou plus et aussi ils sont utilisés pour les onduleurs et les hacheurs [7].

#### I.4.4/ Le thyristor :

C'est un interrupteur à trois bornes qui possède en plus de l'anode (A) et de la cathode (K), une gâchette (G)

- L'anode et la cathode constituent l'accès de puissance
- La gâchette et la cathode, l'accès de commande [4].

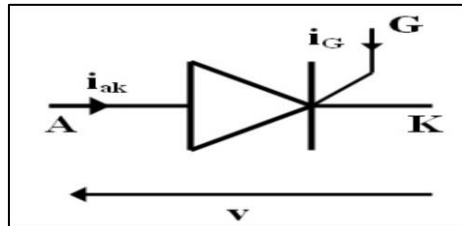


Figure (I-06): Symbol d'un Thyristor SCR

##### I.4.4.1/ Caractéristiques statiques :

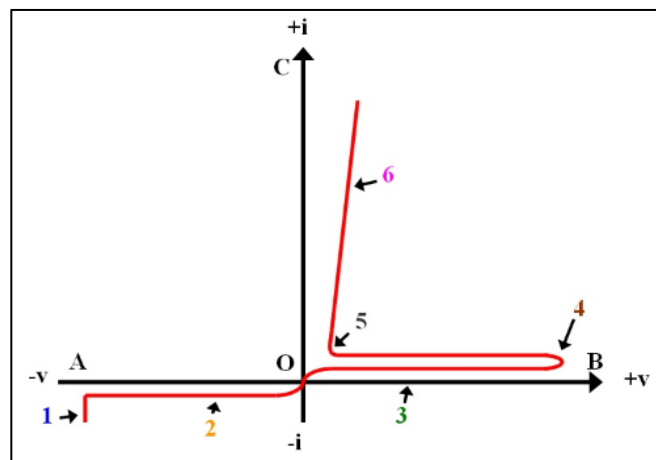


Figure (I-07) : caractéristique du Thyristor réel [20]

Le thyristor est un interrupteur à trois segments.

La caractéristique d'un thyristor est présentée ci-contre :

1. Avalanche, ou tension de claquage négative ;
2. Courant inverse ;
3. Courant de fuite direct ;
4. Tension d'amorçage (tension de « claquage » positive) directe ;
5. Courant de maintien ;
6. Courant de conduction [20].



#### I.4.4.2/ Fonctionnement :

Si la tension  $V_{AK}$  dépasse la valeur de la tension d'amorçage (4 sur la caractéristique), alors le thyristor se met à conduire (6 sur la caractéristique).

Si  $V_{gk}$  est positive, alors la valeur de la tension d'amorçage diminue :  $V_{AK}$  doit être plus faible pour que le thyristor conduise. En choisissant judicieusement  $I_{gk}$ , on peut amorcer facilement le thyristor.

Une fois que l'effet d'avalanche a eu lieu, le thyristor continue à conduire quelle que soit la valeur du courant de gâchette jusqu'à ce que, soit :

1. Le courant de gâchette  $I_{ak}$  devienne inférieur à la valeur du courant de maintien (5 sur la caractéristique).
2.  $V_{AK}$  devienne négative [20].

#### I.4.4.3/ Caractéristique dynamique :

Le thyristor est commandables à l'amorçage par un courant à la gâchette et au blocage par un circuit extérieur. Il supporte des grandes puissances et des fréquences relativement faibles de commutation [8].

La commutation d'un thyristor (le passage de l'état passant à l'état bloqué) Suivant la nature de la tension anode - cathode, cette commutation peut se faire, soit de façon naturelle, soit de façon forcée.

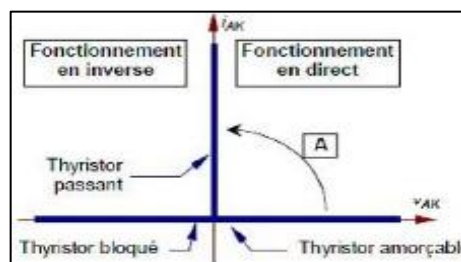


Figure (I-08) : Caractéristique statique et dynamique d'un thyristor [3].

#### I.4.4.4/ Application des thyristors :

Les thyristors sont utilisés comme interrupteurs dans les applications basses fréquences comme les redressements commandés. On peut également les trouver dans les onduleurs et les gradateurs [32].

#### I.4.4.5/ Les types de thyristors :

Il existe plusieurs types comme :

Thyristor GTO (GTO) : thyristor commandé par la gâchette à la fermeture et à l'ouverture.

Thyristor MCT (MCT) : thyristor avec deux MOSFET intégrés.

Triac (Triode for Alternating Current) : deux thyristors montés en tête-bêche avec gâchette commune [20].

## I.4.5/ Les interrupteurs entièrement commandés :

### I.4.5.1/ Le transistor :

Le transistor est un composant électronique qui est utilisé dans la plupart des circuits électroniques (circuits logiques, amplificateur, stabilisateur de tension, modulation de signal, etc.) aussi bien en basse qu'en haute tension [28].

Il existe plusieurs types de transistors de puissance :

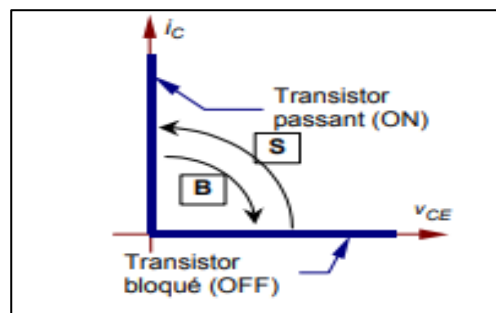
- Les transistors bipolaires
- Les transistors MOS à effet de champ ou MOSFET
- Les transistors bipolaires à grille isolée ou IGBT [4].

Ces différents types se distinguent les uns des autres par :

- La chute de tension à l'état passant.
- La rapidité, c'est à dire la vitesse de commutation d'un état à un autre.
- La manière dont est commandé le transistor : en tension (MOSFET, IGBT) ou en courant (bipolaire) [4].

### A- Caractéristique statique et dynamique :

Les transistors sont des composants « deux segments » en raison de la forme de sa caractéristique. Ils sont commandable à la fermeture et à l'ouverture [30].



**Figure (I-09) :** Caractéristique statique et dynamique d'un transistor [3]

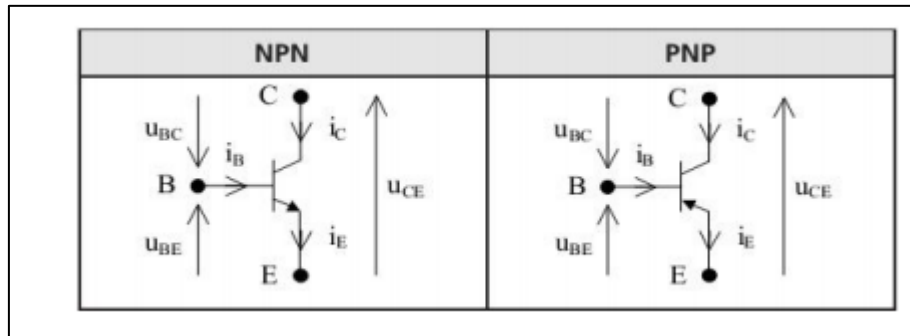
### B- Applications :

Les deux principaux types de transistors permettent de répondre aux besoins de l'électronique analogique et numérique mais aussi à ceux de l'électronique de puissance et haute tension.

➤ **Les transistors bipolaires (bjt):**

Le transistor est un composant totalement commandé : à la fermeture et à l'ouverture. Il n'est pas réversible en courant, ne laissant passer que des courants de collecteur positifs. Il n'est pas réversible en tension, n'acceptant que des tensions positives lorsqu'il est bloqué.

Parmi les deux types, NPN et PNP [3].



**Figure (I-10) :** Symbole des Transistor bipolaire BJT de type NPN et PNP

**A- Fonctionnement et états du transistor :**

Transistor bloqué ou OFF : état obtenu en annulant le courant  $i_B$  de commande, ce qui induit un courant de collecteur nul et une tension  $V_{CE}$  non fixée. L'équivalent est un commutateur ouvert.

Transistor saturé ou ON : ici, le courant  $i_B$  est tel que le transistor impose une Tension  $V_{CE}$  nulle tandis que le courant atteint une valeur limite dite de saturation,  $i_{csat}$  L'équivalent est un commutateur fermé [3].

Ils sont caractérisés par :

- C'est un interrupteur commandable à la fermeture et à l'ouverture par un courant à la base. Il supporte des moyennes puissances et des moyennes fréquences de commutation [8].

- Lors de la commutation, passage de l'état ouvert (fermé) à l'état fermé (ouvert), il va y avoir forcément des pertes, appelées pertes par commutation. Il existe des circuits auxiliaires appelés CALC (snubber) pour diminuer les pertes dans le composant (CALC = circuit d'aide à la commutation) [5].

**B- Application :**

Le fonctionnement en tout-ou-rien est fréquemment utilisé pour piloter des charges telles que :

Ampoules à incandescence, Diode électroluminescente ou DEL, bobine de relais [27].

On le trouve aussi dans les modules domotiques et de petits commerces tels que les chargeurs, les connecteurs et les interfaces [8].

➤ **Les transistors à grille isolée ou MOSFET :**

Un transistor à effet de champ à grille isolée plus couramment nommé MOSFET est un type de transistor à effet de champ, le MOSFET module le courant qui le traverse à l'aide d'un signal appliqué sur son électrode nommée grille [26].



**Figure (I-11) :** Symbole d'un Transistor MOSFET

**Ils sont caractérisés par :**

- Des interrupteurs commandables à la fermeture et à l'ouverture [8].
- La commande se fait par la tension VGS [5].
- Ils sont plus fragiles que les transistors bipolaires mais leur commande ne nécessite qu'une faible énergie.
- Pouvoir commuter des puissances faibles et moyennement faibles [8].
- Etre très rapide du point de vue fréquence de commutation [8].

**A- Fonctionnement :**

Ce composant est commandé en tension par VGS (à l'opposé du BJT commandé par son courant de base). Lorsque VGS est nul alors le courant de drain est nul, le composant est ouvert. Lorsque VGS est supérieur à 10 V (en général les MOSFET de puissance sont commandés en +15V), VDS est nulle, le composant est fermé [5].

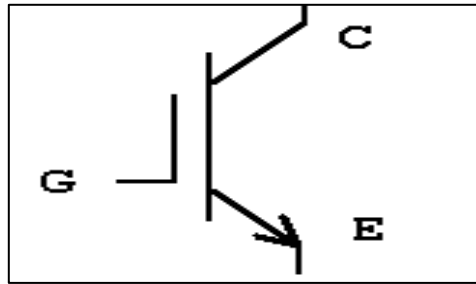
**B- Application :**

Il trouve ses applications dans les circuits intégrés numériques, en particulier avec la technologie CMOS, ainsi que dans l'électronique de puissance [26].

Présence dans des applications du domaine de télécommunication et de conversion à faible puissance et haute fréquence [8].

➤ **L'IGBT :**

Le transistor bipolaire à grille isolée (IGBT, de l'anglais Insulated Gate Bipolar Transistor) est un interrupteur électronique unidirectionnel de puissance commandé par une tension. G : Grille (Gate), C : Collecteur (Collector), E : Émetteur (Emitter) [31].



**Figure (I-12) :** Symbole d'un Transistor bipolaire à grille isolée IGBT

#### A- Fonctionnement :

Ce composant est commandé en tension. L'amorçage est identique à celui du MOSFET. Lors de l'ouverture, "l'effet transistor" va ralentir le blocage. Les charges stockées s'éliminent par recombinaison, ce qui a pour conséquence l'établissement d'un courant diminuant très lentement. Il est appelé courant de "queue" et est responsable de l'essentiel des pertes par commutation de l'IGBT [5].

Il est caractérisé par :

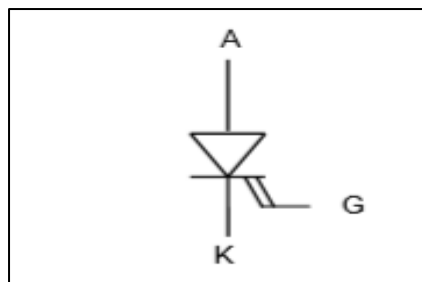
- Il supporte des grandes puissances et des fréquences de commutation moyennement grandes [8].

#### B- Application :

Les applications usuelles de l'IGBT sont les onduleurs, redresseurs et hacheurs pour les alimentations à découpage et la vitesse variable, mais aussi pour les FACTS [29].

#### I.4.5.2/ Le GTO :

Le thyristor GTO (Gate Turn Off) est une évolution du thyristor classique qui a la propriété de pouvoir être bloqué à l'aide de la gâchette, contrairement aux thyristors classiques. Ce symbole diffère un peu du thyristor au niveau de la gâchette [25].

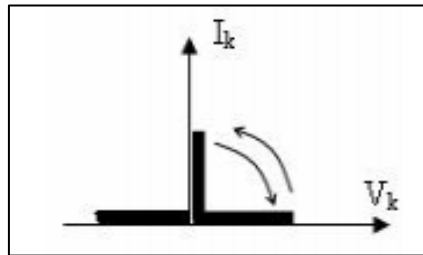


**Figure (I-13):** Symbol d'un Thyristor SCR

#### A- Caractéristiques statique et dynamique :

Par rapport au thyristor classique, le thyristor GTO est en plus commandable à l'ouverture par une forte impulsion négative du courant de gâchette

Ce composant est à 3 segments à la différence des transistors précédents. Du point de vue de sa commande, il se rapproche plus du BJT. Sa commande est donc plus difficile à mettre en œuvre pour les composants à grille isolée [5].

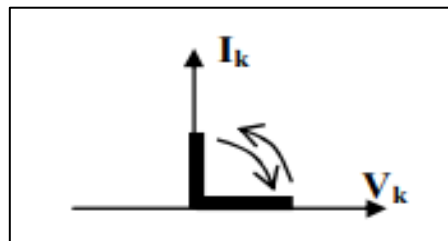


**Figure (I-14) :** GTO symétrique et ses caractéristiques idéales statiques et dynamiques [4]

❖ **Remarque :**

Certains GTO sont asymétriques et ne peuvent supporter une tension négative à l'état bloqué d'où le tracé en traits interrompus de la branche négative [23]. Ses caractéristiques statiques et dynamiques sont représentées à la figure (I-15) [4].

En pratique, c'est le thyristor GTO asymétrique qui est employé, et son emploi est réservé aux domaines des très fortes puissances [4].



**Figure (I-15) :** GTO asymétrique et ses caractéristiques idéales statiques et dynamiques [4]

## B- Gammes et usages

- Les GTO symétriques : supportent la même tension dans les deux sens ( $V_{ak-max} \approx V_{ka-max}$ ), ils sont utilisés dans les onduleurs de tension, de la même façon que les IGBT
- Les GTO asymétriques : les plus courants, ne supportent la tension que dans le sens  $V_{ak}$ , et doivent donc être utilisés avec une diode antiparallèle, Ils peuvent être utilisés dans les onduleurs de courant, les contacteurs statiques, ext [24] ....

**I.5/ Comparaison entre les différents interrupteurs entièrement commandables :**

Semi-conducteur	Niveaux de puissance pouvant manipuler	Vitesse de commutation « fréquences »
BJT	Moyen	Moyen
MOSFET	Faible	Rapide
GTO	Fort	Lent
IGBT	Moyen	Moyen
MCT	Moyen	Moyen

**Tableau (I-02) :** Niveaux de puissance et fréquence de commutation des semi-conducteurs [8]

**I.6/ Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté d'une manière générale les différents types de convertisseurs statiques, et puis Nous avons consacré sur le semi-conducteur de puissance qui sont l'élément clé de la conversion d'énergie et leurs caractéristiques statiques et dynamiques, applications et ainsi que leurs types.

Les interrupteurs de puissance sont conçus avec des matériaux semi-conducteur.

# Chapitre II

Les hacheurs non réversible



## II.1/ Introduction

La variation de la vitesse du Mcc s'effectue généralement par la variation de tension d'induit ou tension d'excitation. Pour cela, on utilise des convertisseurs statiques (hacheur) [17]. On distingue deux types de convertisseurs DC-DC :

- Convertisseurs DC-DC non isolés : appelés hacheurs, qu'ils soient réversibles ou bien non réversibles, le type réversible permet l'inversion du courant ou de la tension, par contre le type non réversible permet le transfert de l'énergie électrique dans un sens unidirectionnel (de la source vers la charge).

- Convertisseurs DC-DC isolés : appelés alimentations à découpage, qui correspondent aux applications petites puissance de la conversion DC/DC. Ces alimentations comportent, au sein des cellules de commutation, des transformateurs qui permettent d'assurer un isolement galvanique, et d'élever ou abaisser les niveaux de tension et de courant [18].

Dans notre cas, nous nous intéressons aux convertisseurs DC-DC non isolés.

## II.2/ Généralité sur les hacheurs :

Les hacheurs sont les convertisseurs statiques continu-continu permettant de fabriquer une source de tension continue variable à partir d'une source de tension continue fixe [15]. Ils jouent le même rôle que les transformateurs en courant alternatif [12]. La figure 4-1 rappelle le schéma de principe de le hacheur [15].

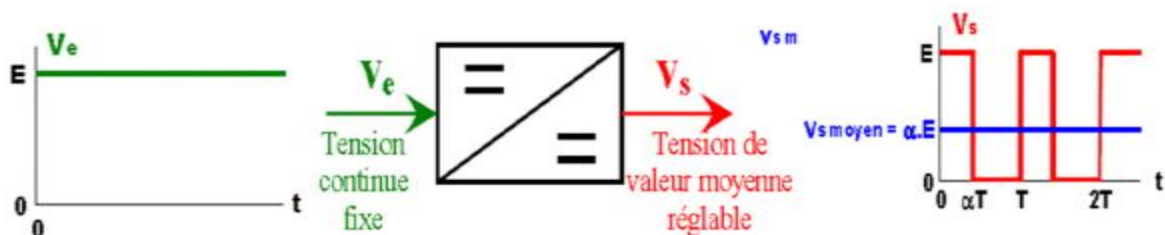


Figure (II-01) : convertisseur continu/continu (hacheur) [33]

Ces convertisseurs permettent le contrôle du transfert d'énergie entre une source et une charge qui est, soit de nature source de tension, soit de nature source de courant [12].

## II.3/ Domaine d'utilisation des hacheurs :

Un des gros domaines d'utilisation des hacheurs est la variation de vitesse du moteur à courant continu (MCC), Ils équipent par exemple la majorité des engins de moyenne traction, tels que ceux utilisés pour le métro. La première génération de TGV (TGV Sud Est) est équipée d'ensembles hacheurs-moteurs à courant continu.

On trouve aussi des hacheurs dans tous les équipements destinés à l'utilisation de l'énergie éolienne ou solaire. Ils permettent de rendre constante une tension d'entrée très versatile. Les hacheurs sont également utilisés dans l'alimentation des moteurs pas à pas [8].

## II.4/ Différents types des hacheurs :

Selon le parcours de l'énergie électrique entre la source et la charge, on distingue deux catégories de hacheurs : réversibles et non réversibles (Fig. (II-02)) :

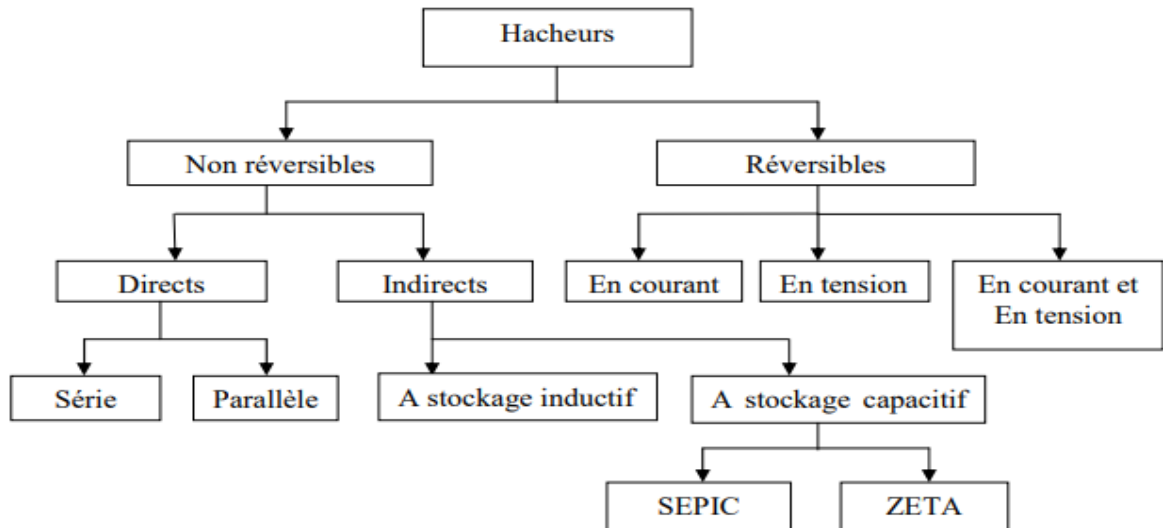


Figure (II-02) : Différents types de hacheurs [10].

### II.4.1/ Hacheurs réversibles :

Ce sont des structures qui assurent une réversibilité en tension et/ou en courant. Ainsi, il est possible d'inverser le sens de parcours de l'énergie

Dans cette catégorie, on distingue trois types :

- hacheur réversible en tension.
- hacheur réversible en courant.
- hacheur réversible en courant et en tension.

### II.4.2/ Hacheurs non réversibles :

Ce sont des structures qui n'assurent pas la réversibilité, ni en tension, ni en courant. L'énergie ne peut donc aller que de la source vers la charge. Dans cette catégorie, on distingue deux types :

- **Les hacheurs à liaison directe :** Qui associent deux sources de nature différentes :
  - hacheur série ou hacheur dévolteur (Buck).
  - hacheur parallèle ou hacheur survolteur (Boost).
- **Les hacheurs à liaison indirecte ou à accumulation :** Qui associent deux sources de même nature :

- hacheur à stockage inductif ou parallèle-série (Buck-Boost).
- hacheur à stockage capacitif (Cuk) [10].

### II.5/ Mode de fonctionnement :

Les hacheurs peuvent fonctionner suivant trois modes de fonctionnements dépendant de sa capacité de stockage d'énergie, de la période de commutation et de la charge. Ces trois modes sont :

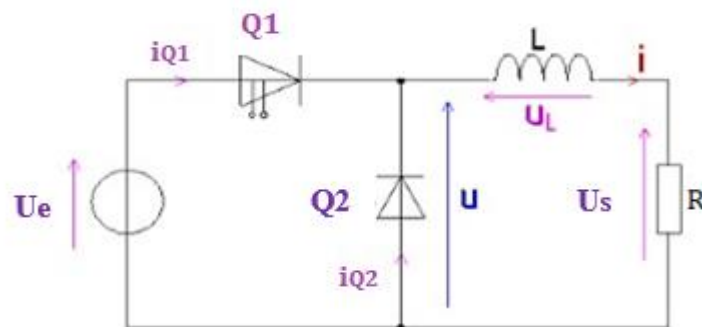
- ✓ Mode de Conduction Continue : Dans ce cas, l'énergie emmagasinée dans l'inductance  $L$  est transférée partiellement. Le courant dans l'inductance ne s'annule pas sur une période de commutation.
- ✓ Mode de Conduction Discontinue : Dans ce cas, l'énergie emmagasinée dans l'inductance  $L$  est transférée totalement. Le courant dans l'inductance s'annule avant la fin d'une de commutation [9].
- ✓ Mode de conduction critique : fonctionnement qui définit la limite entre les deux premiers modes de fonctionnement nommés [4].

Dans ce chapitre, on va consacrer à l'étude les hacheurs non réversibles en conduction continue

### II.6/ Les hacheurs à liaison directe

#### II.6.1/ Hacheur série (Buck) :

Un Hacheur série est un convertisseur continu-continu ou DC/DC [16], qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur [14].



**Figure (II-03) :** structure de convertisseur BUCK.

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie  $U_s$  est inférieure à celle de l'entrée  $U_e$ , Il comporte un interrupteur à amorçage commandé (transistor, bipolaire, transistor MOS ou IGBT...) et en série avec la source (Figure (II-03)) et une diode de roue libre [11].

La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie est de type source de courant [16].

II.6.1.1/ Principe de Fonctionnement :

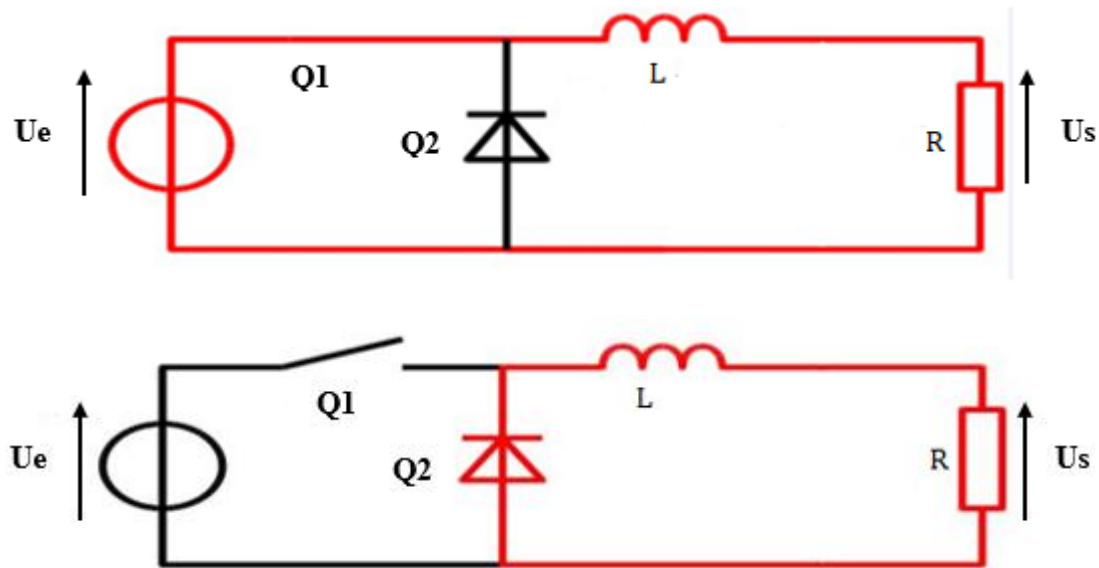


Figure (II-04) : fonctionnement de convertisseur BUCK [4].

L'interrupteur Q1 est fermé pendant la fraction  $DT$  de la période de découpage  $T$ . La source d'entrée fournit l'énergie à la charge  $R$  à travers l'inductance  $L$ . Lors du blocage du transistor, la diode  $Q2$  assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie emmagasinée dans cette inductance est alors déchargée dans le condensateur et la résistance de charge. La forme d'ondes de la tension de sortie est représentée à la figure (II-05) [4].

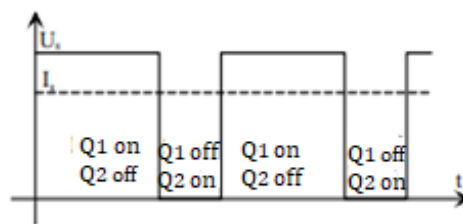


Figure (II-05) : forme d'onde de la tension  $U_s$  (V) [3].

En régime permanent, la valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle. La tension de sortie est donnée par le calcul suivant :

$$U_{smoy} = \frac{1}{T} \int_0^T U_s(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} U_e(t) dt = \frac{1}{T} [U_e]_0^{\alpha T} \tag{II-01}$$

$$U_{smoy} = \alpha U_e \tag{II-02}$$

Par définition,  $0 \leq \alpha \leq 1$ , Ce qui induit que le montage est abaisseur de tension (dévolteur) [4].

✓ Le rapport cyclique  $\alpha$  :

Il est comme le rapport de temps  $t_1$  où l'interrupteur est passant sur la période  $T$  :

$$\alpha = \frac{t_1}{T} \tag{II-03}$$

II.6.1.2/ Analyse de fonctionnement :

A-Etude d'un hacheur série charge inductive :

Le montage :

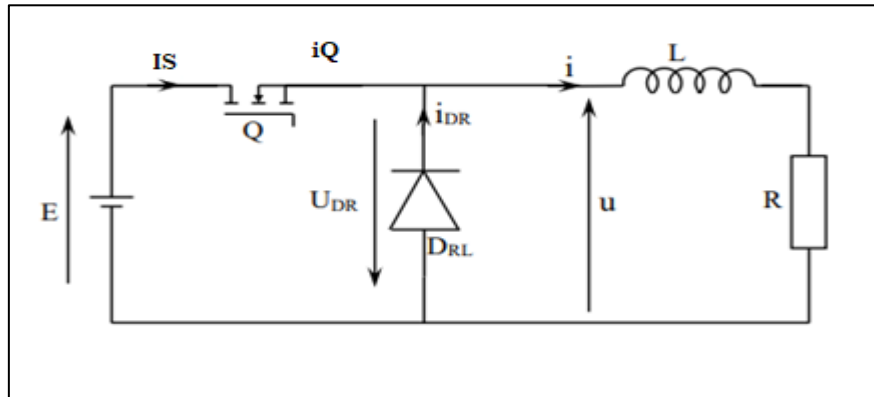


Figure (II-06) : structure de convertisseur BUCK à charge RL.

La charge inductive accumule une énergie électromagnétique  $W = \frac{Li^2}{2}$  si  $Q$  est, passant. Il serait dangereux de libérer brutalement cette énergie par l'ouverture de  $Q$  [12].

il en résulterait une surtension  $e = \frac{-d\phi}{dt}$  qui provoquerait des graves dommages. On évite cet inconvénient en utilisant une diode de roue libre (DRL) qui assure la continuité du courant dans la charge si  $Q$  est ouvert [12].

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage  $T = 1/f$ , comporte deux Etapes :

• **Première séquence de conduction**[0 à  $\alpha T$ ] :

$Q$  est fermé et la diode  $D_{RL}$  se comporte comme un interrupteur ouvert donc :

$$U_Q = 0, U_{DR} = -E, i_{DR} = 0, i_Q = i, E = U \tag{II-04}$$

L'intensité du courant dans la charge  $i(t)$  vérifie l'équation différentielle suivante :

$$E = Ri(t) + \frac{Ldi(t)}{dt} \tag{II-05}$$

Soit :

$$i(t) = \frac{E}{R} Ae^{-\frac{t}{\tau}} \tag{II-06}$$

$$\text{avec : } \tau = \frac{L}{R} \quad (\text{II-07})$$

$$\text{à } t = 0 \text{ on a : } i(0) = I_{\text{MIN}} = \frac{E}{R} + A \Rightarrow A = I_{\text{MIN}} - \frac{E}{R} \quad (\text{II-08})$$

$$i(t) = \frac{E}{R} + (I_{\text{MIN}} - \frac{E}{R})e^{-\frac{t}{\tau}} \quad [12] \quad (\text{II-09})$$

Cette phase correspond à la phase de croissance du courant dans la charge.

• **Deuxième séquence de conduction**[ $\alpha T$  à  $T$ ] :

Q étant ouvert, la diode de roue libre devient passante donc :

$$i_Q = 0, U_{\text{DR}} = 0, U = 0, i_{\text{DR}} = i \quad (\text{II-10})$$

L'intensité du courant dans la charge  $i(t)$  vérifie l'équation différentielle suivante :

$$0 = Ri(t) + \frac{Ldi(t)}{dt} \quad (\text{II-11})$$

Soit :

$$i(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}} \quad (\text{II-12})$$

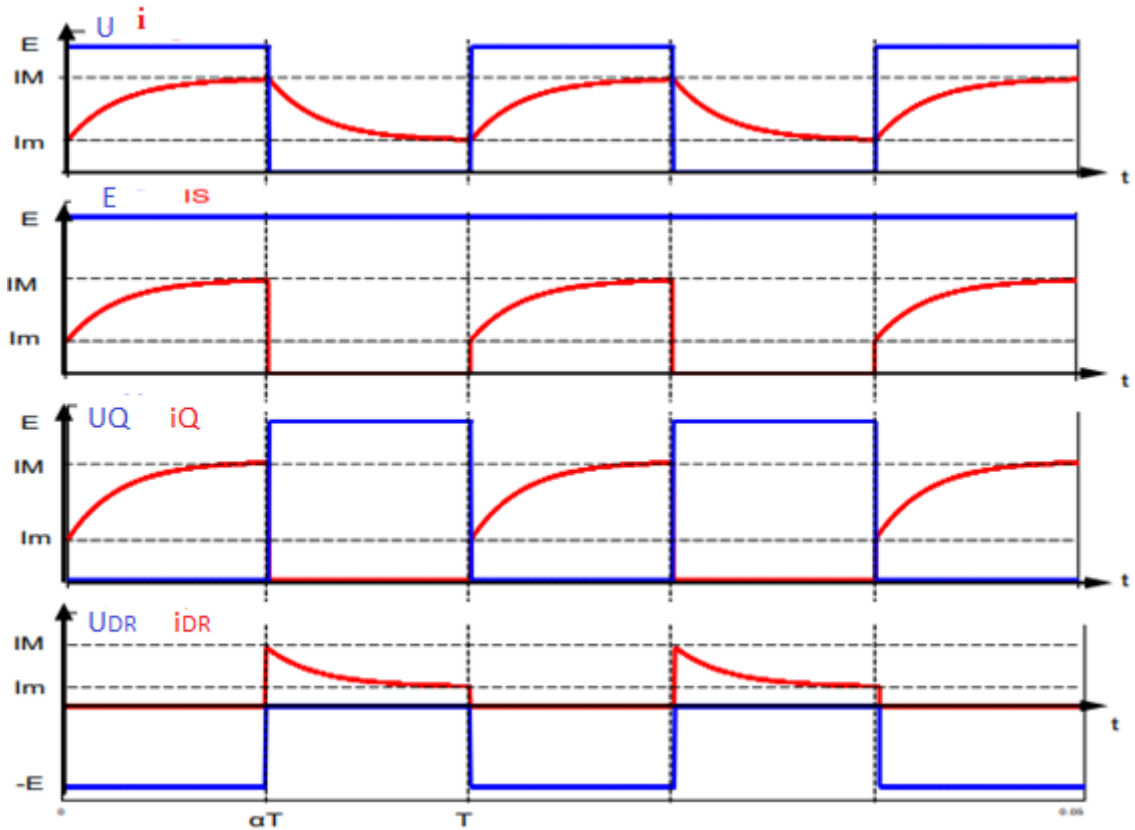
$$\text{à } t = \alpha T \text{ on a : } i(\alpha T) = I_{\text{MAX}} = A e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} \Rightarrow A = I_{\text{MAX}} e^{\frac{\alpha T}{\tau}} \quad (\text{II-13})$$

Donc on trouve :

$$i(t) = I_{\text{MAX}} e^{-\frac{(t-\alpha T)}{\tau}} \quad [12] \quad (\text{II-14})$$

Cette phase correspond à la phase de décroissance du courant dans la charge.

- **Forme d'ondes des principales grandeurs :**



**Figure (II-07) :** les formes d'ondes des grandeurs hacheur série (charge RL). [13]

- **La valeur moyenne :**

La valeur moyenne de la tension de sortie est :

$$U_{moy} = \alpha E \tag{II-15}$$

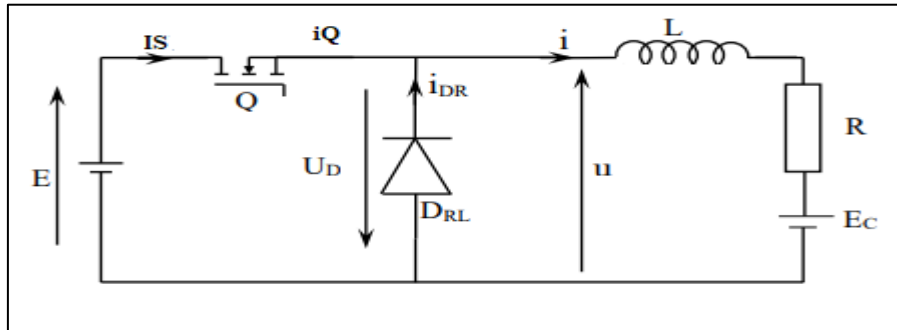
La valeur moyenne du courant de sortie est donnée par :

$$I_{moy} = \frac{I_s}{\alpha} \tag{II-16}$$

Le hacheur série (Buck) est équivalent à courant continu abaisseur de tension et éleveur de courant. [13]

**B- Étude d'un hacheur série charge R, L et Ec:**

- Le montage:



**Figure (II-08) :** structure de convertisseur BUCK à charge RLE

En pratique, la période T de fonctionnement de le hacheur est très petite devant la constante de temps  $\tau$  (fréquence de hachage élevée). Et ça vient en augmentant de l'inductance L ou en diminuant de la résistance R.

Si la résistance R est réduite la valeur de  $Ri(t)$  sera négligeable devant la tension  $E_c$ .

➤ **Première séquence de conduction [0 à  $\alpha T$ ] :**

Q est fermé et la diode DRL se comporte comme un interrupteur ouvert donc :

$$i_{DR} = 0, U = E, U_{DR} = -E, i_Q = i \tag{II-17}$$

L'équation différentielle est :

$$E = \frac{L di(t)}{dt} + E_c \tag{II-18}$$

Après avoir résolu cette équation différentielle on obtient :

$$i(t) = \frac{E - E_c}{L} t + I_{MIN} \quad [12] \tag{II-19}$$

➤ **Deuxième séquence de conduction [ $\alpha T$  à T] :**

Q étant ouvert, la diode de roue libre devient passante donc :

$$i_Q = 0, U = U_{DR} = 0, i_{DR} = i \tag{II-20}$$

L'équation différentielle est :

$$0 = E_c + L \frac{di(t)}{dt} \tag{II-21}$$

Après avoir résolu cette équation différentielle on obtient :



$$i(t) = \frac{-E_c}{L} (t - \alpha T) + I_{MAX} \quad [12] \quad (II-22)$$

➤ **Forme d'ondes des principales grandeurs :**

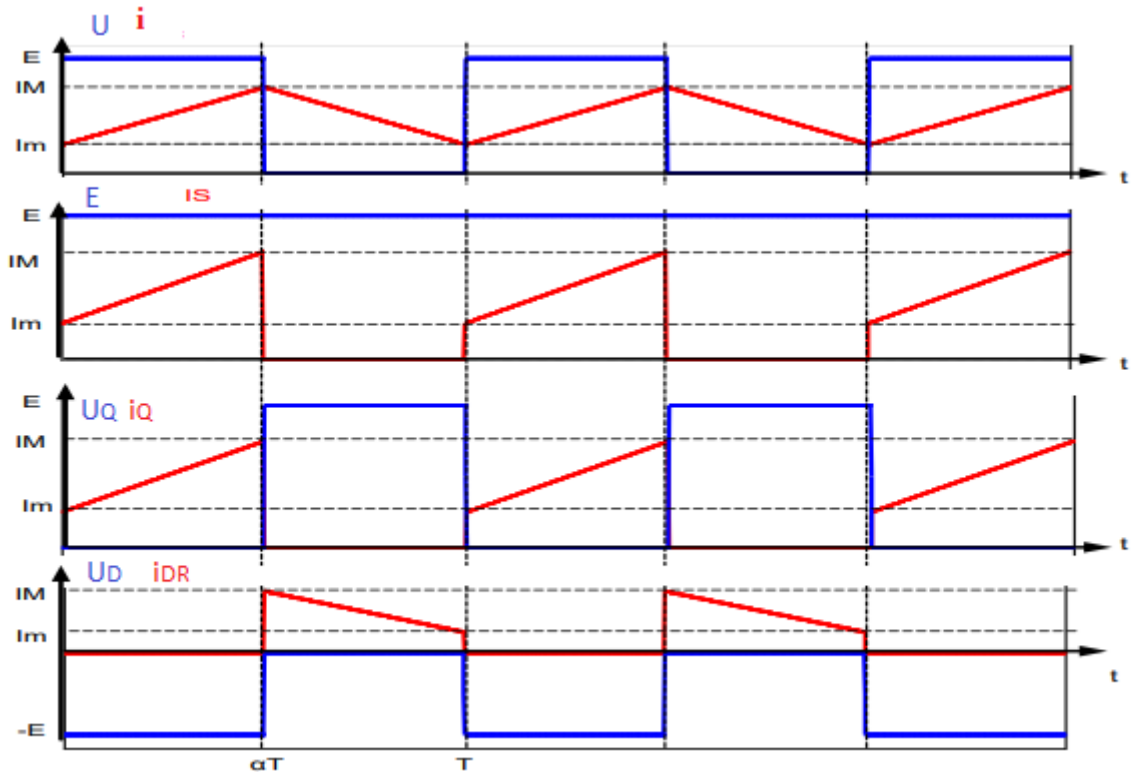


Figure (II-09) : les formes d'ondes des principales grandeurs hacheur série charge RLEc [13]

➤ **Ondulation du courant :**

Il est important pour un hacheur d'apprécier l'importance de l'ondulation du courant :

On a:

$$I_{MAX} = \frac{E - E_c}{L} \alpha T + I_{MIN} \quad (II-23)$$

$$I_{MIN} = \frac{-E_c}{L} (T - \alpha T) + I_{MAX} \quad (II-24)$$

$$\Delta I = I_{MAX} - I_{MIN} = \frac{E}{L} T \alpha (1 - \alpha) = \frac{E}{L_f} \alpha (1 - \alpha) \quad (II-25)$$

Cette ondulation est, maximale pour  $\alpha = 0,5 \Rightarrow \Delta I = \frac{E}{4L_f}$  [12] (II-26)

### II.6.1.3/ Simulation :

#### A- Hacheur série avec charge RL :

La figure (II-10) présente le schéma de simulation pour le hacheur série, réalisé sous Psim :

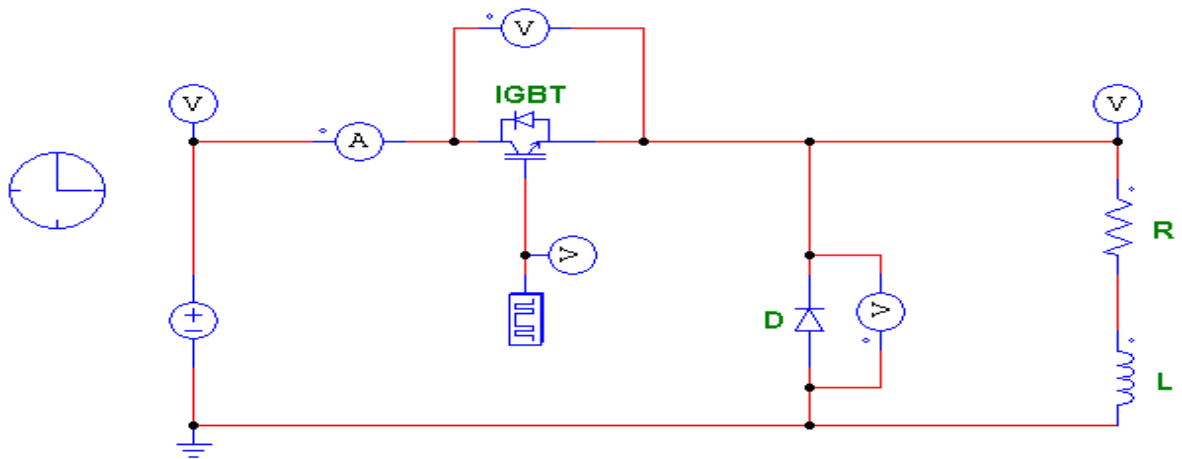


Figure (II-10) : montage hacheur série avec charge RL

Le montage que nous avons réalisé est à transistor IGBT

On a pris  $R=12\text{ohm}$  et  $L=0.05\text{ H}$  et  $V_S= 30\text{V}$  et le rapport cyclique  $\alpha=0.5$  et la fréquence  $f=50\text{HZ}$  finalement on a obtenu les résultats suivants :

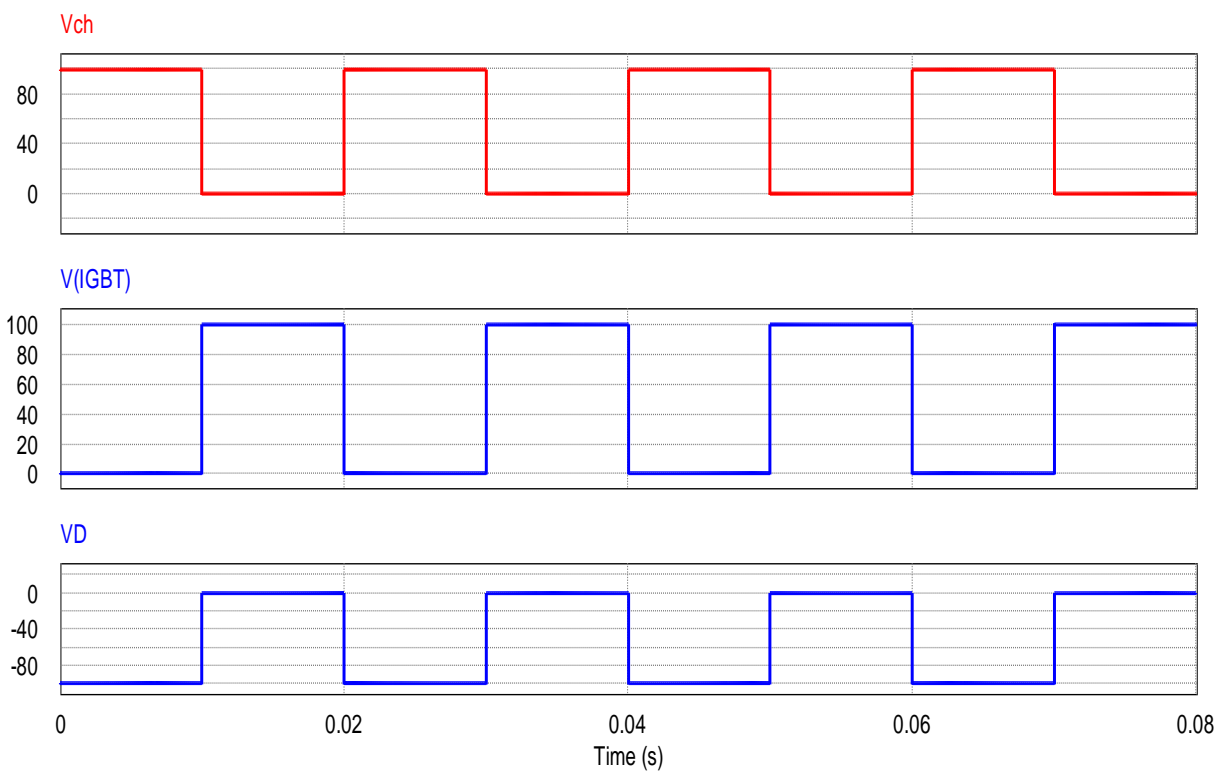


Figure (II-11) : formes d'ondes des tension ( $V_{ch}$ ,  $V(IGBT)$ ,  $V_D$ ) (V)

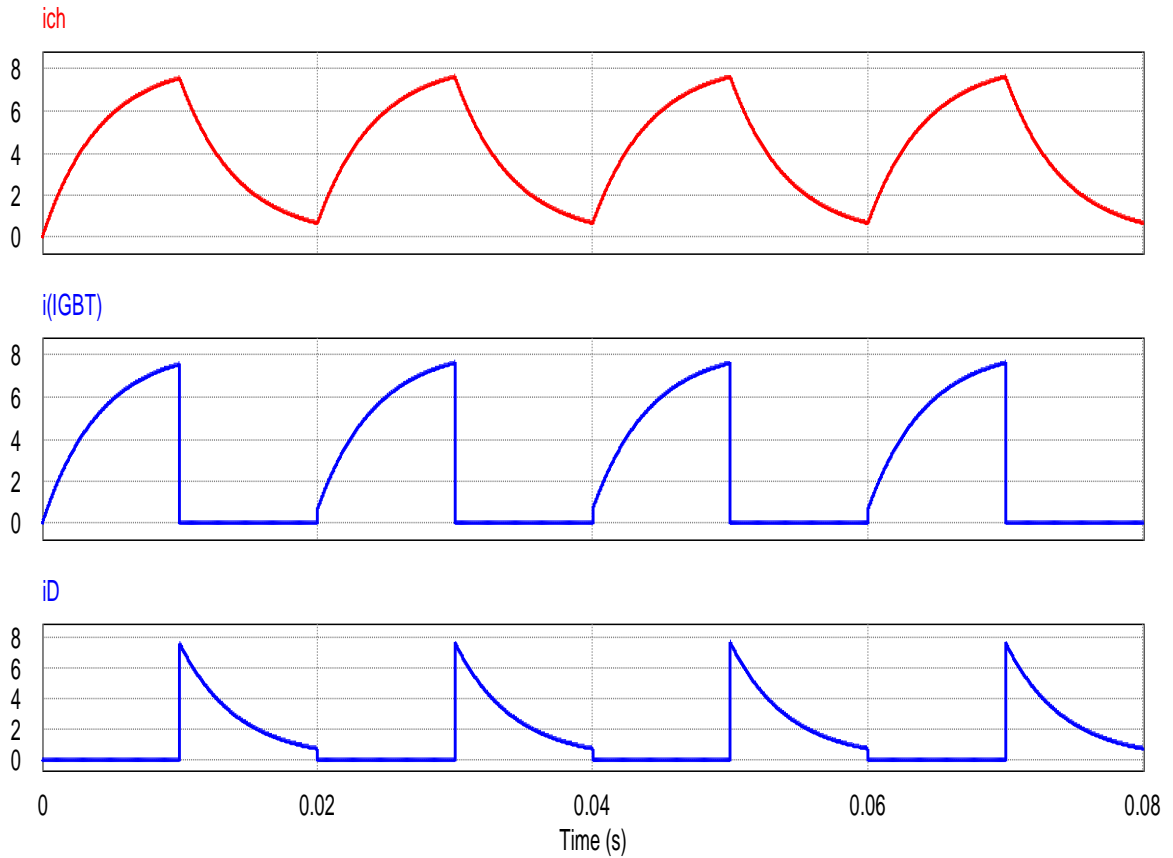


Figure (II-12) : formes d'ondes des courants ( $i_{ch}$ ,  $i_{IGBT}$ ,  $i_D$ ) (A)

**B- Hacheur série avec charge RLE : ( $R=12\Omega$  ;  $L=0.05H$  ;  $E=30V$  ;  $f=2500Hz$  ;  $\alpha=0.5$ )**

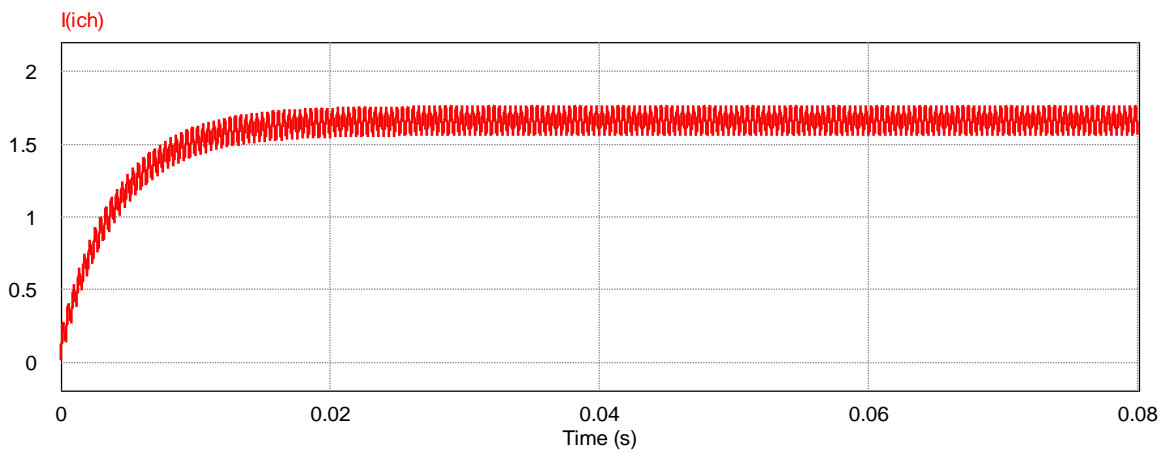
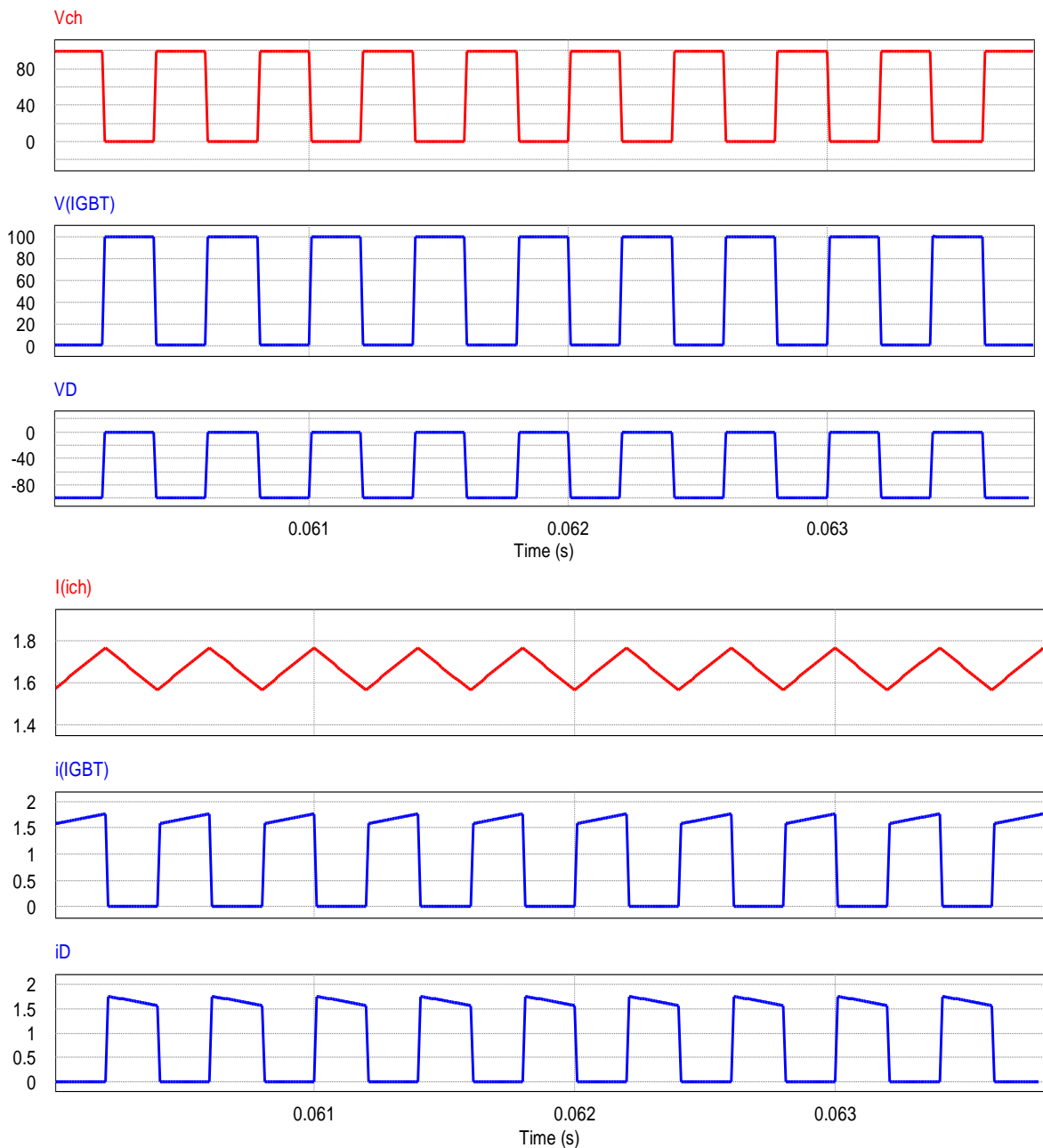


Figure (II-13) : forme d'onde du courant de sortie  $i_{ch}$  (A) dans le régime transitoire et permanent



**Figure (II-14) :** formes d’ondes des courants (A) et des tensions (V) dans le régime permanent

➤ **Interprétation des résultats :**

-les résultats théoriques et ceux de la simulation sont identiques

-Le courant dans l’interrupteur (IGBT) est le même courant d’entrée qui vaut la valeur du courant de charge  $i_{ch}$  durant l’intervalle  $[0 \text{ à } \alpha T]$ , et pour le courant de diode D durant l’intervalle  $[\alpha T \text{ à } T]$  prend la valeur du courant de charge  $i_{ch}$ , cela est dû à L’énergie emmagasinée dans cette inductance ce qui permet de libérer cette énergie dans le circuit fermé par cette diode

-Durant l'état passant la tension de sortie  $V_{ch}$  est égale à la tension d'entrée  $V_s$  avec ( $V_{igt} = 0$  et  $V_D = -V_s$ ), Durant l'état bloquée la tension de sortie est nulle avec ( $V_{igt} = V_s$  et  $V_D = 0$ ).

- lorsque la charge est RLE on remarque que le courant de charge possède deux régimes transitoires et permanent.

Dans le régime permanent, Durant l'intervalle  $[0; \alpha T]$  le courant  $i$  est croissant et l'énergie stockée sous forme magnétique dans l'inductance augmente ; durant l'intervalle  $[\alpha T; T]$   $i$  est décroissant et l'inductance se décharge.

- La valeur moyenne de la tension de sortie étant toujours inférieure à  $V_s$ , on a :

$$V_{chmoy} = \alpha V_s = 0.5 \times 100 = 50V \tag{II-27}$$

Donc, cet hacheur est aussi qualifié d'abaisseur.

- On remarque que la valeur du courant dans la charge RLE est inférieure à la valeur du courant dans la charge inductive en raison de l'existence de source de tension ( $E$ ) qui absorbe les courants.

- la forme du courant  $i_{ch}$  a pris la forme parabole dans la charge RL et lisse dans la charge RLE. L'équation du courant  $i_{ch}$  dans la charge RLE avant faire le lissage est :

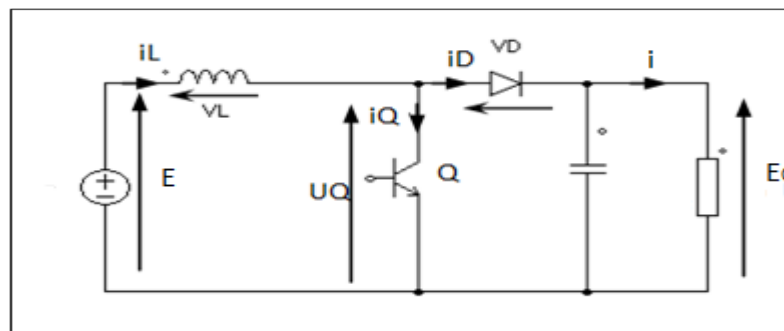
$$i(t) = (I_{MAX} + \frac{E_c}{R})e^{-\frac{(t-\alpha T)}{\tau}} - \frac{E_c}{R} \tag{II-28}$$

D'après cette équation on trouve que lorsque on augmente le taux ( $\tau = \frac{L}{R}$ ) soit en augmentant L ou en diminuant R, la forme du courant de charge devient presque linéaire.

**II.6.2/ Hacheur parallèle (BOOST) :**

Un Hacheur série est un convertisseur continu-continu ou DC/DC [16] qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur [14].

Lorsque l'on désire augmenter la tension d'une source continue on peut utiliser le hacheur parallèle de type BOOST, appelé également hacheur survolteur [16].



**Figure (II-15) :** schéma d'un hacheur parallèle

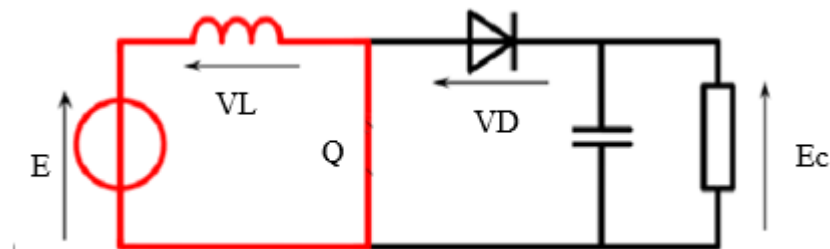
Il est considéré comme une liaison directe entre une source de courant continu et un récepteur de tension continue. Le récepteur proprement dit, constitué par la résistance  $R$  et le condensateur de filtrage  $C$  monté en parallèle à ses bornes, a le comportement de source de tension exigé par le convertisseur. Par contre, il faut placer une bobine d'inductance  $L$  en série avec l'alimentation de tension  $U_e$  pour la transformer en une source de courant DC [10].

### II.6.2.1/ Principe de fonctionnement :

Nous allons diviser en deux phases distinctes le fonctionnement de le hacheur survolteur selon l'état de l'interrupteur  $Q$

**De 0 à  $\alpha T$  :** phase d'accumulation d'énergie :

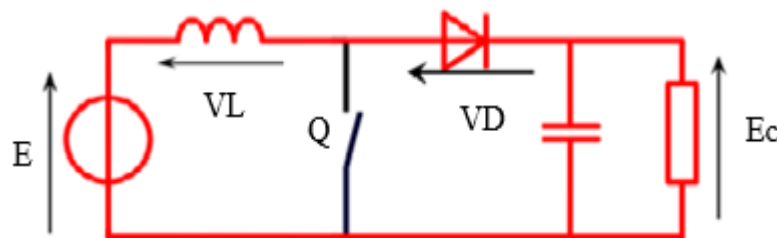
L'interrupteur  $Q$  est fermé (état passant), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode  $D$  est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation.



**Figure (II-16) :** Interrupteur  $Q$  passant [16]

**De  $\alpha T$  à  $T$  :**

L'interrupteur  $Q$  est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur. Sa f.e.m s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode  $D$ , le condensateur  $C$  et la charge  $R$ . Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité, qui va fixer la tension de sortie [16].



**Figure (II-17):** Interrupteur  $Q$  ouvert [16]

### II.6.2.2/ Analyse du fonctionnement :

➤ **Première séquence de conduction [0 à  $\alpha T$ ] :**

Pendant cette phase, L'interrupteur Q est fermé et la diode D bloquée. Par conséquent :

$$U_Q = 0, V_D = -E_c, i_D = 0, i_Q = i_L, V_L = E \tag{II-29}$$

On a  $E \gg Ri_L(t)$  donc :

L'intensité du courant dans l'inductance  $i_L(t)$  vérifie l'équation différentielle suivante :

$$E = L \frac{di_L(t)}{dt} \tag{II-30}$$

Soit :

$$i_L(t) = \frac{E}{L}t + I_{L\text{MIN}} \tag{II-31}$$

➤ **Deuxième séquence de conduction [ $\alpha T$  à  $T$ ] :**

Pendant cette phase, la diode D est fermée et l'interrupteur Q bloquée. Par conséquent :

$$U_Q = E_c, V_D = 0, i_D = i_L, i_Q = 0, V_L = E - E_c \tag{II-32}$$

L'intensité du courant dans l'inductance  $i_L(t)$  vérifie l'équation différentielle suivante :

$$E = E_c + L \frac{di_L(t)}{dt} \tag{II-33}$$

Soit :

$$i_L(t) = \frac{E-E_c}{L}(t - \alpha T) + I_{L\text{MAX}} \tag{II-34}$$

**Formes d'ondes des principales grandeurs :**

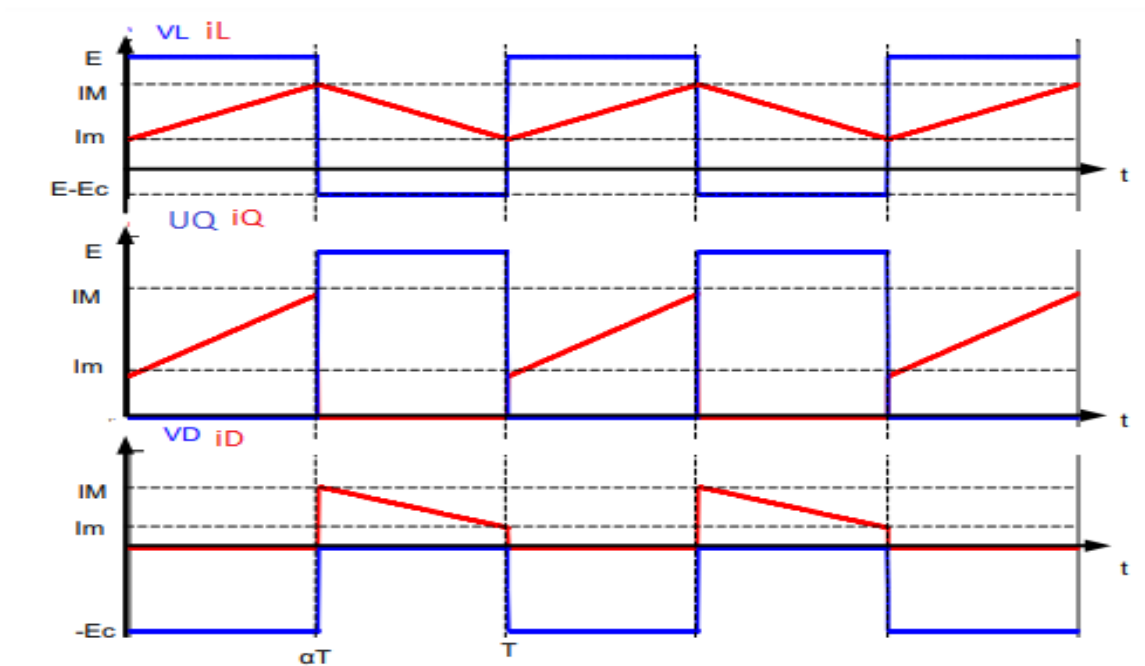


Figure (II-18) : Formes d'ondes des principales grandeurs d'un hacheur parallèle [13]

**Calcul la valeur moyenne :**

La tension moyenne aux bornes d'une inductance est nulle, donc

$$V_L = \frac{1}{T} \int_0^T U_L(t) dt = 0 \tag{II-35}$$

$$E_c = \frac{E}{1-\alpha} \tag{II-36}$$

La valeur moyenne du courant de sortie est donnée par :

$$i = (1 - \alpha) i_L \tag{II-37}$$

Le hacheur parallèle (survolteur) est équivalent à courant continu élévateur de tension et abaisseur de courant. Par ailleurs ; si on néglige les pertes dans l'inductance, on peut écrire que les puissances d'entrées et de sorties sont égales soit [13] :

$$E \cdot i_{smoy} = E_{cmoy} \cdot i_{cmoy} \tag{II-38}$$

**Ondulation du courant dans l'inductance :**

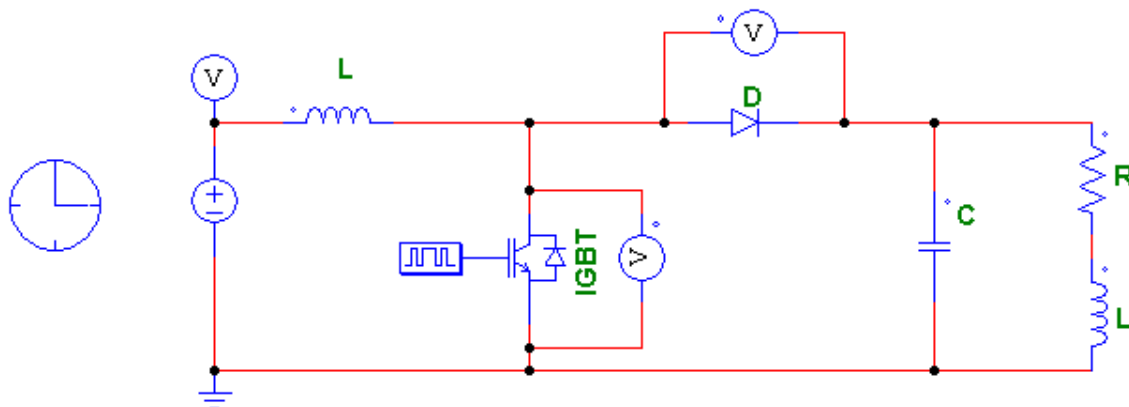
$$\text{On a : } I_{LMAX} = \frac{E}{L} \alpha T + I_{LMIN} \tag{II-39}$$

$$\text{donc : } \Delta i_L = I_{LMAX} - I_{LMIN} = \frac{E}{L} \alpha T = \frac{E}{L f} \alpha \tag{II-40}$$

**II.6.2.3/ Simulation :**

**A-Hacheur parallèle avec charge RL :**

La figure (II-19) présente le schéma de simulation pour le hacheur série, réalisé sous Psim :

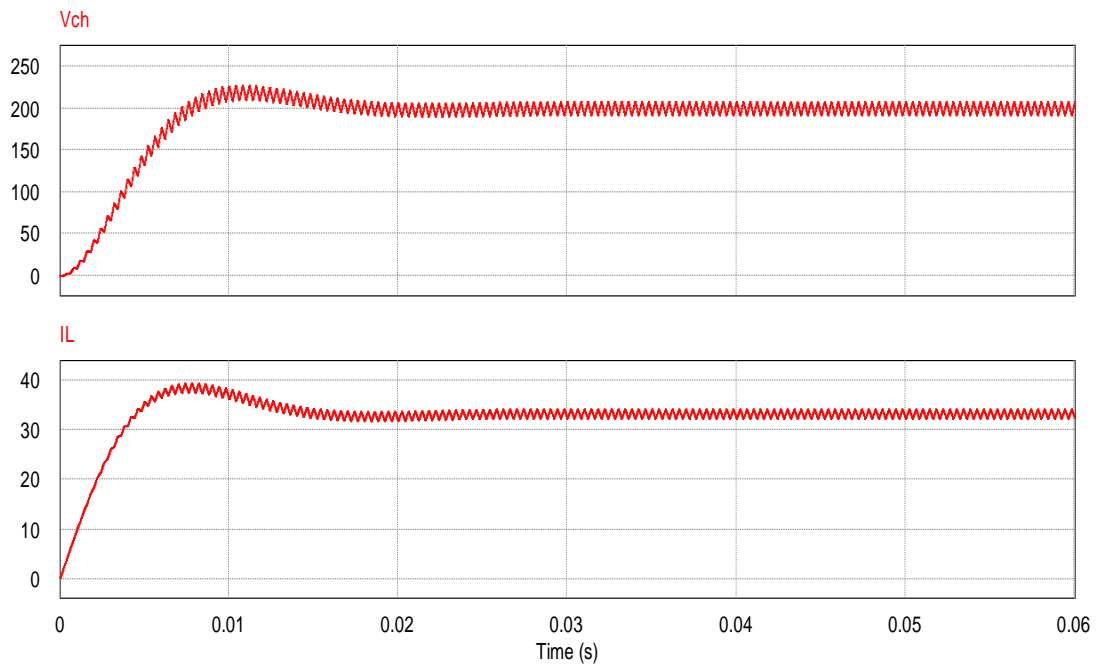


**Figure (II-19) :** montage hacheur parallèle avec charge RL

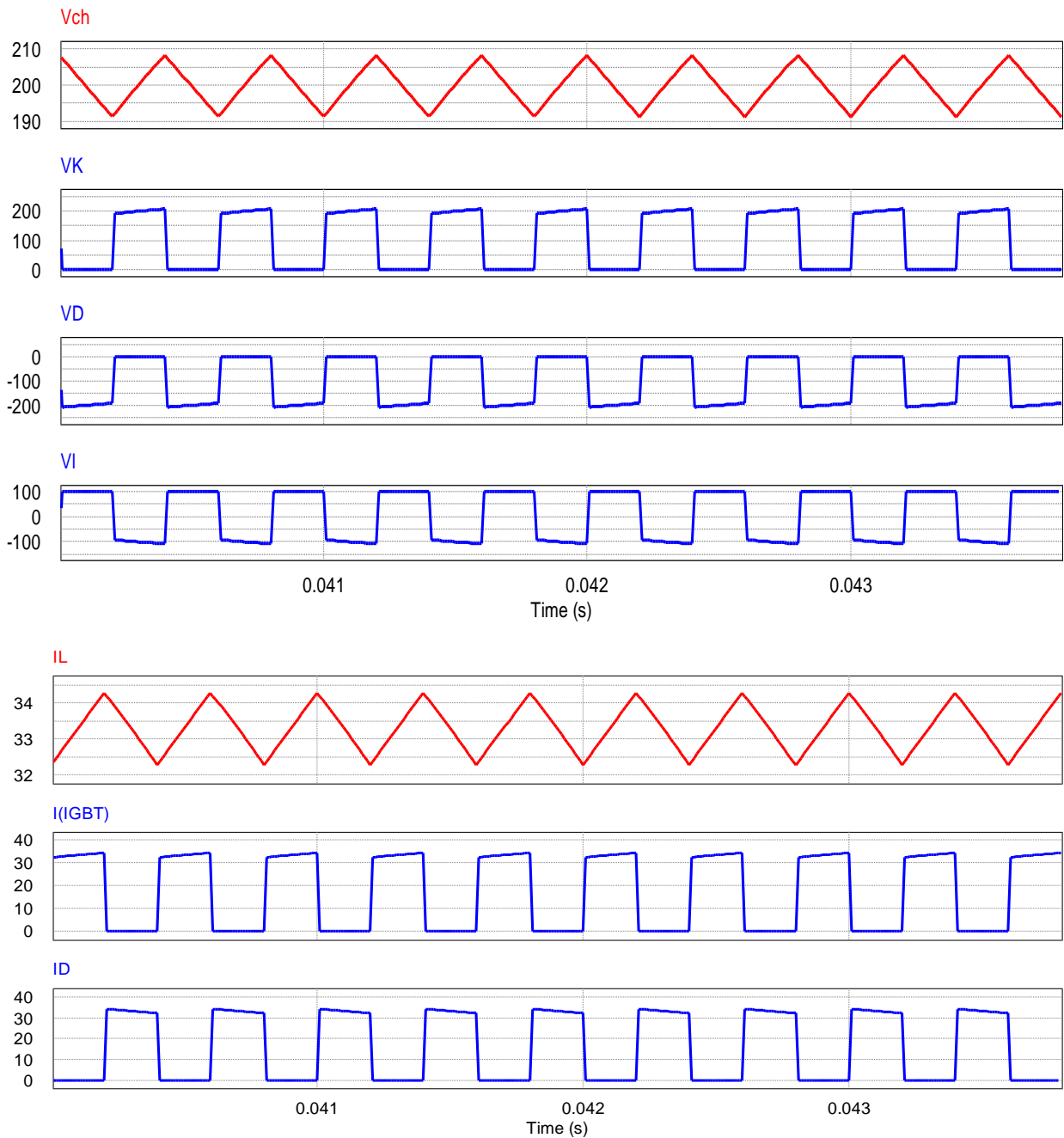
Le montage que nous avons réalisé est à transistor IGBT.



On a pris  $R=12\Omega$  et  $L=0.05$  H et  $V_S= 30$ V et le rapport cyclique  $\alpha= 0.5$  et la fréquence  $f=2500$ Hz finalement on a obtenu les résultats suivants :



**Figure (II-20) :** formes d’ondes du courant  $I_L$  (A) et de la tension  $V_{ch}$  (V) dans le régime transitoire et permanent



**Figure (II-21) :** formes d’ondes des courants (A) et des tensions (V) dans le régime permanent

**Interprétation les résultats :**

- On remarque que les résultats de simulation et les résultats de l’étude théorique sont pareil.

- on note que la tension de sortie et le courant dans l’inductance possèdent deux régimes transitoire et permanent que le courant  $i_L$  effectue un pic de valeur 38 A puis il s’établit à une valeur moyenne de 33 A. pour la tension  $V_{ch}$  effectue un pic de valeur 220 V. ensuite, elle s’établit à une valeur moyenne de 200V.

- la tension de sortie est égale à 200V dans le régime permanent et ça vient de :

$$V_{chmoy} = \frac{V_s}{1-\alpha} \tag{II-41}$$

On a pris précédemment  $\alpha = 0.5$  et  $V_s = 100V$  donc la valeur moyenne de sortie vaut 200V par conséquent Le hacheur parallèle est équivalent à courant continu élévateur de tension.

- Durant l'Etat passant, on remarque que  $V_k = 0$ ,  $V_D = -V_{ch}$ ,  $V_L = V_s$  et durant l'Etat bloqué on remarque que  $V_k = V_{ch}$ ,  $V_D = 0$ ,  $V_L = V_s - V_{ch}$ .

- on remarque que la valeur tension de sortie est fixe en raison d l'existence du condensateur C qui assure la continuité d'alimenter la charge. et ainsi qu'il affecte sur l'ondulation de la tension de charge.

## II.7/ Les hacheurs à liaison indirecte ou à accumulation

### II.7.1/ Hacheur à stockage inductif ou parallèle-série (Buck-Boost) :

Un hacheur à stockage inductif est un convertisseur statique d'énergie unidirectionnelle, il contrôle le transfert d'énergie entre deux sources de même nature (tension-tension) [12] par l'intermédiaire d'une source de courant (bobine) qui doit accumuler, puis restituer au récepteur l'énergie délivrée par le générateur [10].

Le schéma de principe de le hacheur à accumulation inductive est le suivant :

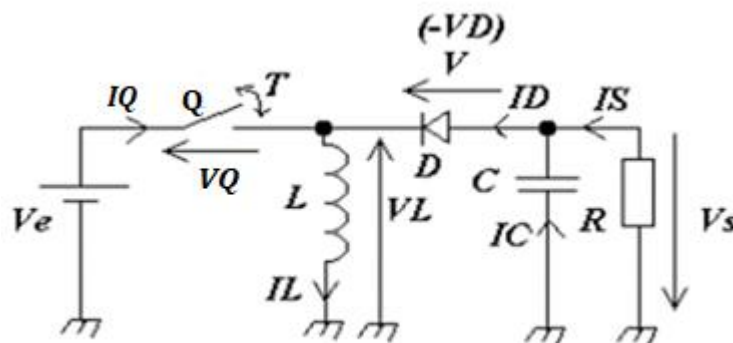


Figure (II-22) : schéma de bas d'un hacheur à stockage inductive [18]

C'est un montage abaisseur-élévateur de la tension de sortie. De plus c'est un montage inverseur de tension (tension de sortie négative par rapport à la référence de la source d'entrée) [10].

#### II.7.1.1/ Principe de fonctionnement :

Les interrupteurs sont ouverts et fermés alternativement avec une fréquence de commutation Modulée de telles sortes à ce que la tension de sortie est capable de suivre n'importe quel profil de référence.

Le fonctionnement d'un convertisseur Buck-Boost peut être divisé en deux configurations suivant l'état de l'interrupteur Q [19] :

Dans l'état passant, l'interrupteur Q fermé et la diode ouverte, la tension d'entrée, est directement appliquée aux bornes de l'inductance L, ainsi le courant dans l'inductance est de forme linéaire avec une pente positive. Dans cette phase, la charge reçoit son énergie du condensateur. Lorsque le transistor est éteint, la charge est alimentée par le filtre LC via la diode.

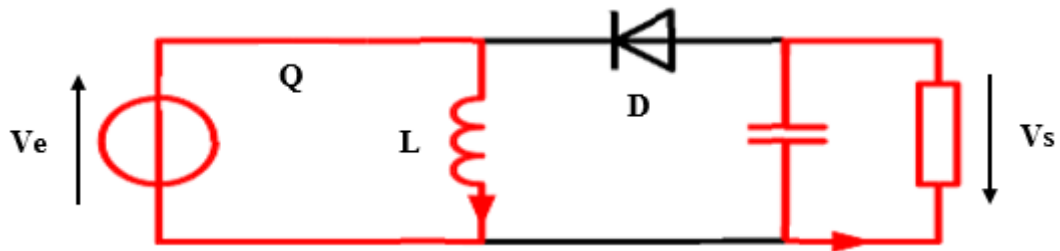


Figure (II-23) : Circuit équivalent pour Q fermé [19]

Dans l'état bloqué, l'interrupteur Q ouvert et la diode fermée. L'inductance est reliée à la charge et à la capacité. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité et la charge [19].

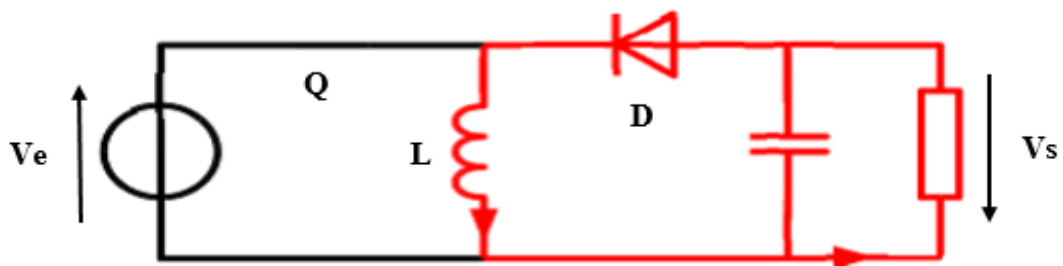


Figure (II-24) : Circuit équivalent pour Q ouvert [19]

II.7.1.2/ Analyse de fonctionnement :

➤ Lorsque  $0 \leq t \leq \alpha T$  :

L'interrupteur Q fermé et la diode bloquée donc :

$$V_Q = 0, V_D = -V_s + V_e = -V, V_L = V_e, I_C = -I_S, I_Q = I_L, I_D = 0 \quad (II-42)$$

Le courant  $i_L(t)$  est :

$$i_L(t) = \frac{V_e}{L} t + i_{Lm} \quad (II-43)$$

Ondulation de courant aux bornes de l'inductance est :

$$\Delta I_{L1} = i_{LM} - i_{Lm} = \frac{V_e}{L} \alpha T \quad (II-44)$$

➤ Lorsque  $\alpha T \leq t \leq T$  :

L'interrupteur Q ouvert et la diode fermée Donc :

$$V_D = -V = 0, V_Q = V_e + V_s, V_L = -V_s, I_C = I_D - I_S, I_Q = 0, I_D = I_L. \quad (II-45)$$

Le courant  $i_L(t)$  est :

$$i_L(t) = i_{LM} - \frac{V_s}{L}(t - \alpha T) \quad (II-46)$$

Ondulation de courant aux bornes de l'inductance

$$\Delta I_{L2} = i_{LM} - i_{Lm} = \frac{V_s}{L} T(1 - \alpha) \quad [18] \quad (II-47)$$

Les formes d'ondes des principales grandeurs :

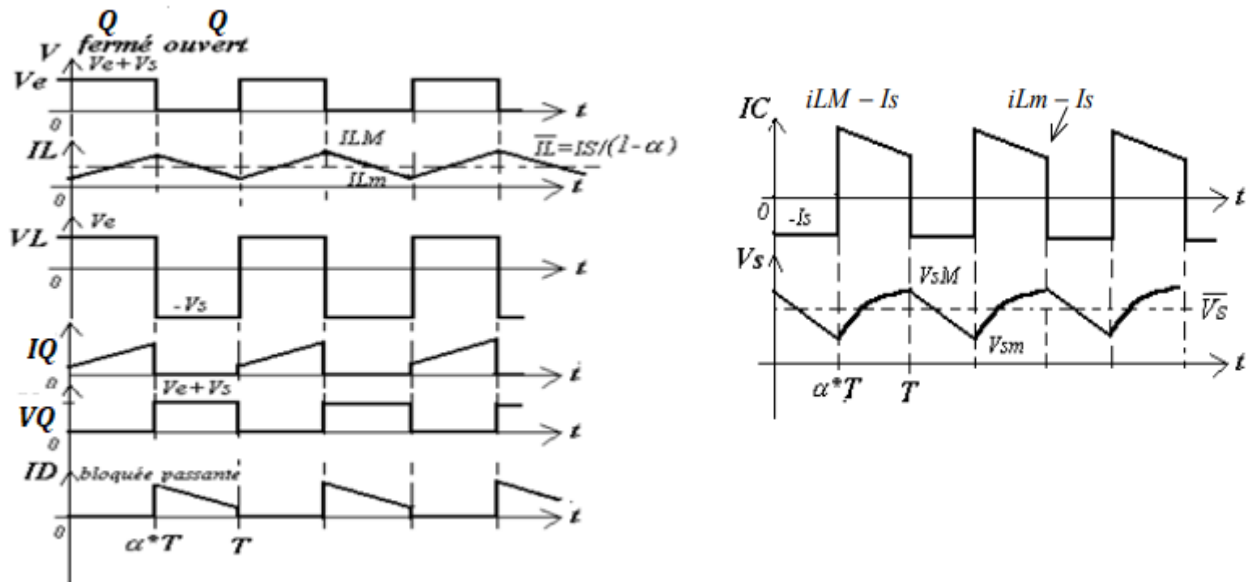


Figure (II-25) : les formes d'ondes des principales grandeurs d'un hacheur à stockage inductif [18]

La valeur moyenne de la tension :

Pour la relation expriment la valeur moyenne de la tension de sortie, il suffit d'écrire que la valeur moyenne de la tension aux bornes de L est nulle sur une période, soit :

$$V_e \cdot \alpha T - V_s \cdot (1 - \alpha) T = 0 \quad (II-48)$$

$$\text{Donc : } V_s = \frac{\alpha}{1 - \alpha} V_e \quad (II-49)$$

Ce montage peut élever ou abaisser la tension d'entrée en agissant sur le rapport cyclique  $\alpha$ .

- Si le rapport cyclique  $\alpha < 0,5$  : abaisseur
- Si le rapport cyclique  $\alpha > 0,5$  : élévateur

La relation entre le courant d'entrée et sortie donnés par :

$$I_Q = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_S \tag{II-50}$$

**Ondulation du courant  $i_L$  :**

La valeur moyenne de la tension aux bornes de L est nulle ( $V_L = 0$ ) sur une période donc :

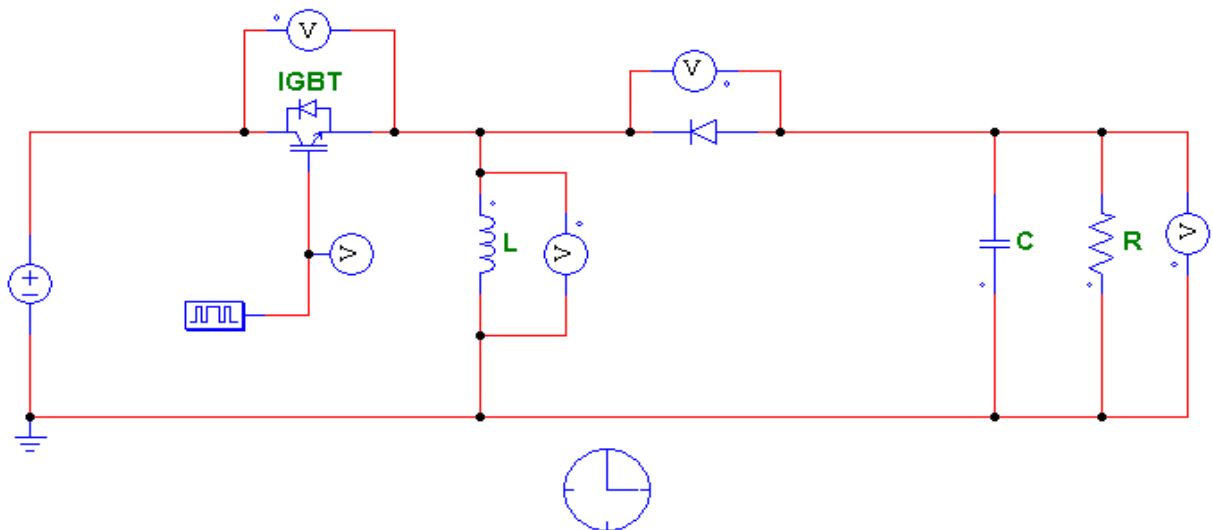
$$\Delta I_L = \Delta I_{L1} = - \Delta I_{L2} \tag{II-51}$$

La relation (II-49) donne l'ondulation de courant dans l'inductance en conduction continue et en fonction du rapport cyclique  $\alpha$  :

$$\Delta I_L = i_{LM} - i_{Lm} = \frac{V_e}{L} \alpha T = - \frac{V_s}{L} T (1 - \alpha) \tag{II-52}$$

**II.7.1.3/ Simulation :**

**A- Hacheur à stockage inductif avec charge R :**

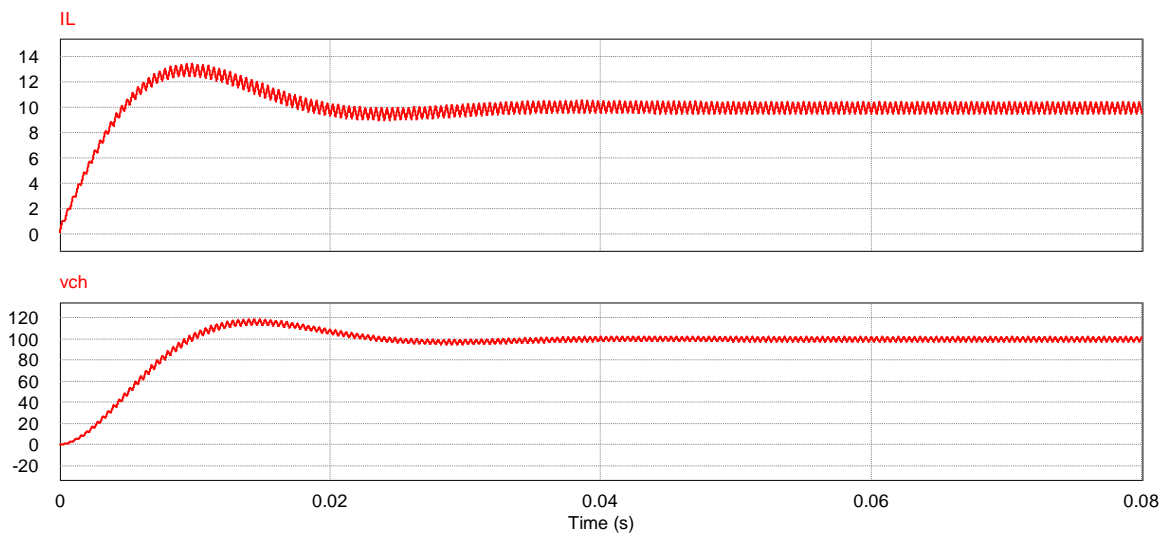


**Figure (II-26) :** montage hacheur à stockage inductif avec charge R

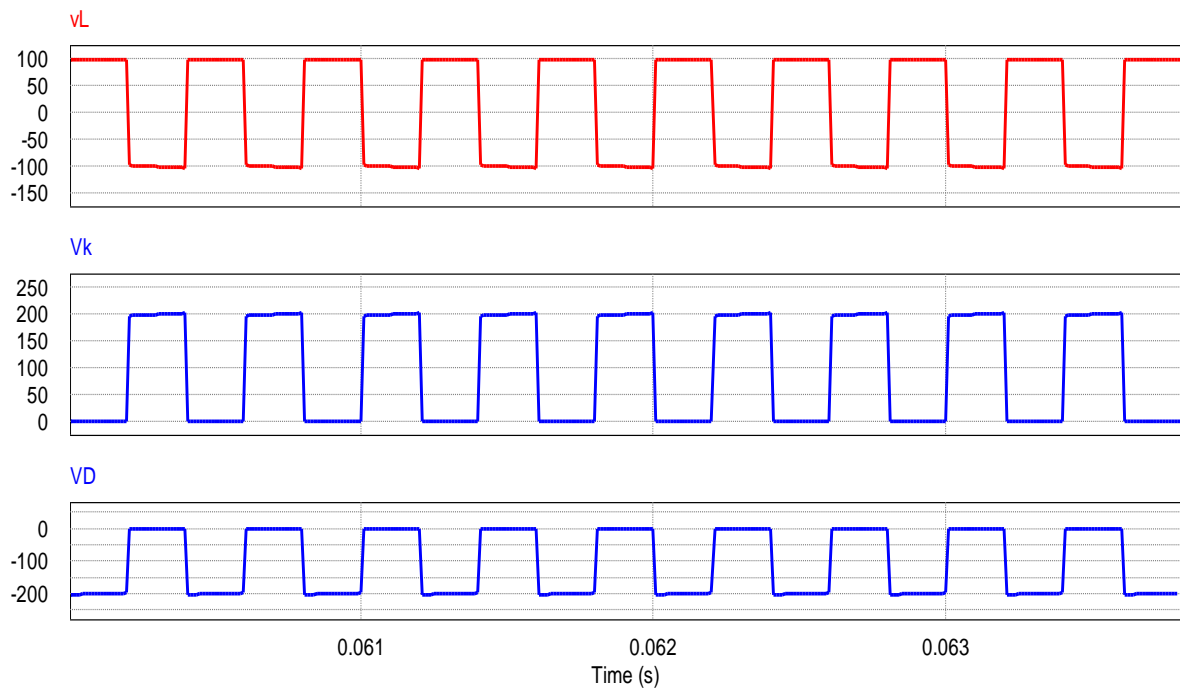
Le montage que nous avons réalisé est à transistor IGBT

On a pris  $R=12\text{ohm}$  et  $L=0.002\text{ H}$  et  $C=0.0002$  et  $V_S= 100\text{V}$  et le rapport cyclique  $\alpha=0.5$  et la fréquence  $f=2500\text{HZ}$

Finalement on a obtenu les résultats suivants



**Figure (II-27) :** formes d’ondes du courant  $I_L$  (A) et de la tension  $V_{ch}$  (V) dans le régime transitoire et permanent



**Figure (II-28) :** formes d’ondes des tension (V) dans le régime permanent

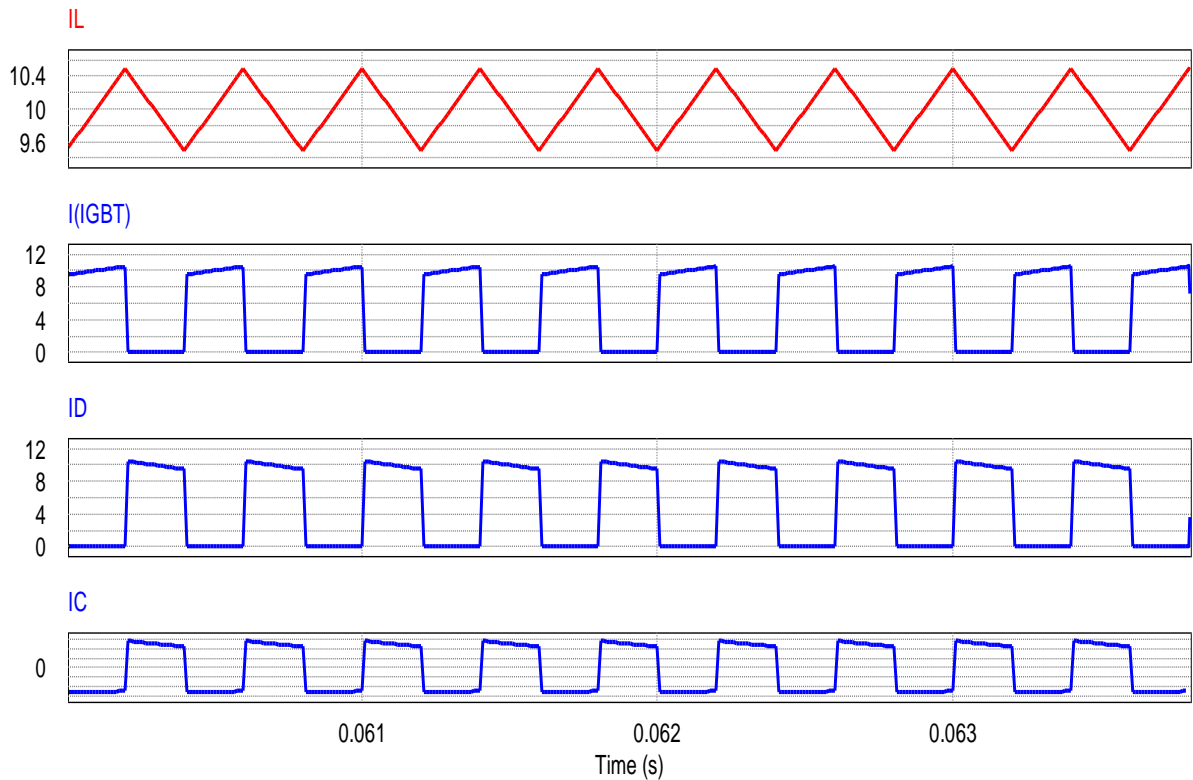


Figure (II-29) : formes d’ondes des courants (A) dans le régime permanent

**Interprétation des résultats**

-les résultats théoriques et ceux de la simulation sont identiques.

-Dans l’état passant, l’interrupteur k fermé et la diode ouverte, le courant dans l’inductance L est de forme linéaire avec une pente positive, durant l’état bloqué le courant IL est décroissant et l’inductance se décharge.

- comme on a vu précédemment dans le théorique, durant l’intervalle [0 à αT], la tension aux bornes de l’interrupteur (IGBT) est nulle par contre la tension aux bornes de la diode est négative  $-(Vs + Vch)$  ce qui signifie que IGBT passant et la diode bloquée on a aussi

$$VL = Vs,$$

$$I_{ight} = iL, ID = 0 \text{ et finalement } ic = -Ich.$$

Durant l’intervalle [αT à T] la tension aux bornes de la diode devient nulle et la tension aux bornes de l’interrupteur (IGBT) vaut  $(Vs + Vch)$  ce qui signifie que la diode passante et IGBT bloqué on a aussi  $VL = -Vch, I_{ight} = 0, ID = iL$  et finalement  $ic = iL - Ich$ .

On remarque que la tension de sortie  $Vch = 100V$  et ça vient de :

$$Vch_{moy} = \frac{\alpha}{1-\alpha} Vs \tag{II-53}$$

On a pris précédemment  $\alpha = 0.5$  et  $Vs = 100 V$  par conséquent  $Vch = 100V$



### II.7.2/ Hacheur à stockage capacitif :

Un hacheur à stockage capacitif ou convertisseur Cuk est un convertisseur statique DC-DC non réversible à conversion indirecte puisqu'il est considéré comme une liaison indirecte de transfert d'énergie entre deux sources de courant continu (présence d'inductances) par l'intermédiaire d'une source de tension continue (condensateur). Le schéma de base du convertisseur Cuk est donné par

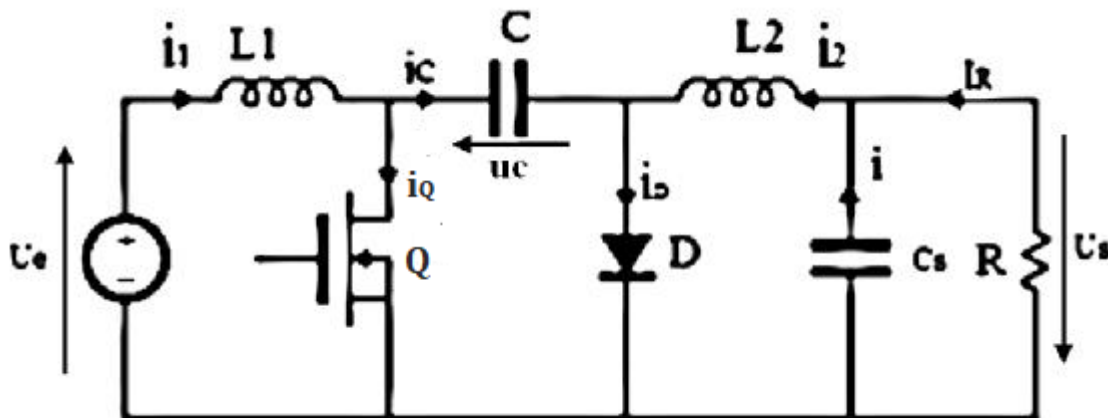


Figure (II-30) : schéma de bas d'un hacheur a stockage capacitif [10]

Le condensateur  $C$  est utilisé pour transférer l'énergie entre la source de tension d'entrée ( $U_e$ ) et celle de sortie ( $U_s$ ). Pour cela, il est connecté alternativement à l'entrée ou à la sortie du convertisseur grâce à l'interrupteur  $Q$  et à la diode  $D$ .

Les deux inductances  $L_1$  et  $L_2$  sont utilisées pour convertir respectivement la source de tension d'entrée et la source de tension de sortie en sources de courant. En effet une bobine peut être considérée, sur une courte période, comme une source de courant comme elle maintient celui-ci constant. Ces conversions sont nécessaires afin de limiter le courant lorsque l'on relie le condensateur  $C$  à une source de tension ( $U_e$  ou  $U_s$ ) [10].

#### II.7.2.1/ Principe et analyse du fonctionnement :

La figure (II-30) donne le circuit de puissance avec les grandeurs en tension, en courant de chaque composant et avec la dénomination exacte des interrupteurs de puissance.

Les hypothèses simplificatrices pour l'étude du fonctionnement sont les suivantes :

- La diode  $D$  et l'interrupteur  $Q$  sont considérés comme parfaits.
- Les tensions  $U$  et  $U$  sont constantes.
- Le condensateur  $C$  filtre la tension de sortie [10].

##### ➤ Premier intervalle : $0 < t < \alpha T$

A travers cette phase de conduction, l'interrupteur Q est fermé. D'autre part, la diode D est bloquée. Le schéma équivalent de cette phase est illustré par la figure (II-31). Le condensateur alimente le récepteur à courant  $i_2$  constant. La tension  $U_c$  décroît linéairement :

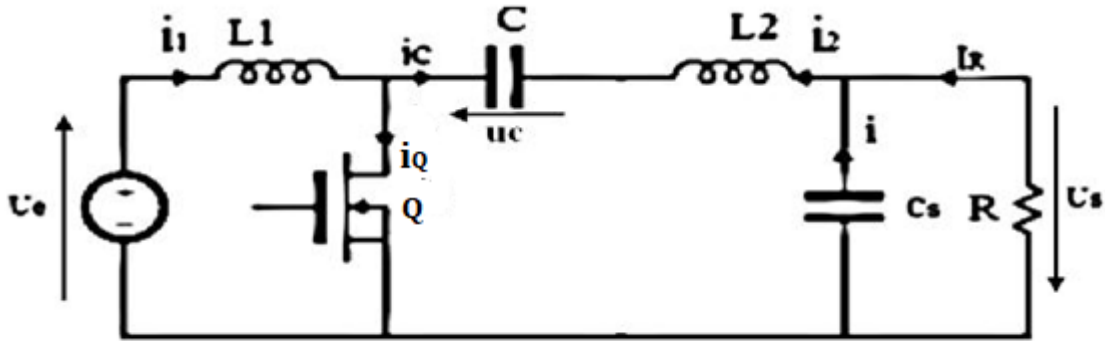


Figure (II-31) : Circuit équivalent pour Q fermé [10]

On a :

$$U_{L2} = U_c - U_s, I_c = -i_2, i = i_2 - i_R, i_Q = i_1 - i_c = i_1 + i_2, I_D = 0 \quad (II-54)$$

On en déduit, en désignant par  $I_{1m}$  et  $I_{2m}$  les valeurs minimales et initiales des courants  $i_1$  et  $i_2$  respectivement pour  $t = 0$ .

En régime établi, les tensions aux bornes de  $L_1$  et  $L_2$  sont nulles en valeur moyenne :

$$U_{L1} = U_e = L_1 \frac{di_1}{dt} \quad (II-55)$$

$$U_e = U_c - U_s = L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (II-56)$$

Le courant d'entrée  $i_1$  :

$$I_1 = \frac{U_e}{L_1} t + I_{1m} \quad (II-57)$$

Le courant de sortie  $i_2$  :

$$I_2 = \frac{U_e}{L_2} t + I_{2m} \quad [10] \quad (II-58)$$

➤ **Deuxième intervalle :  $\alpha T < t < T$**

A travers cette phase de conduction, l'interrupteur Q est ouvert. D'autre part, la diode D est passante. Le schéma équivalent de cette phase est illustré par la figure (II-32). Le condensateur est chargé à courant  $i_1$  constant par le générateur  $U_e$ . La tension  $U_c$  à ses bornes croît linéairement.

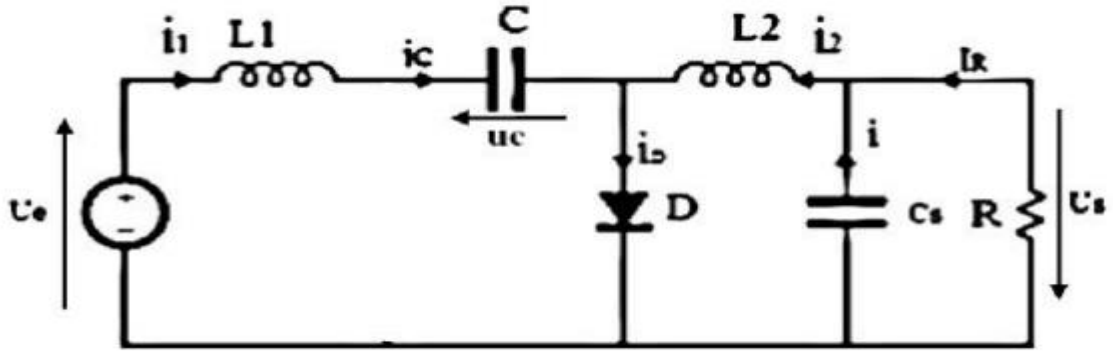


Figure (II-32) : Circuit équivalent pour Q ouvert et D passant [10]

On a :

$$i_C = i_1, i = i_2 - i_R, i_Q = 0, i_D = i_C + i_2 = i_1 + i_2. \tag{II-59}$$

On en déduit, en désignant par  $I_{1M}$  et  $I_{2M}$  les valeurs maximales des courants  $i_1$  et  $i_2$  Respectivement pour  $t = \alpha T$

En régime établi, les tensions aux bornes de  $L_1$  et  $L_2$  sont nulles en valeur moyenne :

$$U_{L1} = U_e - U_c = L_1 \frac{di_1}{dt} \tag{II-60}$$

$$U_{L2} = -U_S = L_2 \frac{di_2}{dt} \tag{II-61}$$

Le courant d'entrée  $i_1$  :

$$i_1(t) = I_{1M} - \frac{U_S}{L_1} (t - \alpha T) \tag{II-62}$$

Le courant de sortie  $i_2$  :

$$i_2(t) = I_{2M} - \frac{U_S}{L_2} (t - \alpha T) \tag{II-63}$$

Les Formes d'ondes :

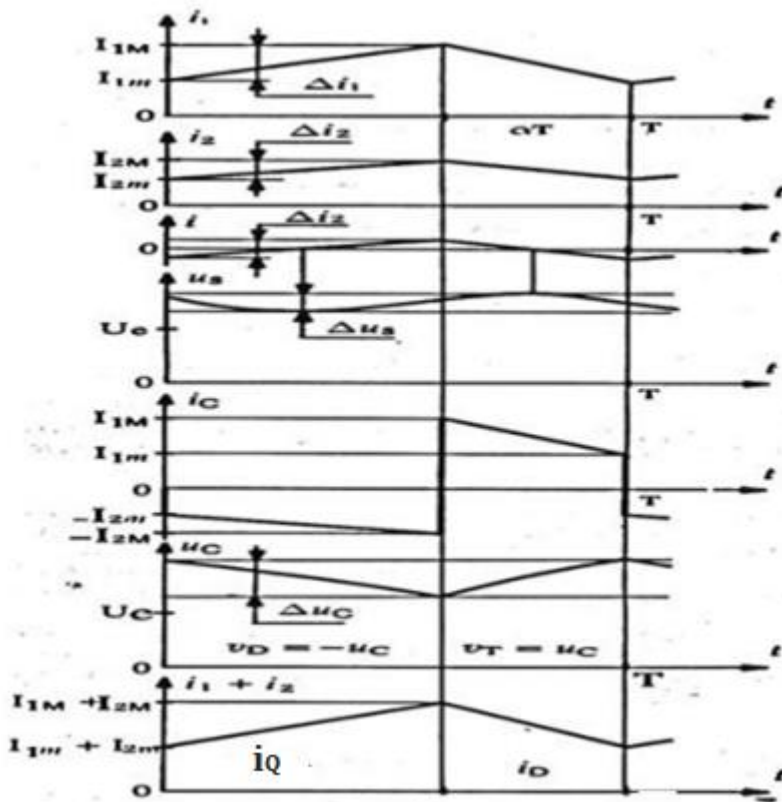


Figure (II-33) : Formes d'ondes des courants (A) et des tensions (V) [10]

**La valeur moyenne de tension de sortie :**

Les tensions moyennes aux bornes L1 et L2 sont nulles, donc :

$$U_{smoy} = \frac{1}{1-\alpha} U_e \tag{II-64}$$

**Relations entre les valeurs moyennes des courants :**

Relations entre les valeurs moyennes des courants La valeur moyenne du courant  $i$  dans la capacité  $C_s$  est nul : donc  $i_2$ , égal à  $(i + iR)$ , a la même valeur moyenne que  $iR$  :

$$I_2 = iR \tag{II-65}$$

La conservation de la puissance entre l'entrée et la sortie du convertisseur donne, puisqu'on néglige toutes les pertes dans celui-ci :

$$U_e \cdot I_1 = U_s \cdot I_R \tag{II-66}$$

D'où, compte tenu de (II-66) :

$$I_1 = \frac{U_s}{U_e} I_R = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_R = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_2 \tag{II-67}$$

**Ondulations de courants et de tensions :**

**Ondulation de courant  $\Delta i_1$  :**

$$\Delta i_1 = I_{1M} - I_{1m} = \frac{U_e}{L_1} \alpha T \quad (\text{II-68})$$

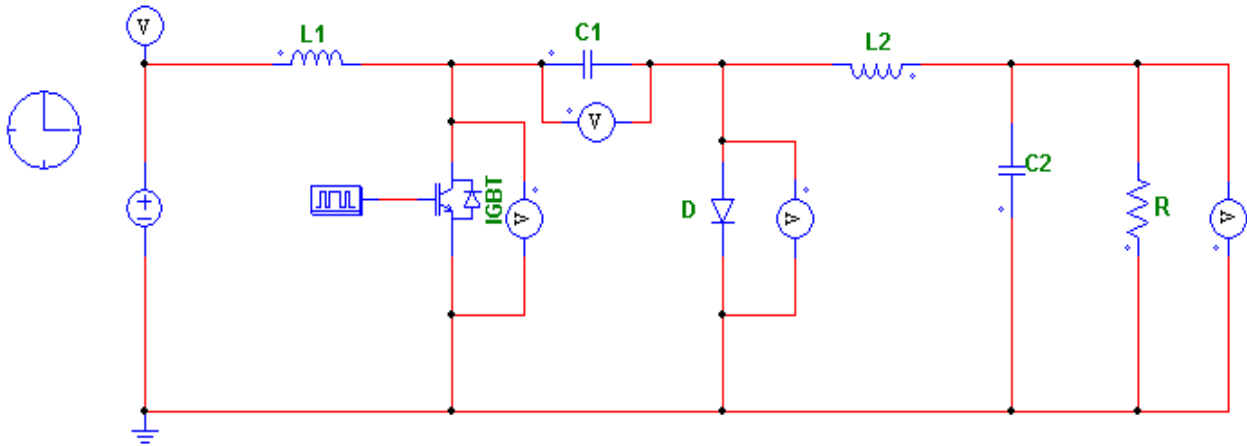
**Ondulation de courant  $\Delta i_2$**

$$\Delta i_2 = I_{2M} - I_{2m} = \frac{U_e}{L_2} \alpha T \quad [\text{10}] \quad (\text{II-69})$$

**II.7.2.2/ Simulation :**

**A- Hacheur a stockage capacitive avec charge R**

La figure (II-34) présente le schéma de simulation pour le Hacheur a stockage capacitive, réalisé sous Psim :



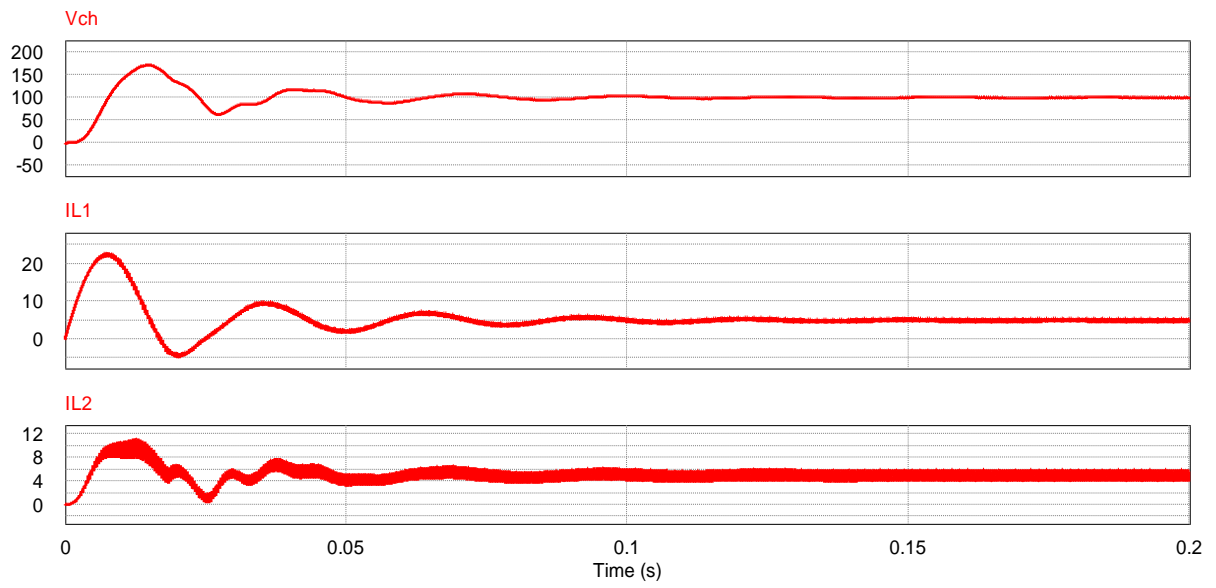
**Figure (II-34) :** montage hacheur à stockage capacitif avec charge R

Le montage que nous avons réalisé est à transistor IGBT

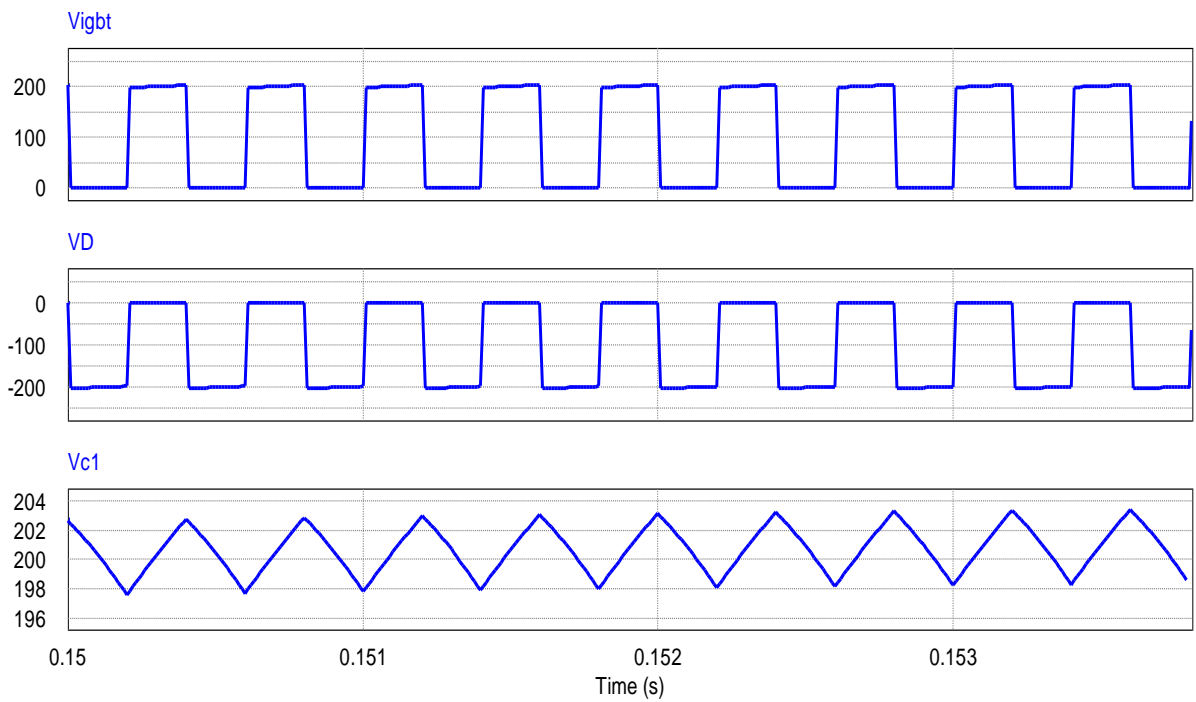
On a pris :  $V_s = 100$  ;  $L_1 = 0.02$  h ;  $L_2 = 0.01$  H ;  $I_{c1} = I_{c2} = 0.0002$  uF ;  $R = 20$   $\Omega$  ;

Fréquence = 2500 Hz et  $\alpha = 0.5$ .

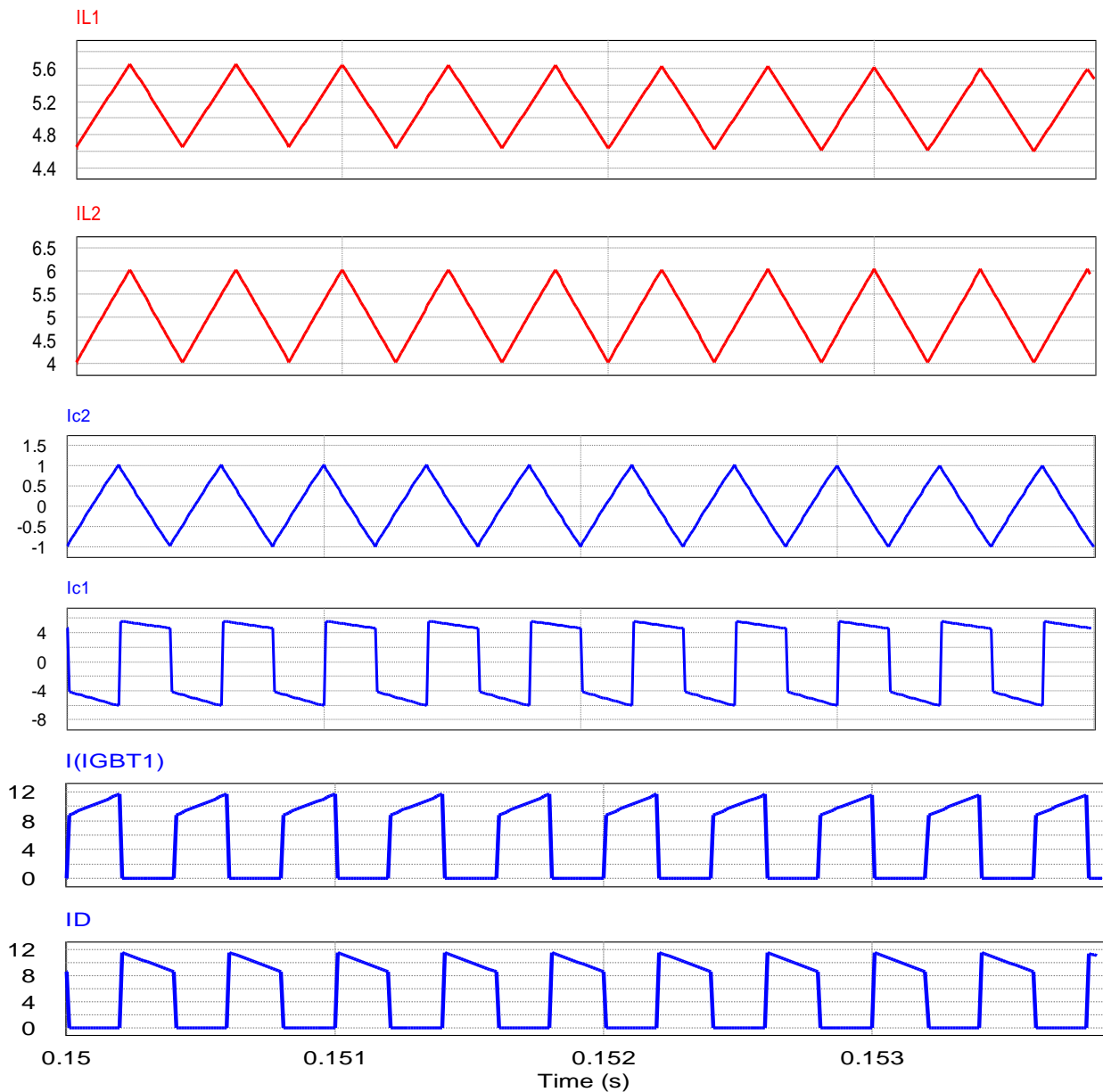
Finalement on a obtenu les résultats suivants :



**Figure (II-35) :** formes d’ondes des courants (IL1 et IL2) (A) et de tension Vch (V) dans le régime transitoire et permanent



**Figure (II-36) :** formes d’ondes des tensions (V) dans le régime permanent



**Figure (II-37) :** formes d'ondes des courants (A) dans le régime permanent

### Interprétation des résultats :

-les résultats de théoriques et ceux de la simulation sont identiques

- dans ce type d'hacheur on remarque des grandeurs qui atteignent leur régime permanent après un régime transitoire dû à l'effet résistif, inductif et capacitif du circuit, qui se traduit par un retard de réponse avant d'atteindre ce régime permanent

- Les deux inductances L1 et L2 sont utilisées pour convertir respectivement la source de tension d'entrée et la source de tension de sortie en sources de courant

-le condensateur C1 est utilisé pour transférer l'énergie entre la source de tension d'entrée et celle de sortie.

-Les courants  $I_{L1}$  et  $I_{L2}$  sont identiques, mais ils ne sont pas égaux en valeur

-Durant l'état passant, les courants  $I_{L1}$  et  $I_{L2}$  croît linéairement pour atteindre sa valeur maximale à la fin de la première période, Une fois l'interrupteur ouvert, les deux courants diminuent linéairement à leurs valeurs minimales, Cette augmentation et diminution constituent des ondulations.

- ces courants dans les bobines L1 et L2 moins ondulés puisque le régime de conduction est continu et qui dépend du choix des inductances et du rapport cyclique.

-les courants à travers les condensateurs C1 et C2 positifs et négatifs et qui varient selon que ces condensateurs se déchargent ou se chargent suivant l'état de l'interrupteur K

-les courants à travers les interrupteurs (IGBT et diode) presque constants, à l'état passant sont égales  $I_{L1} + I_{L2}$ , et nuls à l'état off

-les tensions aux bornes des condensateurs qui atteignent des valeurs presque constantes (faible ondulation) en régime permanent

## **II.8/ Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté de façon générale les différents types des hacheurs 'non isolé', puis nous avons dévolu à l'étude des hacheurs non réversible en mode conduction continue avec présenter la simulation de chaque type sous logiciel PSIM pour comparer ces résultats avec l'étude théorique.

Dans ce cas (Les hacheurs non réversibles), le transfert d'énergie s'effectue de la source vers la charge, selon la topologie mise en œuvre, l'on est capable :

- ✓ D'abaisser des niveaux de tension ou de courant continus,
- ✓ D'élever des niveaux de tension ou de courant continus,
- ✓ D'élever ou d'abaisser à choix des niveaux de tension ou de courant continus, selon la valeur du rapport cyclique choisi.



# Chapitre III

## Les hacheurs réversible

### III.1/ Introduction :

Les hacheurs réversibles sont des structures qui assurent une réversibilité en tension et/ou en courant. Ainsi, il est possible d'inverser le sens de parcours de l'énergie. Ainsi, une source peut devenir une charge et inversement. Ce type de comportement se rencontre usuellement dans les systèmes d'entraînement électrique. Ainsi, un moteur en sortie d'un hacheur représente une charge. Cependant, si on veut réaliser un freinage, le moteur va devenir une génératrice, ce qui va entraîner un renvoi d'énergie à la source (mieux qu'un simple freinage mécanique) [34].



Figure (III-01) : Synoptique d'un convertisseur DC-DC réversible

Dans ce chapitre nous allons analyser le fonctionnement des hacheurs à quatre quadrants avec les différentes possibilités pour ce fonctionnement.

### III.2/ Montages réversibles

#### III.2.1/ Hacheur deux quadrants réversible en courant :

Le hacheur réversible en courant est constitué par l'association d'un bloc hacheur série (T1, D2) et d'un bloc hacheur parallèle (T2, D1) qui autorise l'inversion du sens du courant mais pas du sens de la tension, les sources d'entrée et de sortie sont toujours de natures différentes [33].

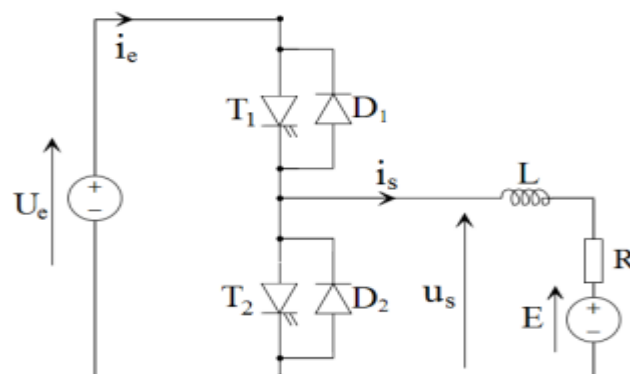


Figure (III-02) : schéma de base d'un hacheur réversible en courant [35]

La cellule est formée de deux composants. Le premier est un composant commandé à l'amorçage et au blocage (transistor, IGBT, GTO, ...) alors que le second est une diode. Ils sont montés en antiparallèle.

Le courant dans l'interrupteur peut être positif ou négatif. Il n'y aura plus de phénomène de conduction discontinue [35].

### III.2.1.1/ Fonctionnement du hacheur réversible en courant :

L'interrupteur T2 est commandé de façon complémentaire à T1. Si T1 et T2 étaient commandés en même temps, ils mettraient la source  $U_e$  en court-circuit, ce qui serait dangereux. Dans la pratique, comme un composant est en général plus rapide à la fermeture qu'à l'ouverture, on maintient un léger temps mort de quelques microsecondes entre l'arrêt de l'un et la mise en marche de l'autre [35].

Le Passage d'un mode de fonctionnement à l'autre se fait par deux modes de commandes : commande symétrique de T1 et T2 et commande alternée de T1 et T2.

#### ❖ Commande alternée :

Selon le signe du courant, on peut distinguer deux fonctionnements :

#### A) Fonctionnement en dévolteur :

Dans ce cas l'interrupteur K2 est constamment ouvert et on commande K1, la diode D2 joue le rôle d'une diode de roue libre, il s'agit d'un signe positif de la valeur moyenne du courant  $i_s$ , la source fournie plus [35].

#### • Equations du circuit :

En négligeant R, nous avons :

- Pour  $0 \leq t < \alpha T$  : T1 fermé et D2 bloqué.

$$U_s = U_e = L \frac{di_s}{dt} + E \quad (\text{III-01})$$

$$i_e = i_s \quad (\text{III-02})$$

$$i_s(t) = \frac{U_e - E}{L} t + I_{smin} , \text{ avec : } I_{smin} = I_s(t = 0) \quad (\text{III-03})$$

Donc, le courant se croît linéairement.

- Pour  $\alpha T \leq t < T$  : T1 ouvert et D2 passant (phase de roue libre).

$$U_s = 0 = L \frac{di_s}{dt} + E \quad (\text{III-04})$$

$$i_e = 0 \quad (\text{III-05})$$

$$i_s(t) = \frac{-E}{L} (t - \alpha T) + I_{smax} , \text{ avec : } I_{smax} = I_s(t = \alpha T) \quad (\text{III-06})$$

Donc, le courant se décroît linéairement.

- **Valeur moyenne de  $U_s$  :**

$$U_{smoy} = \frac{1}{T} \int_0^T U_s(t) dt = \frac{1}{T} (U_e \times \alpha T) = \alpha U_e \quad (\text{III-07})$$

On remarque que la valeur moyenne de  $U_s$  est positive quel que soit la valeur de  $\alpha$ .

- **Ondulation de courant  $\Delta i_s$  :**

On a :

$$i_s(t) = \frac{(1-\alpha)U_e}{L} t + I_{smin} \quad (\text{III-08})$$

Donc :

$$\Delta i_s = \frac{(1-\alpha)U_e}{L} \alpha T = \frac{\alpha(1-\alpha)U_e}{L f} \quad (\text{III-09})$$

On remarque que cette ondulation est inversement proportionnelle à la valeur de l'inductance, ainsi qu'à la valeur de la fréquence de hachage. Elle est nulle lorsque  $\alpha$  vaut 0 ou 1, et elle est maximale lorsque  $\alpha = 0.5$  et vaut :

$$\Delta i_{smax} = \frac{U_e}{4L f} \quad [35] \quad (\text{III-10})$$

### B) Fonctionnement en survolteur :

Dans ce cas l'interrupteur T1 est constamment ouvert et on commande T2, la diode D1 joue le rôle d'une diode de récupération, il s'agit d'un signe négatif de la valeur moyenne du courant  $i_s$ , donc la source continue E est génératrice de l'énergie [35].

- **Equations du circuit :**

- **Pour  $0 \leq t < \alpha T$  :** T2 fermé et D1 bloqué

$$U_s = 0 = L \frac{di_s}{dt} + E \quad (\text{III-11})$$

$$i_s(t) = \frac{-E}{L} t - I_{smin}, \text{ avec : } I_s(t = 0) = -I_{smin} \quad (\text{III-12})$$

Donc le courant se décroît linéairement.

- **Pour  $\alpha T \leq t < T$  :** T2 ouvert et D1 passant

$$U_s = U_e = L \frac{di_s}{dt} + E \quad (\text{III-13})$$

$$i_e = i_s \quad (\text{III-14})$$

$$i_s(t) = \frac{U_e - E}{L} (t - \alpha T) - I_{smax}, \text{ avec : } I_s(t = \alpha T) = -I_{smax} \quad (\text{III-15})$$

Donc le courant se croît linéairement.

• Valeur moyenne de  $U_s$  :

$$U_{smoy} = \frac{1}{T} \int_0^T U_s(t) dt = \frac{1}{T} (T U_e - \alpha T U_e) = (1 - \alpha) U_e \tag{III-16}$$

On remarque que la valeur moyenne de  $U_s$  est positive quel que soit la valeur de  $\alpha$ .

C'est le courant qui change de signe, donc on obtient les deux quadrants pour ce convertisseur :

Quadrant 1 :  $i_{smoy} > 0$  ou  $\Gamma > 0$  et  $U_{smoy} > 0$  ou  $\Omega > 0$

Quadrant 4 :  $i_{smoy} < 0$  ou  $\Gamma < 0$  et  $U_{smoy} > 0$  ou  $\Omega > 0$

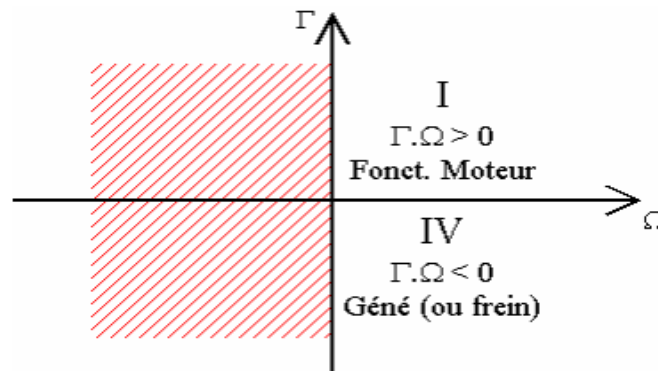


Figure (III-03) : Quadrants de fonctionnement [36]

• Ondulation de courant  $\Delta i_s$  :

Comme précédemment :

$$\Delta i_s = \frac{(1-\alpha)U_e}{L} \alpha T = \frac{\alpha(1-\alpha)U_e}{L f} \tag{III-17}$$

• Formes d'ondes

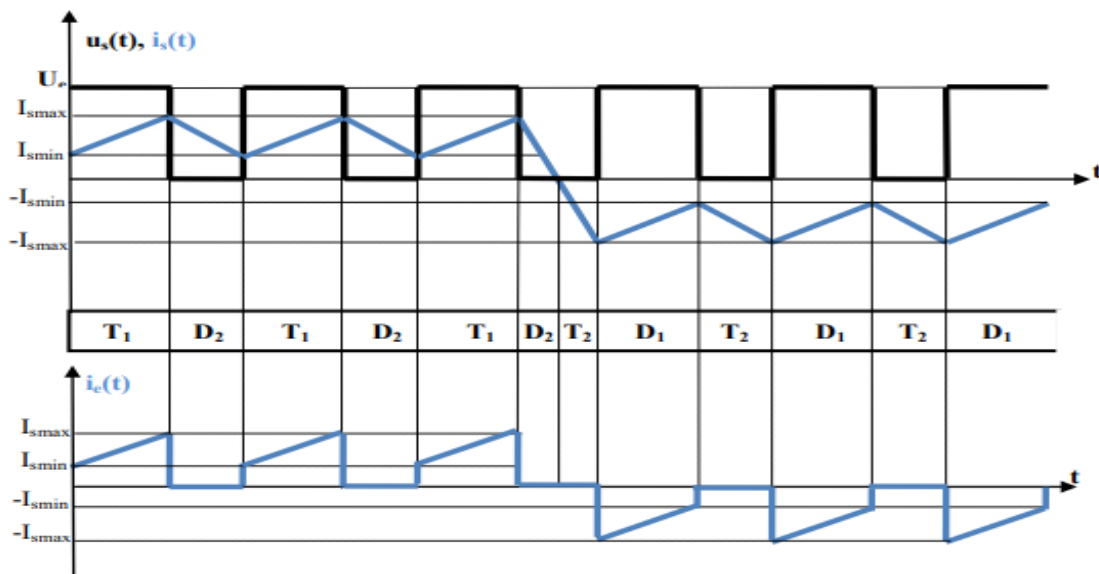


Figure (III-04) : Formes d'ondes des courants (A) et des tensions (V) [35]

❖ **Commande symétrique :**

Le transistor T1 est commandé de 0 à  $\alpha T$  et T2 est commandé de  $\alpha T$  à T. On passe alors d'un mode de fonctionnement à l'autre de façon automatique. Si la source fournit plus d'énergie électrique que la charge qui accumule d'énergie cinétique alors le montage fonctionne en hacheur série et T1 et D2 assure la conduction du courant. Si la source fournit moins d'énergie électrique que la charge qui a accumulée d'énergie cinétique alors le montage fonctionne en hacheur parallèle et T2 et D1 assure la conduction du courant [37].

Dans ce cas, La valeur moyenne de la tension de sortie est la même lorsque le courant  $i_s$  est positif ou négatif : [37]

$$U_{smoy} = \alpha U_e \quad (III-18)$$

L'application typique de ce type de hacheur est le freinage avec récupération d'une machine à courant continu. Pour le même sens de rotation, nous avons :

- un fonctionnement moteur pour un courant positif.

- un fonctionnement en récupération pour un courant négatif. Dans ce cas, la source doit être capable d'accepter l'énergie récupérée. La traction électrique est un exemple significatif de cette réversibilité, obtenu lors des phases de décélération ou en descente [35].

**III.2.1.2/ Simulation :****A) Hacheur réversible en courant**

La figure (III-05) présente le schéma de simulation pour le Hacheur réversible en courant, réalisé sous Psim :

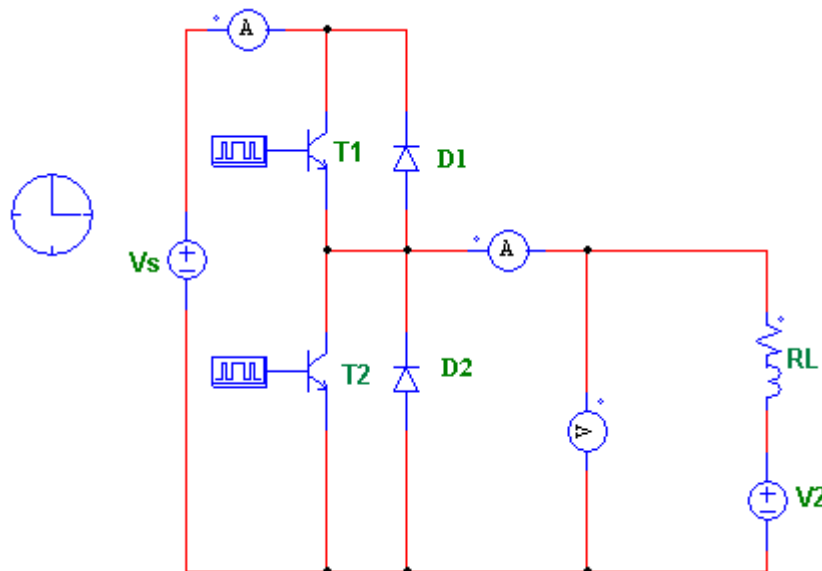


Figure (III-05) : montage hacheur réversible en courant

Le montage que nous avons réalisé est à transistor npn et On a fait une commande symétrique de T1 et T2 que : Le transistor T1 est commandé de 0 à  $\alpha T$  et T2 est commandé de  $\alpha T$  à T

On a pris :  $V_s = 100 \text{ V}$ ,  $L = 0.02 \text{ H}$ ,  $R = 12 \ \Omega$ , fréquence = 2500 Hz,  $\alpha = 0.75$

Pour passer d'un fonctionnement dévolteur à un fonctionnement survolteur, il suffit de varier la valeur de la f.c.é.m ( $V_2$ ).

➤ **Pour  $V_{ch}$  positive et  $i_{ch}$  positif ( $V_{ch} > 0$  et  $i_{ch} > 0$ ) :**

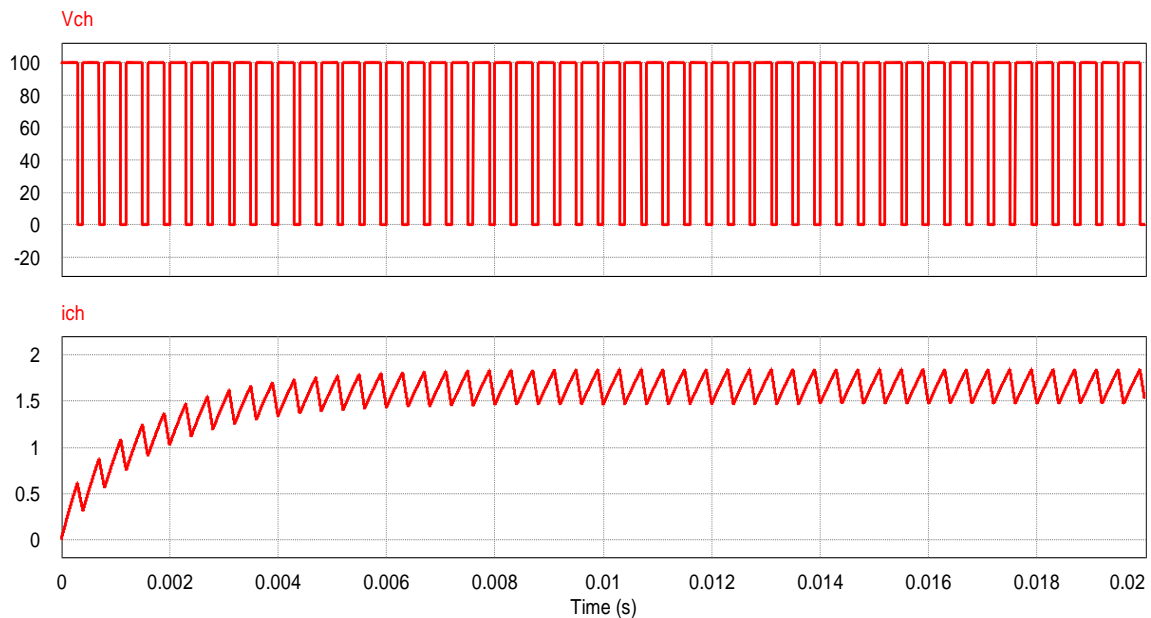
$V_2 = 55 \text{ V}$

Remarque :

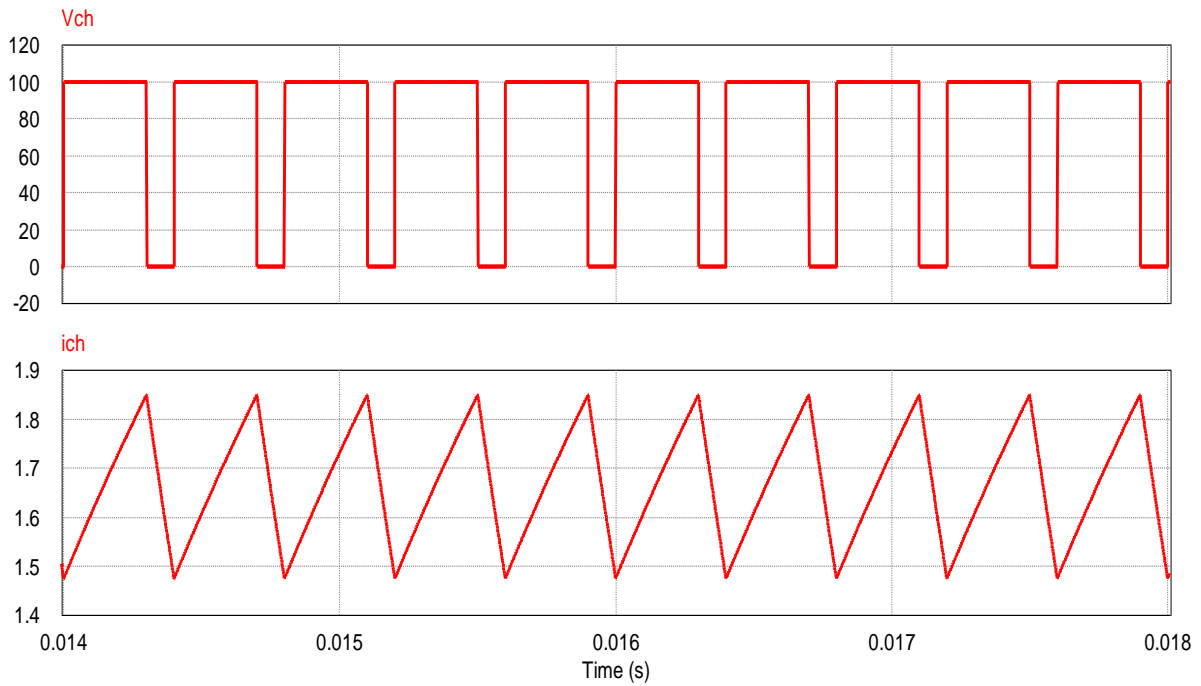
' $V_{ch}$ ' représente la tension aux bornes de la charge.

' $i_{ch}$ ' représente le courant de la charge.

' $V_s$ ' représente la tension d'entrée.



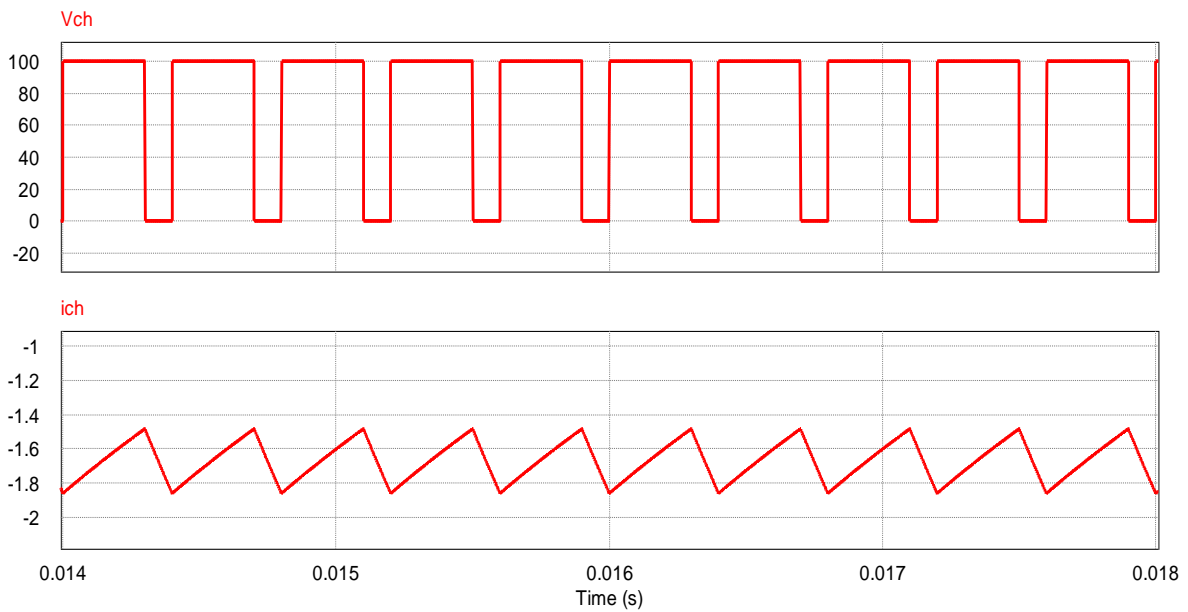
**Figure (III-06) :** formes d'ondes du courant  $i_{ch}$  (A) et de la tension  $V_{ch}$  (V) dans le régime transitoire et permanent



**Figure (III-07) :** formes d’ondes du courant  $i_{ch}$  (A) et de la tension  $V_{ch}$  (V) dans le régime permanent

➤ Pour  $V_{ch}$  positive et  $i_{ch}$  négatif ( $V_{ch} > 0$  et  $i_{ch} < 0$ ) :

$V_2 = 95$  V



**Figure (III-08) :** formes d’ondes du courant  $i_{ch}$  (A) et de la tension  $V_{ch}$  (V) dans le régime permanent



**• Interprétation les résultats :**

- Les résultats de simulation (figures III-6, III-7 et III-8) montrent que les formes d'ondes  $V_{ch}$  et  $i_{ch}$  obtenues pour la commande symétrique sont pareils avec celles données en étude théorique.

- La tension aux bornes de la charge du hacheur réversible en courant, dans le cas de la commande symétrique, prend  $+V_s$  ou 0 et sa valeur moyenne est la même lorsque le courant  $i_{ch}$  est positif ou négatif et elle s'obtient de la même façon que pour le hacheur série :

$$V_{chmoy} = \alpha V_s \quad (III-19)$$

- On note que le courant dans la charge possède deux régimes transitoire et permanent.

- Dans le cas d'une machine à courant continu, la figure (III-07) représente les allures de la tension et du courant lorsque la machine fonctionne dans le quadrant 1 ( $V_{ch} > 0$  et  $i_{ch} > 0$ ), il y'a un transfert d'énergie de la source vers la charge et la figure (III-08) représente les allures de la tension et du courant lorsque la machine fonctionne dans le quadrant 4 ( $V_{ch} > 0$  et  $i_{ch} < 0$ ), qui débite dans la source, permettant ainsi la récupération d'énergie lors du freinage.

- l'ondulation du courant est inversement proportionnelle à la valeur de l'inductance, ainsi qu'à la valeur de la fréquence de hachage, par conséquent elle varie entre 2.5 A et 3.5 A.

III.2.2/ Hacheur deux quadrants réversible en tension :

La tension appliquée à la charge peut prendre les valeurs positives (+Ue) ou négatives (-Ue), 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 bidirectionnels [35].

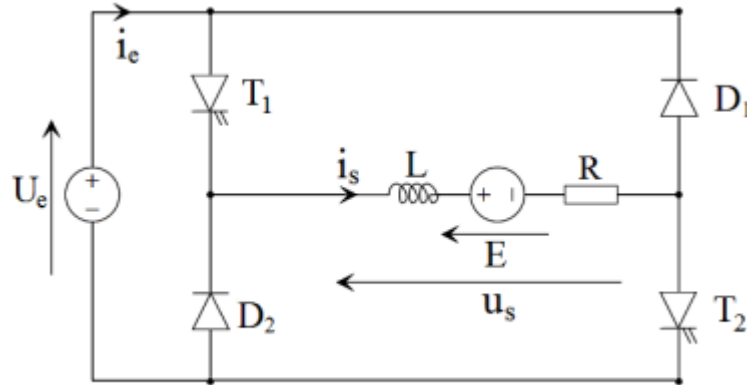


Figure (III-09) : Structure du hacheur réversible en tension [35]

III.2.2.1/ Fonctionnement du hacheur réversible en tension :

Le Passage d'un mode de fonctionnement à l'autre se fait par deux modes de commandes : commande symétrique de T1 et T2 et commande alternée de T1 et T2.

❖ **Commande symétrique de T1 et T2 (+Ue, - Ue) :**

Les interrupteurs T1 et T2 sont commandés simultanément. De  $t = 0$  à  $t = \alpha T$ , ils sont fermés et le reste de la période, ils sont ouverts, c'est-à-dire nous avons deux phases [35]:

**A) Equations du circuit :**

- **Pour  $0 \leq t < \alpha T$  :** T1 et T2 fermés, D1 et D2 bloqués.

On obtient les équations suivantes :

$$U_s = U_e, i_e = i_s \tag{III-20}$$

En négligeant la résistance R :

$$U_e = L \frac{di_s}{dt} + E \tag{III-21}$$

$$i_s(t) = \frac{U_e - E}{L} t + I_{smin}, \text{ avec : } I_{smin} = i_s(t = 0) \tag{III-22}$$

Donc le courant se croît linéairement et la bobine L emmagasine de l'énergie électromagnétique.

• Pour  $\alpha T \leq t < T$  :

T1 et T2 sont ouverts, les deux diodes D1 et D2 doivent obligatoirement être passantes, car on doit évacuer l'énergie magnétique emmagasinée dans l'inductance L. On obtient les équations suivantes [35]:

$$U_s = -U_e, i_e = -i_s \tag{III-23}$$

En négligeant la résistance R.

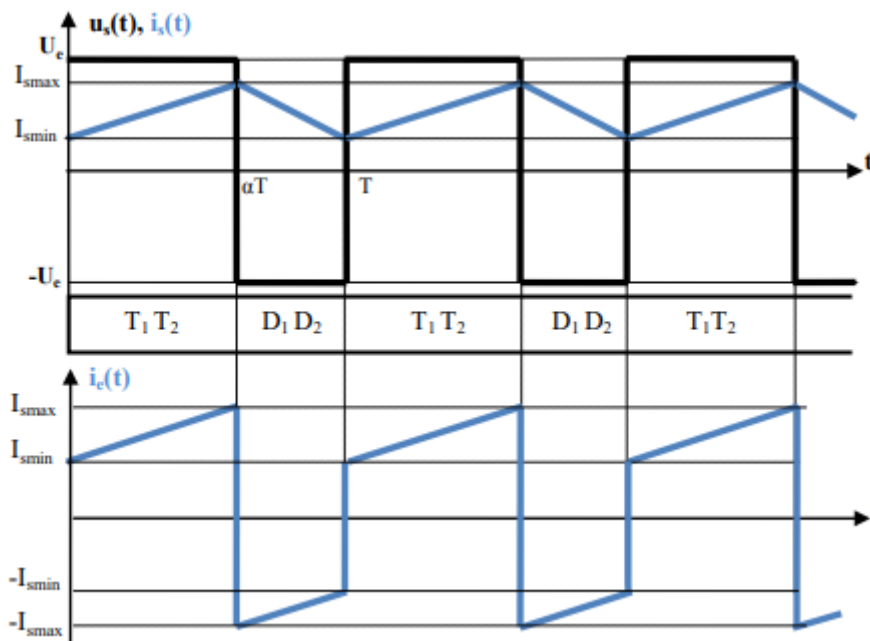
$$-U_e = L \frac{di_s}{dt} + E \tag{III-24}$$

$$i_s(t) = \frac{-(U_e+E)}{L} (t - \alpha T) + I_{smax} \text{ avec : } I_{smax} = i_s(t = \alpha T) \tag{III-25}$$

Donc le courant se décroît linéairement.

**B) Formes d'ondes :**

La figure (III-10) représente les différentes allures de ce mode de fonctionnement.



**Figure (III-10) :** Formes d'ondes des courants (A) et des tensions (V) : Commande symétrique [35]

• Valeur moyenne de  $u_s$  :

$$U_{smoy} = \frac{1}{T} \int_0^T U_s(t) dt = (2\alpha - 1)U_e \tag{III-26}$$

Si  $0.5 < \alpha < 1 \rightarrow U_{smoy} > 0$  : la machine fonctionne en moteur.

Si  $0 < \alpha < 0.5 \rightarrow U_{smoy} < 0$  : la machine fonctionne en génératrice (freinage par récupération).

Avec le courant is toujours positif. Donc, on obtient les deux quadrants pour ce convertisseur :  $I_{smoy} > 0$  et  $U_{smoy} < 0$  ou  $U_{smoy} > 0$

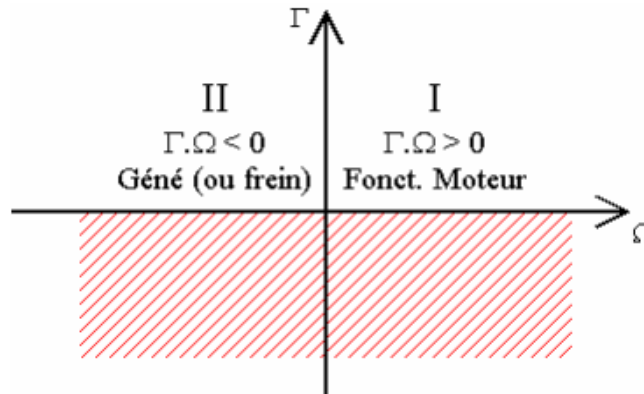


Figure (III-11) : Quadrants de fonctionnement [36]

• **Ondulation de courant Δis :**

On a :

$$i_s(t) = \frac{2(1-\alpha)U_e}{L}t + I_{smin} \tag{III-27}$$

Donc :

$$\Delta i_s = \frac{2(1-\alpha)U_e}{L} \alpha T = \frac{2\alpha(1-\alpha)U_e}{L_f} \tag{III-28}$$

L'ondulation de courant dans la charge est donc inversement proportionnelle à la valeur de l'inductance L, ainsi qu'à la valeur de la fréquence de hachage, elle est nulle lorsque α vaut 0 ou 1 et elle est maximale lorsque α = 0.5 et vaut :

$$\Delta i_{smax} = \frac{U_e}{4L_f} \tag{III-29}$$

❖ **Commandes alternées de T1 et T2 : (+Ue, 0, - Ue) :**

• **En hacheur série :**

**De 0 ≤ t < αT :** T1 et T2 sont fermés D1 et D2 sont bloquées :

$$\text{Alors : } U_s = U_e \text{ et } I_s = I_e \tag{III-30}$$

**De αT ≤ t < T :** on ouvre T1 et T2 reste fermé donc T2 et D1 conduits, T1 et D2 sont bloqués

$$\text{Alors : } U_s = 0 \text{ et } I_s = I_{D1} \tag{III-31}$$

Dans ce cas le transfert d'énergie s'effectue de la source vers la charge (fonctionnement moteur)

• **En hacheur parallèle :**

**De 0 ≤ t < αT :** D1 et D2 sont fermés, T1 et T2 sont bloquées :

Alors :  $U_s = -U_e$  et  $I_s = -I_e$  (III-32)

De  $\alpha T \leq t < T$  : D1 se bloque, T1 et D2 conduits

Alors :  $U_s = 0$  et  $I_s = I_{D2}$  (III-33)

Ce type de hacheur est utilisé pour l'entraînement d'une machine à courant continu dans un sens de rotation pour le fonctionnement en moteur avec freinage par récupération dans l'autre sens de rotation, pour le fonctionnement en génératrice [35].

Exemple : ascenseur, treuil électrique, levage, on peut aussi parler du pompage-turbinage de l'eau pour le stockage de l'électricité [36].

### III.2.2.2/ Simulation :

#### A) Hacheur réversible en tension

La figure (III-12) présente le schéma de simulation pour le Hacheur réversible en tension, réalisé sous Psim :

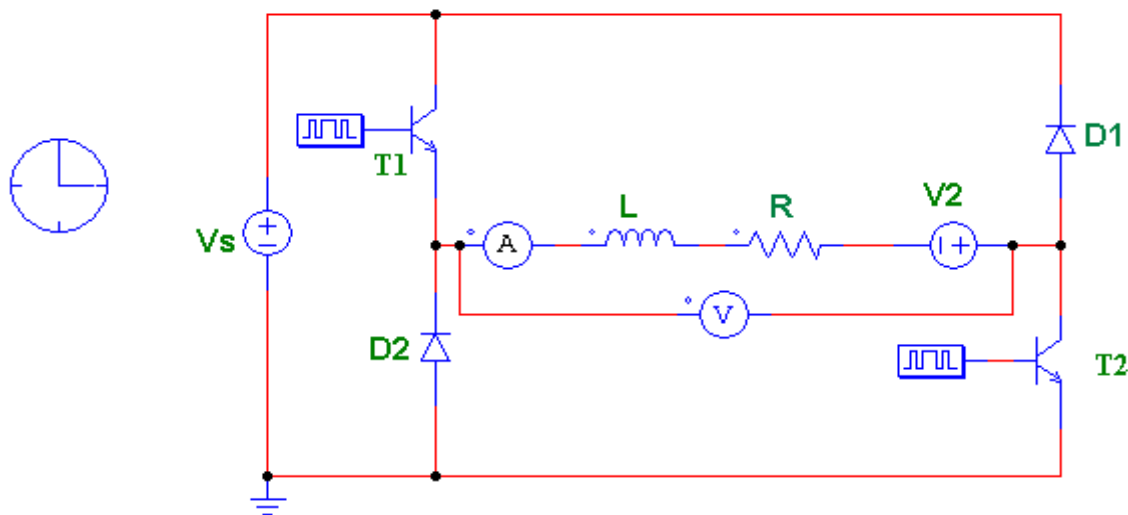


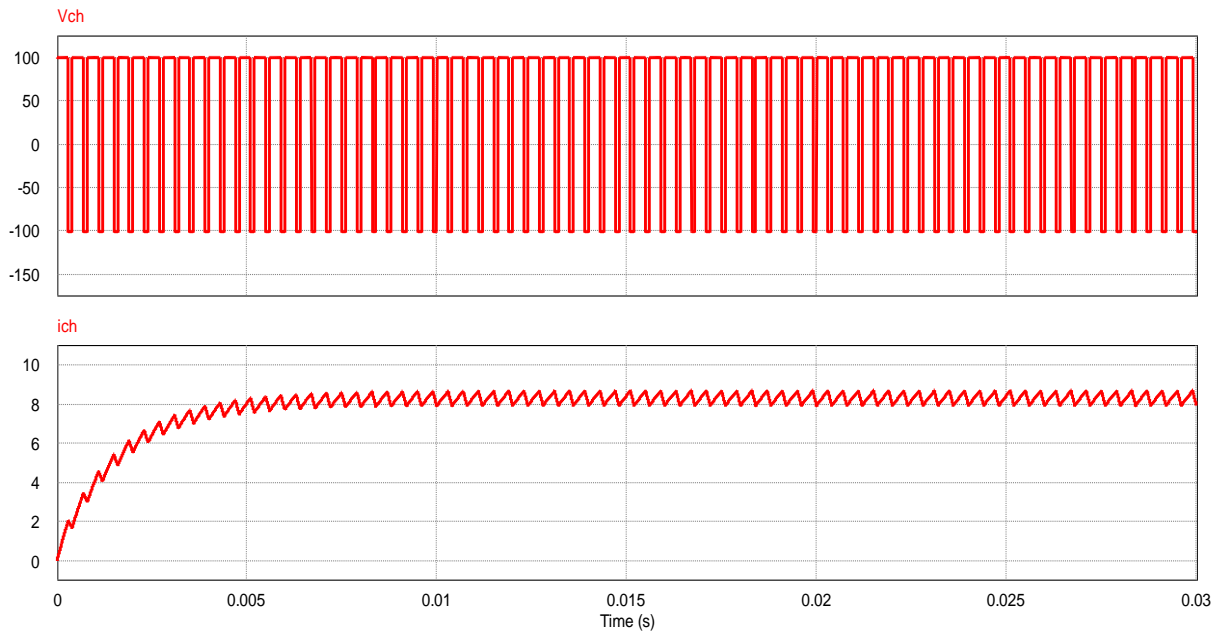
Figure (III-12) : montage hacheur réversible en tension

Le montage que nous avons réalisé est à transistor npn et On a fait une commande symétrique de T1 et T2 qu'ils sont commandés simultanément de 0 à  $\alpha T$ .

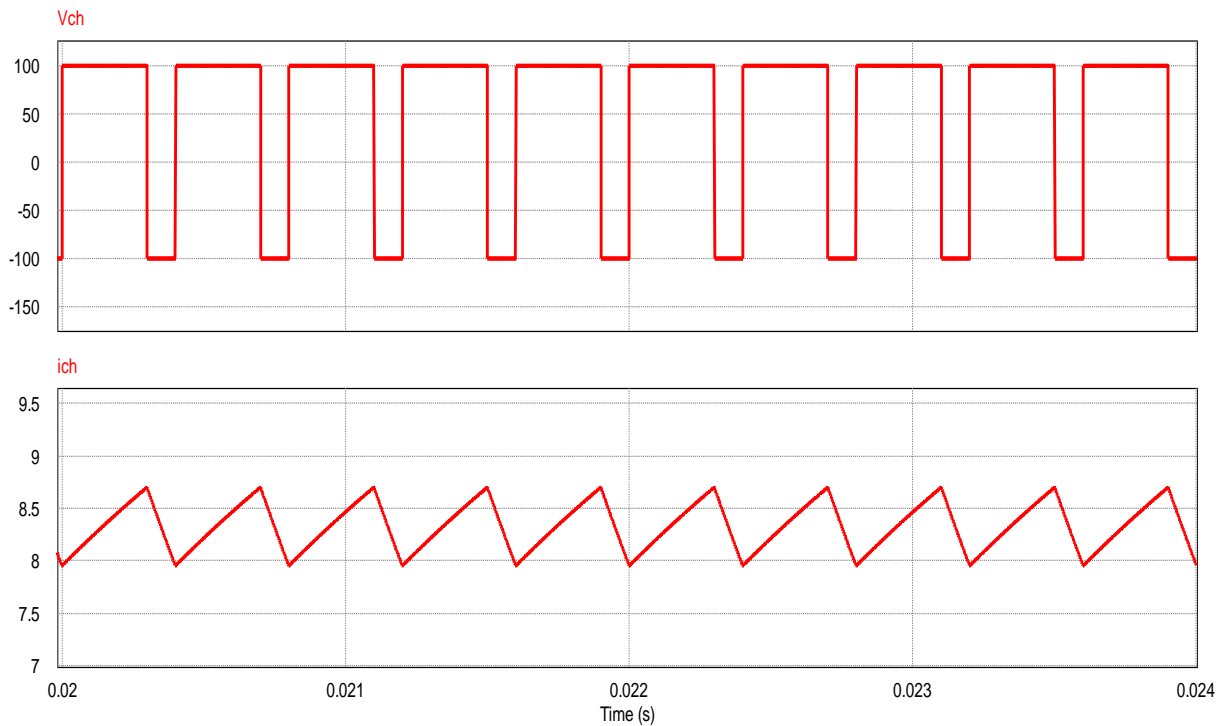
On a pris :  $L = 0.02$  H,  $R = 12 \Omega$ , fréquence = 2500 Hz,  $V_s = 100$  V

➤ Pour  $V_{ch}$  positive et  $i_{ch}$  positif ( $V_{ch} > 0$  et  $i_{ch} > 0$ ) :

$V_2 = 50\text{ V}$  et  $\alpha = 0.75$ .



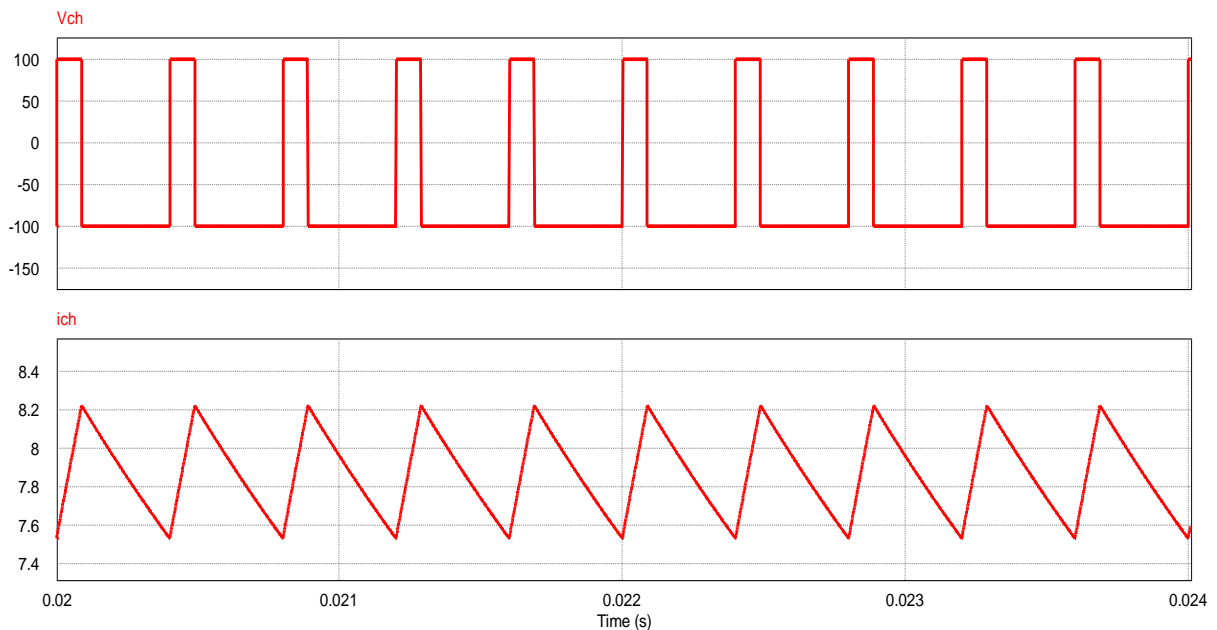
**Figure (III-13) :** formes d’ondes du courant  $i_{ch}$  (A) et de la tension  $V_{ch}$  (V) dans le régime transitoire et permanent



**Figure (III-14) :** formes d’ondes du courant  $i_{ch}$  (A) et de la tension  $V_{ch}$  (V) dans le régime permanent

➤ Pour  $V_{ch}$  négative et  $i_{ch}$  positif ( $V_{ch} < 0$  et  $i_{ch} > 0$ ) :

On prend  $V_2 = 150$  V et  $\alpha = 0.22$



**Figure (III-15) :** formes d'ondes du courant  $i_{ch}$  (A) et de la tension  $V_{ch}$  (V) dans le régime permanent

• **Interprétation les résultats :**

- Les résultats de simulation montrent clairement que les formes d'ondes  $V_{ch}$  et  $i_{ch}$  que nous avons obtenu pour la commande symétrique sont pareils avec celles de l'étude théorique (figure III-10).

- le courant de la charge reste toujours positif dans tous les cas, car les interrupteurs ne sont pas bidirectionnels, alors le changement du sens de parcours de l'énergie est lié au changement de signe de la tension  $V_{ch}$ . Il possède deux régimes transitoire et permanent.

- La tension aux bornes de la charge du hacheur réversible en tension, dans le cas de la commande symétrique, prend  $+V_s$  ou  $-V_s$  et sa valeur moyenne est donnée par :

$$V_{chmoy} = (2\alpha - 1)V_s \quad (III-34)$$

Pour le premier cas ( $\alpha = 0.75 > 0.5$ )  $\rightarrow V_{ch} = 50$  V  $> 0$  alors la machine fonctionne dans le quadrant 1, ce qui nous montre la figure (III-14).

Pour le deuxième cas ( $\alpha = 0.22 < 0.5$ )  $\rightarrow V_{ch} = -56$  V  $< 0$  alors la machine fonctionne dans le quadrants 2 ce qui nous montre la figure (III-15).

- l'ondulation du courant  $i_{ch}$  vaut 0.4 A, elle est inversement proportionnelle à la valeur de l'inductance, ainsi qu'à la valeur de la fréquence de hachage de charge comme précédemment.

III.2.3/ Hacheur quatre quadrants (réversible en tension et en courant)

On reprend la structure du 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 (Fig.III-16) [35].

Alors, le hacheur réversible en courant et en tension, appelé aussi hacheur en pont ou hacheur quatre quadrants (4Q) qui assure non seulement la réversibilité en courant, mais également la réversibilité en tension, dans ce cas on trouve deux configurations possibles : [35]

–  $U_s$  et  $i_s$  sont de signes identiques, le convertisseur doit donc permettre le fonctionnement dans les quadrants 1 et 3 (Fig. III-17).

–  $U_s$  et  $i_s$  sont de signes opposés, le convertisseur doit donc permettre le fonctionnement dans les quadrants 2 et 4 (Fig. III-17) [35].

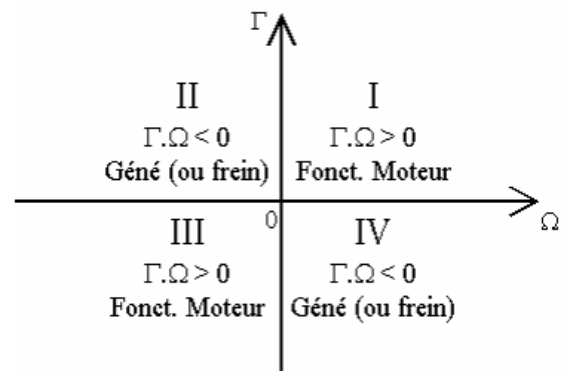
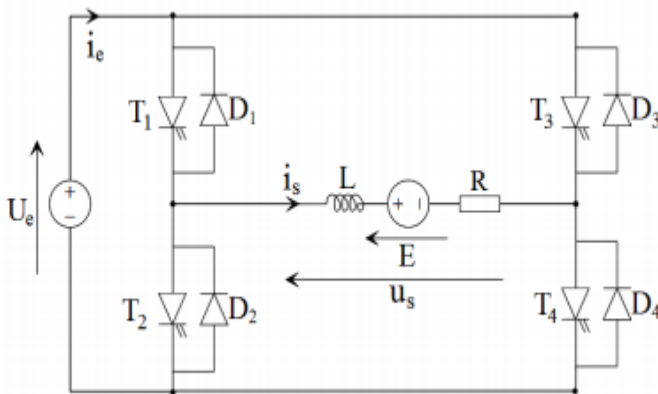


Figure (III-16) : Structure du hacheur 4 quadrants [35] Figure (III-17) : les 4 Quadrants [36]

Ce type de hacheur est souvent employé pour l’entraînement d’une machine à courant continu dans les deux sens de rotation avec freinage par récupération (domaine de la traction électrique à courant continu).

III.2.3.1/ Fonctionnement en modulation +Ue/-Ue (commande symétrique) :

Cette modulation connue par la commande continue selon une séquence de commutation symétrique des interrupteurs, dans ce cas on procède :

A chaque période  $T$ , on commande la fermeture de  $T1$  et  $T4$  pendant  $\alpha T$ .

On commande la fermeture de  $T2$  et  $T3$  pendant le reste de la période

• Pour  $0 \leq t < \alpha T$  : On commande la fermeture de  $T1$  et  $T4$ , donc  $U_{smoy} > 0$

Si  $i_{smoy} > 0$ , dans ce cas le courant  $i_s$  passe par  $T1$  et  $T4$ .

On trouve :

$$U_s = U_e ; i_e = i_s \tag{III-35}$$



Avec :

$$U_s = R i_s + V_L + E \quad (\text{III-36})$$

En négligeant la résistance R,

$$i_s(t) = \frac{U_e - E}{L} t + I_{smin} \quad (\text{III-37})$$

Donc le courant se croît linéairement.

- Si  $i_{smoy} < 0$ , dans ce cas le courant  $i_s$  passe par D1 et D4.

$$i_s(t) = \frac{U_e - E}{L} t - I_{smin} \quad (\text{III-38})$$

Donc le courant se croît linéairement.

• **Pour  $\alpha T \leq t < T$** : On commande la fermeture de T2 et T3, donc  $U_{smoy} < 0$ .

- Si  $i_{smoy} > 0$ , dans ce cas le courant  $i_s$  passe par D2 et D3

$$U_s = -U_e ; i_e = i_s \quad (\text{III-39})$$

$$i_s(t) = \frac{U_e - E}{L} (t - \alpha T) + I_{smax} , \text{ avec : } i_{smax} = i_s(t = \alpha T) \quad (\text{III-40})$$

Le courant se décroît linéairement.

- Si  $i_{smoy} < 0$ , dans ce cas le courant  $i_s$  passe par T2 et T3.

On trouve:

$$U_s = -U_e ; i_e = -i_s \quad (\text{III-41})$$

$$i_s(t) = \frac{U_e - E}{L} (t - \alpha T) - I_{smax} , \text{ avec : } -i_{smax} = i_s(t = \alpha T) \quad (\text{III-42})$$

Le courant se décroît linéairement.

### B) Formes d'ondes :

La figure (III-18) représente les formes d'ondes des grandeurs  $u_s(t)$  et  $i_s(t)$  pour le

Fonctionnement en modulation  $+U_e/-U_e$  :

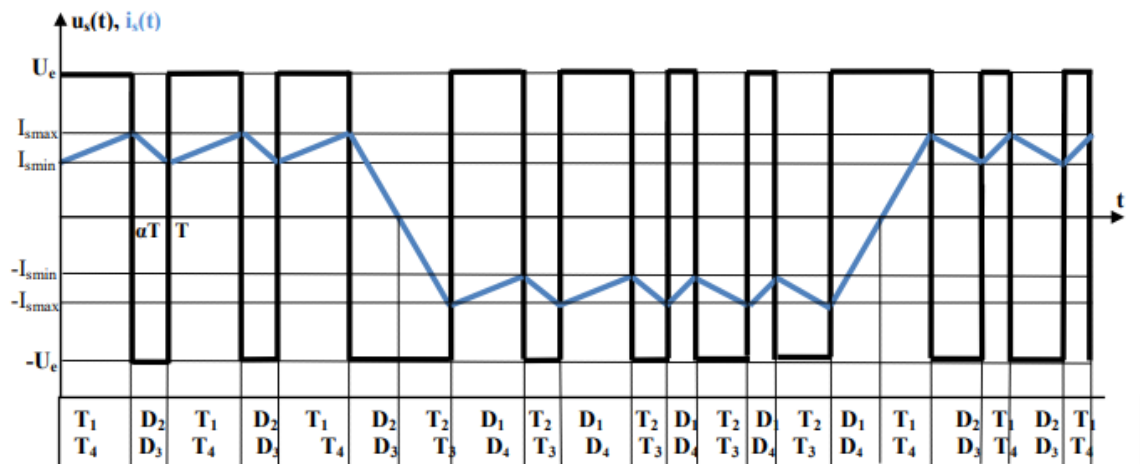


Figure (III-18) : Formes d'ondes des tensions (V) et des courants (A) [35]

### III.2.3.2/ Fonctionnement en modulation $+U_e/0/-U_e$ (commande alternée) :

Cette modulation connue aussi par la commande séquentielle selon une séquence de commutation circulaire des interrupteurs. Dans ce cas, on ne fait travailler que deux interrupteurs au cours d'une période  $T$  de fonctionnement du hacheur :

- L'un fermé en permanence, joue le rôle d'interrupteur d'aiguillage.
- L'autre, fermé et ouvert à la fréquence de fonctionnement du hacheur, assure le hachage [35].

#### A) Quadrants de fonctionnement :

**a) Quadrant 1** ( $U_{smoy} > 0$ ,  $I_{smoy} > 0$ ) Dans ce cas la tension de sortie est positive, donc on peut par exemple commander en permanence la fermeture de T4. Le courant est positif (fonctionnement moteur) et on hache par T1.

**b) Quadrant 2** ( $U_{smoy} > 0$ ,  $I_{smoy} < 0$ ) Pour une tension de sortie positive, et un courant négatif (fonctionnement en génératrice), on hache par T2 :

**c) Quadrant 3** ( $U_{smoy} < 0$ ,  $I_{smoy} < 0$ ) La tension de sortie est négative, donc on commande en permanence la fermeture de T3. Le courant est négatif (fonctionnement moteur), on hache par T2.

**d) Quadrant 4** ( $U_{smoy} < 0$ ,  $I_{smoy} > 0$ ) Pour une tension de sortie négative et un courant positif (fonctionnement génératrice), on hache par T1 [35].

#### B) Formes d'ondes :

La figure (III-19) représente les formes d'ondes des grandeurs  $u_s(t)$  et  $i_s(t)$  pour le Fonctionnement en modulation  $+U_e/0/-U_e$  :

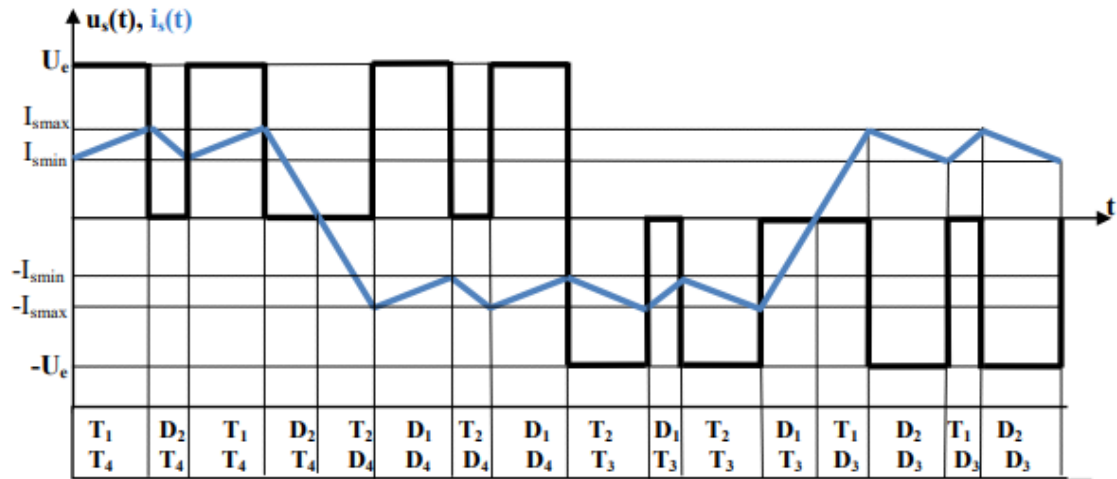


Figure (III-19) : Formes d’ondes des tensions (V) et des courants (A) [35]

III.2.3.3/ Simulation :

A) Hacheur quatre quadrants

La figure (III-20) présente le schéma de simulation pour le Hacheur quatre quadrant, réalisé sous Psim :

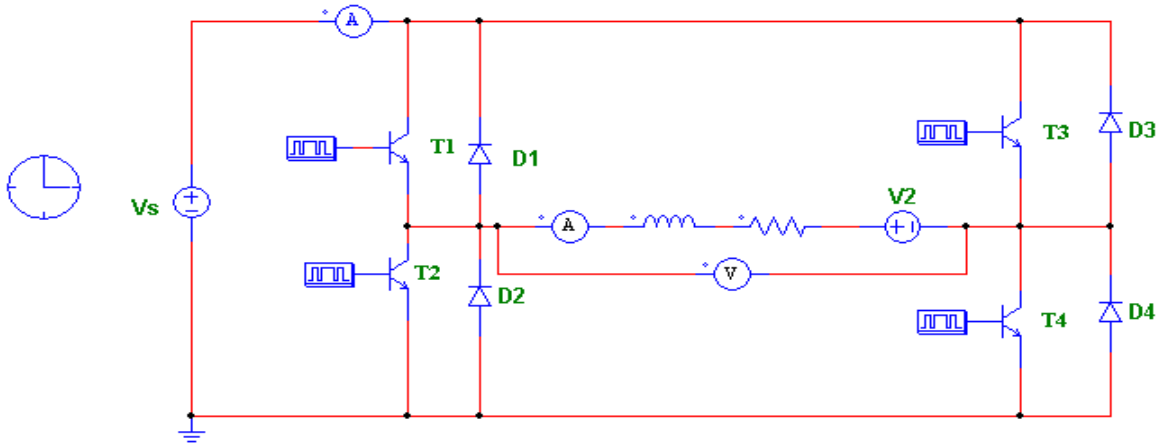


Figure (III-20) : montage hacheur quatre quadrants réversible en tension et en courant

Le montage que nous avons réalisé est à transistor npn, la commande est symétrique :

T1 et T4 sont commandés de 0 à  $\alpha T$  et T2 et T3 sont commandés de  $\alpha T$  à T

On a pris :  $L=0.04$  H,  $R=20$   $\Omega$ , la fréquence = 1000 Hz,  $V_s = 150$  V

➤ Pour  $V_{ch}$  positive et  $i_{ch}$  positif ( $V_{ch} > 0$  et  $i_{ch} > 0$ ) :  $\alpha = 0.75$ ,  $V_2 = 10$  V

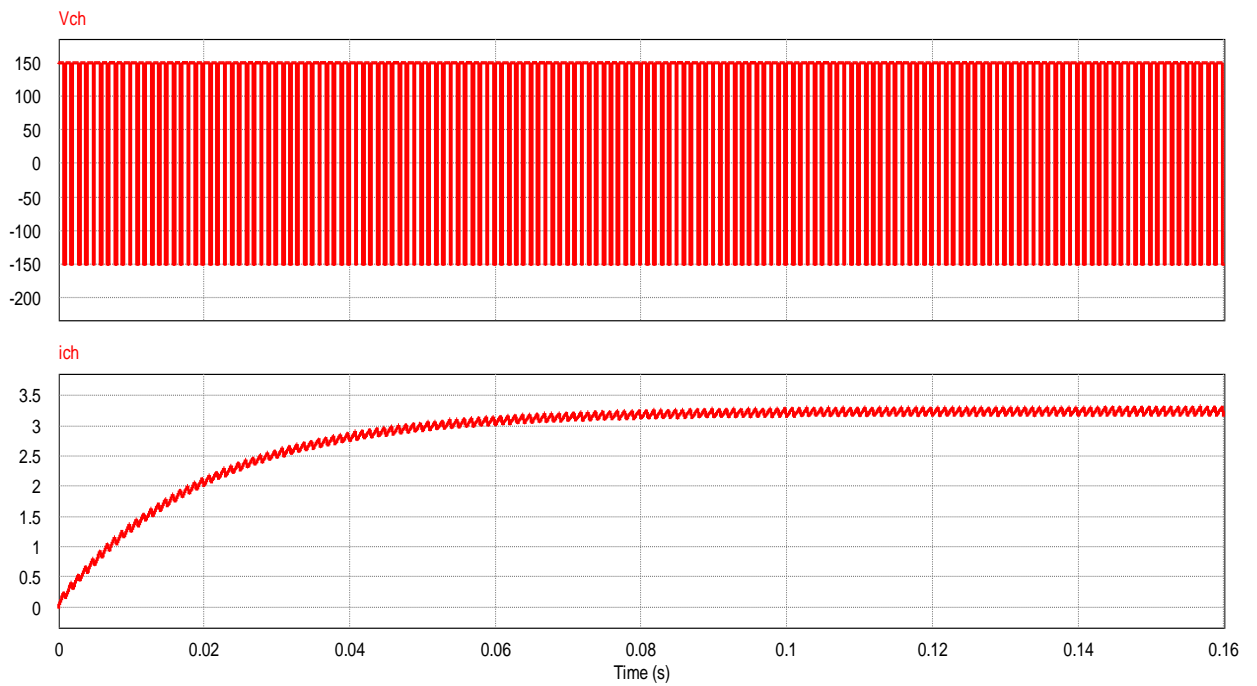


Figure (III-21) : formes d'ondes du courant  $i_{ch}$  (A) et de la tension  $V_{ch}$  (V) dans le régime transitoire et permanent

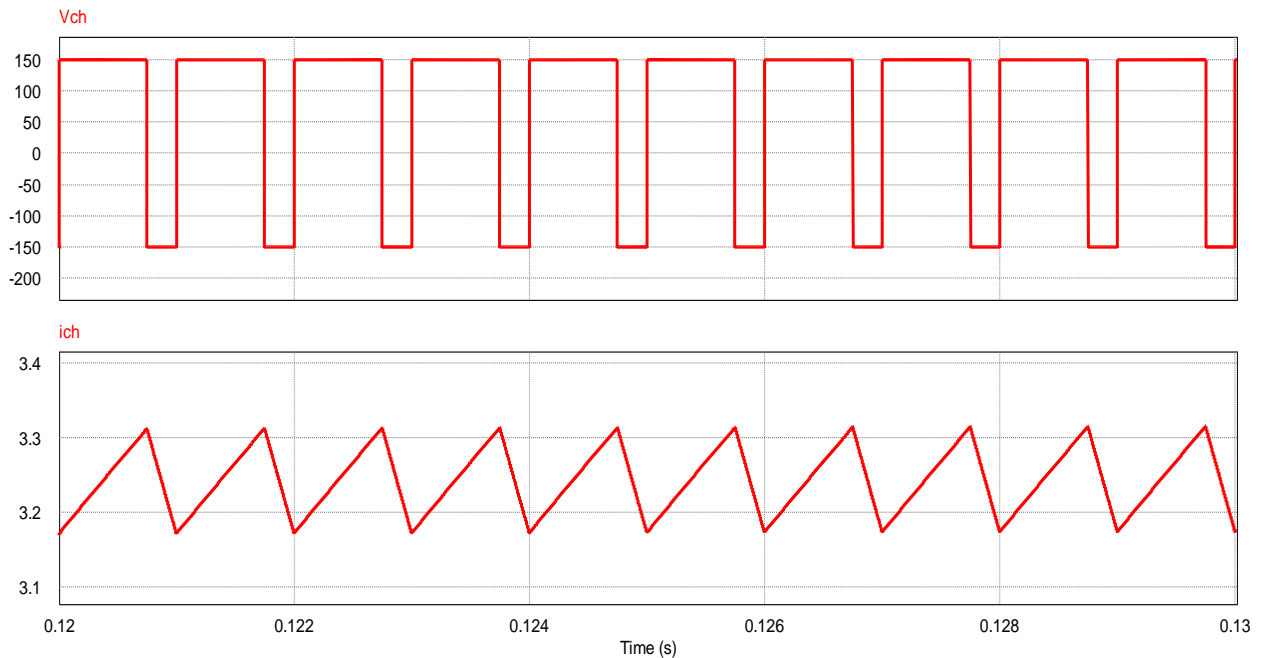
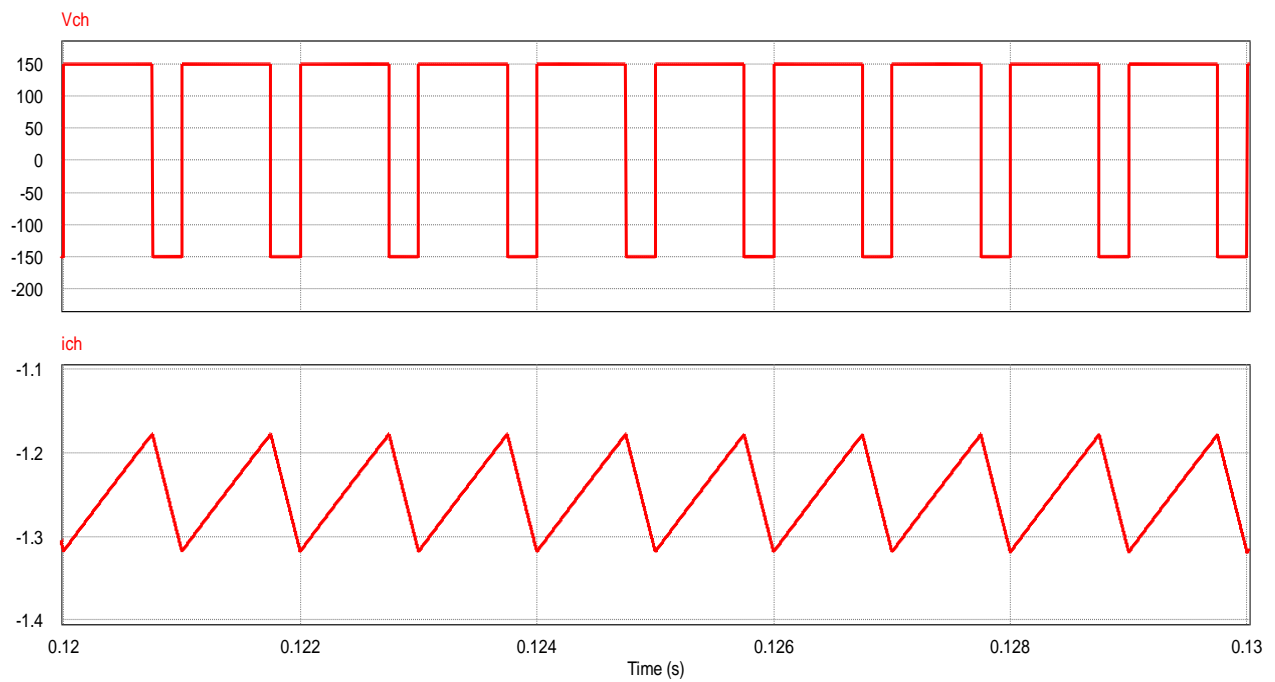


Figure (III-22) : formes d'ondes du courant  $i_{ch}$  (A) et de la tension  $V_{ch}$  (V) dans le régime permanent

➤ Pour  $V_{ch}$  positive et  $i_{ch}$  négatif ( $V_{ch} > 0$  et  $i_{ch} < 0$ ) :

$$\alpha = 0.75, V_2 = 100 \text{ V}$$



**Figure (III-23)** : formes d'ondes du courant  $i_{ch}$  (A) et de la tension  $V_{ch}$  (V) dans le régime permanent

➤ Pour  $V_{ch}$  négative et  $i_{ch}$  négatif ( $V_{ch} < 0$  et  $i_{ch} < 0$ ) :

$\alpha = 0.22$ ,  $V_2 = 100$  V

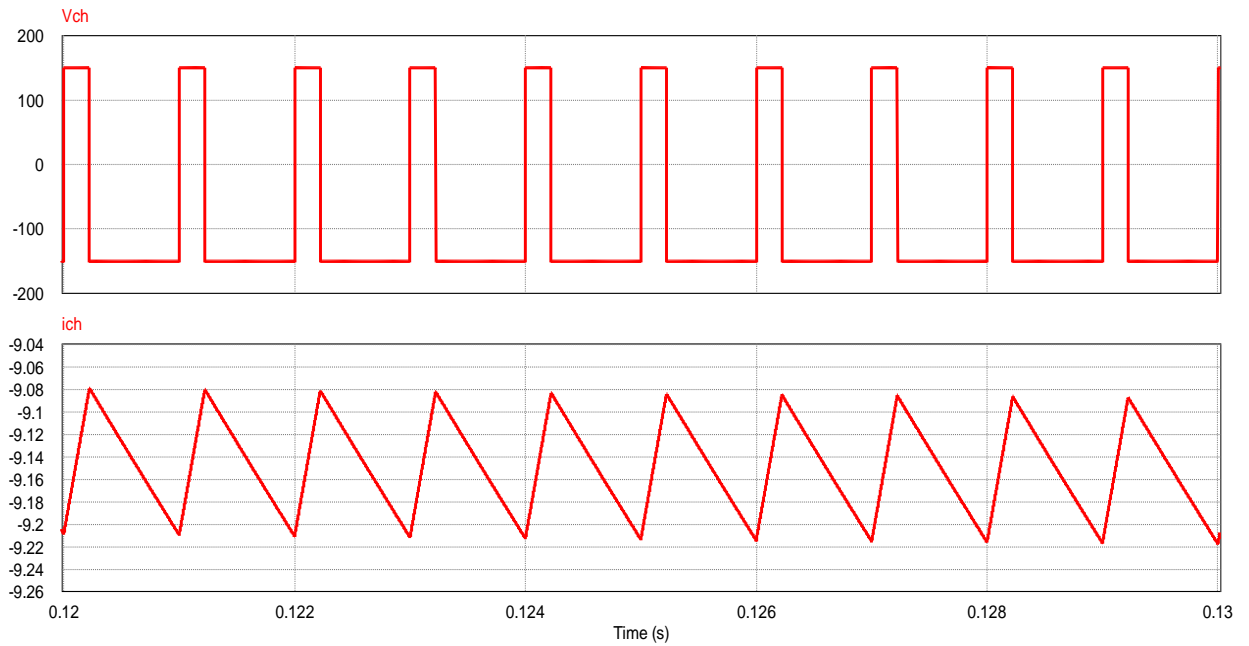


Figure (III-24) : formes d’ondes du courant  $i_{ch}$  (A) et de la tension  $V_{ch}$  (V) dans le régime permanent

➤ Pour  $V_{ch}$  négative et  $i_{ch}$  positif ( $V_{ch} < 0$  et  $i_{ch} > 0$ ) :

$\alpha = 0.22$ ,  $V_2 = 150$  V.

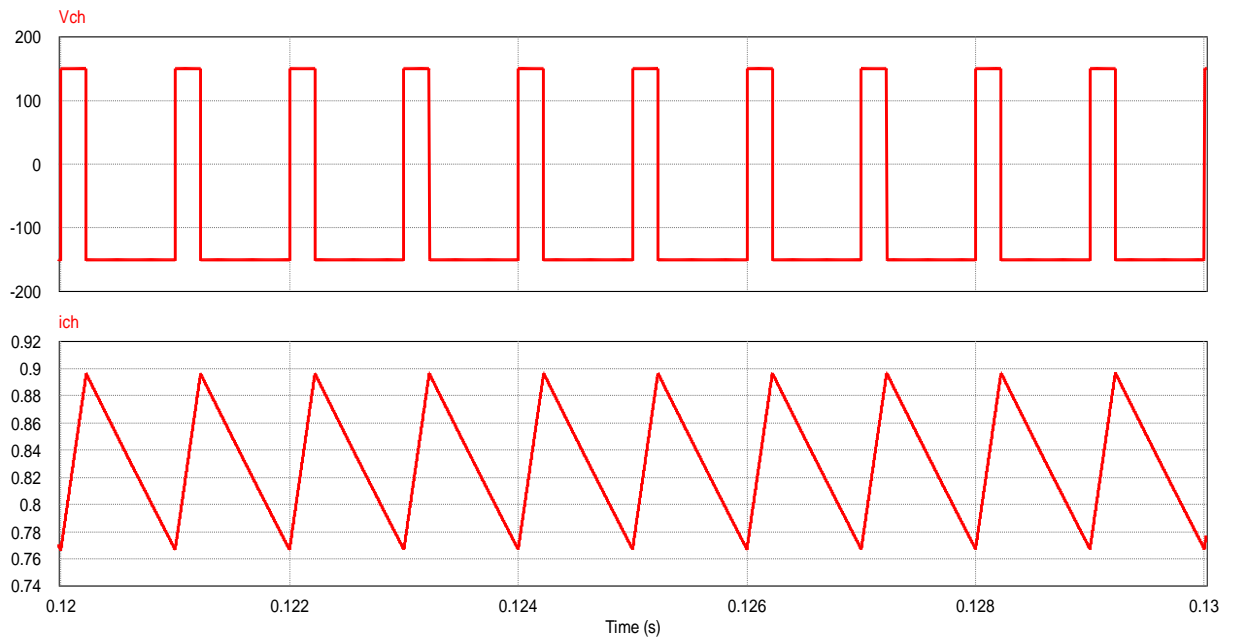


Figure (III-25) : formes d’ondes du courant  $i_{ch}$  (A) et de la tension  $V_{ch}$  (V) dans le régime permanent

• **Interprétation les résultats :**

- Les résultats de simulation (figures III-21, 22, 23, 24 et 25) montrent que les formes d'ondes  $V_{ch}$  et  $i_{ch}$  obtenues pour la commande symétrique sont conformes à celles de la figure (III-18).

- La tension aux bornes de la charge du hacheur quatre quadrants, dans le cas de la commande continue (commutation symétrique), prend  $+V_s$  ou  $-V_s$ .

- Pour le courant dans la charge, il passe par un régime transitoire puis il se maintient autour d'une valeur moyenne avec une certaine ondulation admissible.

- Le courant  $i_{ch}$  peut être positif ou négatif, de même la tension  $V_{ch}$  soit positive ou négative selon le rapport cyclique :

$$V_{ch\text{moy}} = (2\alpha - 1)V_s \quad (\text{III-43})$$

Pour le cas 1 : on remarque ( $V_{ch} > 0$  et  $i_{ch} > 0$ ) ce qui nous montre la figure (III-22), pendant  $[0, \alpha T]$  le courant passe par T1 et T4 et pendant  $[\alpha T, T]$  il passe par D2 et D3 donc la machine fonctionne dans le quadrant 1.

Pour le cas 2 : on remarque ( $V_{ch} > 0$  et  $i_{ch} < 0$ ) ce qui nous montre la figure (III-23), pendant  $[0, \alpha T]$  le courant passe par D1 et D4 et pendant  $[\alpha T, T]$  il passe par T2 et T3 donc la machine fonctionne dans le quadrant 4.

Pour le cas 3 : on remarque ( $V_{ch} < 0$  et  $i_{ch} < 0$ ) ce qui nous montre la figure (III-24), pendant  $[0, \alpha T]$  le courant passe par D1 et D4 et pendant  $[\alpha T, T]$  il passe par T2 et T3 donc la machine fonctionne dans le quadrant 3.

Pour le cas 4 : on remarque ( $V_{ch} < 0$  et  $i_{ch} > 0$ ) ce qui nous montre la figure (III-25), pendant  $[0, \alpha T]$  le courant passe par T1 et T4 et pendant  $[\alpha T, T]$  il passe par D2 et D3 donc la machine fonctionne dans le quadrant 2.

### III.3/ Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié les hacheurs réversibles en courant, en tension et en courant et en tension. Par la suite nous avons analysé le fonctionnement du hacheur quatre quadrants (en pont). Le choix d'un hacheur ou d'un est basé sur le nombre de quadrants nécessaires à l'entraînement d'une machine à courant continu avec deux possibilités de commande (symétrique et alternée). Le Hacheur quatre quadrants permet à la machine à courant continu de travailler dans les quatre quadrants du plan courant - tension (ou couple - vitesse).

Nous avons analysé par simulation le fonctionnement de chaque type des hacheurs réversibles avec la commande symétrique des interrupteurs pour confirmer les études théoriques que nous avons réalisés.

# Chapitre IV

## Réglage de vitesse de la MCC



## IV.1/ Introduction

Vu l'utilité des hacheurs réversibles pour l'entraînement électrique à vitesse variable des machines à C.C. surtout dans le domaine de la traction électrique, On va réaliser une commande du hacheur 4 quadrants alimentant une machine à C.C [35].

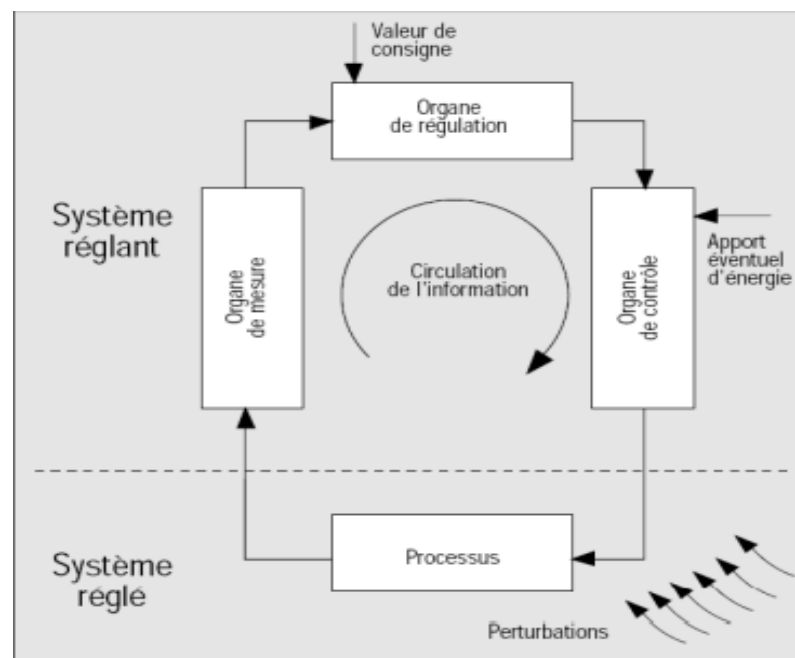
L'entraînement électrique est un système électromécanique, constitué d'un dispositif de conversion d'énergie électrique, d'un mécanisme de transmission et d'un dispositif de commande.

Un système d'entraînement électrique se compose en principe du moteur électrique et de la machine productrice selon la tâche à accomplir, il peut être complété par un engrenage mécanique et un convertisseur. En fonction des exigences requises par le processus de travail, à savoir par exemple la capacité de commande ou de régulation et la précision des grandeurs réglées, il sera nécessaire de prévoir un système de traitement de l'information [38].

## IV.2/ Généralité sur la régulation :

La régulation est l'action de régler automatiquement une grandeur de telle sorte que celle-ci garde constamment sa valeur ou reste proche de la valeur désirée, quelque soient les perturbations qui peuvent subvenir.

L'objectif global de la régulation peut se résumer par ces trois mots clefs : mesurage, algorithme, commande [39].



**Figure (IV-01) :** Schéma de principe d'une chaîne de régulation [43].

### IV.2.1/ Conception d'un système de commande :

La commande d'un processus consiste à déterminer la commande appropriée, de manière à assurer aux variables à contrôler (sorties) un comportement défini. L'action de la commande est une action susceptible de changer l'état du système à commander. Ces commandes sont délivrées par un organe de commande ; le processus et son organe de commande constituent le système de commande (figure IV-02) [39].

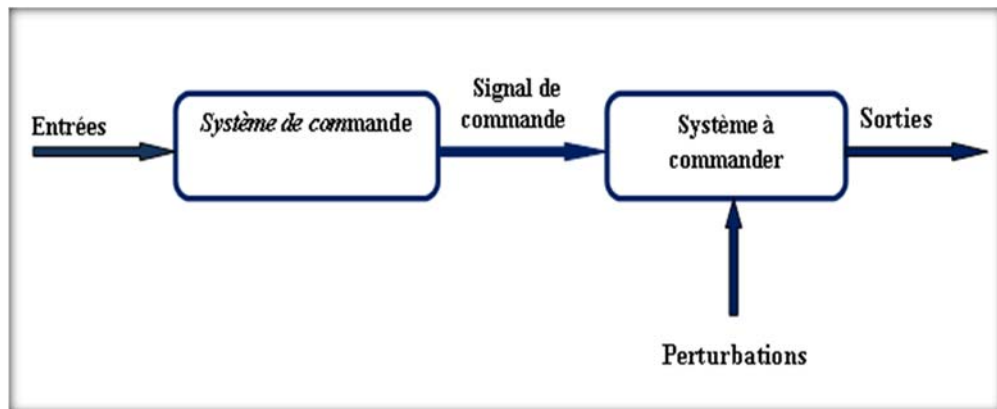


Figure (IV-02) : Système de commande

Le système de commande comprend un élément nécessaire qui est le régulateur qui effectue le calcul de la commande à appliquer au processus à partir de la consigne et de l'état du processus. Lorsqu'il y a un retour d'information de la grandeur observée sur le régulateur, on parle d'un asservissement du système ou d'une régulation du système.

**a. Asservissement :** La consigne, traduisant l'objectif désiré du procédé, n'est pas constante et les grandeurs perturbatrices n'existent pas ou sont très peu influentes sur la grandeur à régler.

**b. Régulation :** La consigne, traduisant l'objectif désiré du procédé, est constante et les grandeurs perturbatrices influencent fortement sur la grandeur à régler [39].

### IV.2.2/ Performances des systèmes réglés :

Les performances des systèmes réglés définies dans un cahier des charges, sont illustrées par la figure (IV-03).

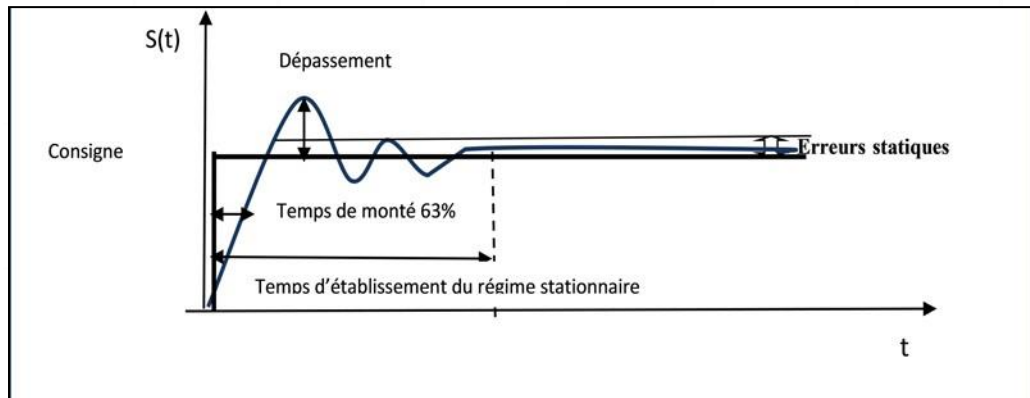


Figure (IV-03) : Performances d'un système de commande

**Rapidité :** La rapidité quantifie le temps de réponse du système. Elle correspond au temps de réaction de la sortie par rapport à la consigne. Le temps mis par la réponse pour ne plus dépasser 5% de la valeur finale. Ce temps est retenu comme critère de rapidité 5%.

**Précision :** La précision quantifie l'erreur lorsque l'équilibre est atteint, Avec l'entrée  $e(t)$  et la sortie  $s(t)$  de même nature. Autrement, un système est précis si la sortie suit la consigne en toutes circonstances avec un écart inférieur à la valeur définie dans un cahier des charges.

**Stabilité :** On dit qu'un système est stable lorsque celui-ci tend à revenir à son état d'équilibre pour une consigne constante, la sortie doit être constante [39].

#### IV.2.3/ Système en boucle fermée :

La boucle fermée (contre réaction) est capable de stabiliser un système instable en boucle ouverte. Dans une régulation en boucle fermée, une bonne partie des facteurs perturbateurs externes sont automatiquement compensés par la contre-réaction à travers le procédé.

L'utilisation du retour d'information est le principe fondamental en commande électrique. La commande appliquée au système est élaborée en fonction de la consigne et de la sortie. On peut représenter une régulation de la manière suivante : [39]

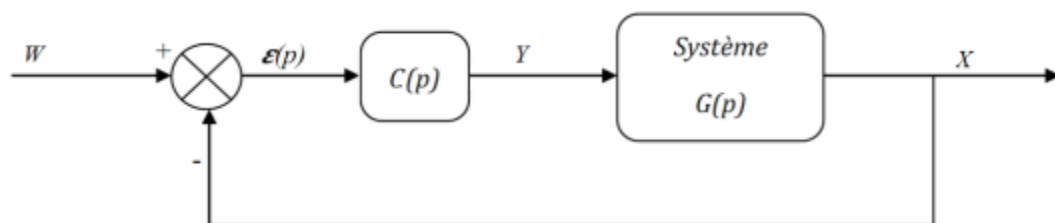


Figure (IV-04) : Schéma bloc d'un système en boucle fermée [43].

Avec :

$\varepsilon(p)$  est l'erreur,  $\varepsilon(p) = X - W$

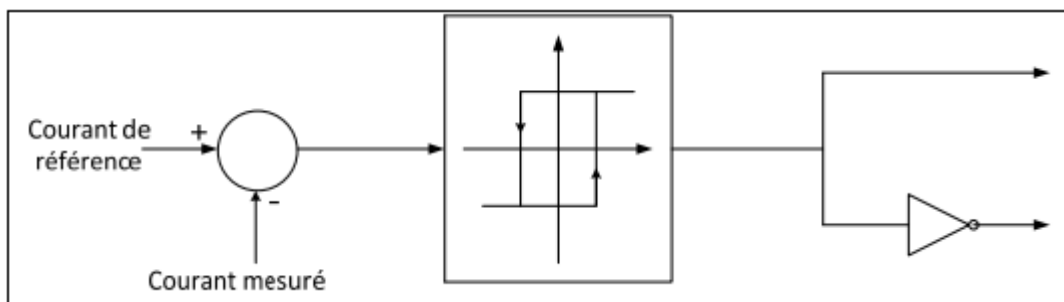
### IV.3/ Modulation par Hystérésis :

La réalisation de cette technique, régulation par tout ou rien, consiste à accomplir les deux étapes suivantes :

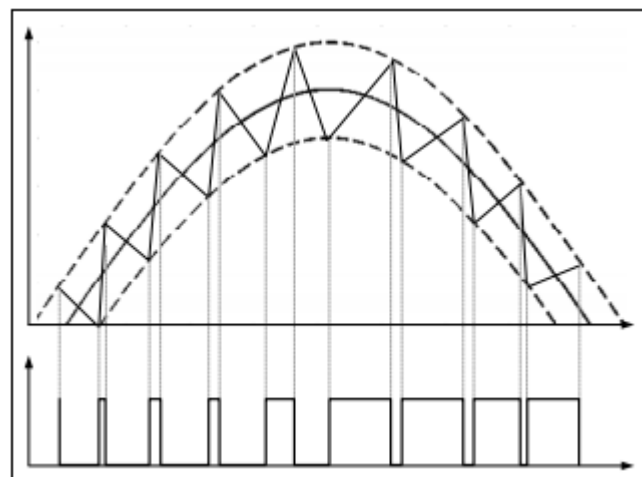
- Comparer le courant mesuré avec le courant de référence ce qui produit un signal de commande qui sera le signal d'entrée appliqué au comparateur à hystérésis.

- Fixer une bande appelée bande d'hystérésis dans laquelle le courant peut évoluer. L'atteinte du courant à l'une des limites provoque le changement du fonctionnement des interrupteurs de telle manière que le courant ne dépasse pas cette limite et se dirige vers l'autre [40].

Cette méthode permet de contrôler de manière indirecte la fréquence de commutation des interrupteurs en jouant sur la largeur de la bande [41].



**Figure (IV-05) :** Principe de commande par Hystérésis [40].



**Figure (IV-06) :** Modulation hystérésis [40].

**IV.3.1/ Comparaison entre modulation par hystérésis et MLI :**

Cette technique a l'avantage d'être simple et facile en implémentation. A l'opposition de la technique de modulation MLI [40].

Modulation par hystérésis se fait en boucle fermée par contre la modulation par MLI se fait en boucle ouverte.

**IV.3.2/ Les avantages et les inconvénients de la commande par hystérésis :**

Parmi les principaux avantages de la régulation du courant par hystérésis, la simplicité de la mise en œuvre, une robustesse exceptionnelle, une précision en poursuite de courant de référence et une dynamique extrêmement bonne limitée par la vitesse et la constante de temps électrique de la machine [42]. Cependant, cette classe des contrôleurs a les inconvénients suivants :

- Fonctionner à des fréquences de commutation variables et non contrôlables [40].
  - La fréquence de commutation dépend en grande partie des paramètres de la machine, de la tension côté continu et des conditions de fonctionnement (couple et vitesse).
  - Dans un contrôleur de courant à hystérésis le courant instantané est maintenu dans une bande de tolérance [42].

**IV.4/ Moteur à courant continu :**

Un Moteur électrique à Courant Continu (MCC) est un convertisseur électromécanique permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant continu et un dispositif mécanique. Il est très utilisé en industrie est nécessite une régulation précise de la vitesse de rotation. Ainsi il est utilisé dans les asservissements où la facilité de réglage de la vitesse, du moment, du couple, et du sens de rotation, permet une mise en œuvre aisée.

Le moteur à courant continu est constitué principalement de stator, rotor, collecteur, et balais [39].

**IV.4.1/ Types de moteur à courant continu**

Selon l'application et les différentes modes de connexion entre les bobinages de l'inducteur et de l'induit, on distingue différents types de MCC : [39]

- Moteur à excitation séparée
- Moteur à excitation série
- Moteur à excitation composée
- Moteur à excitation parallèle (shunt)

Dans notre cas on utilise un moteur à excitation séparée.

IV.4.1.1/ Moteur à Excitation séparée :

L'inducteur d'un moteur à excitation séparée est alimenté par une source indépendante :

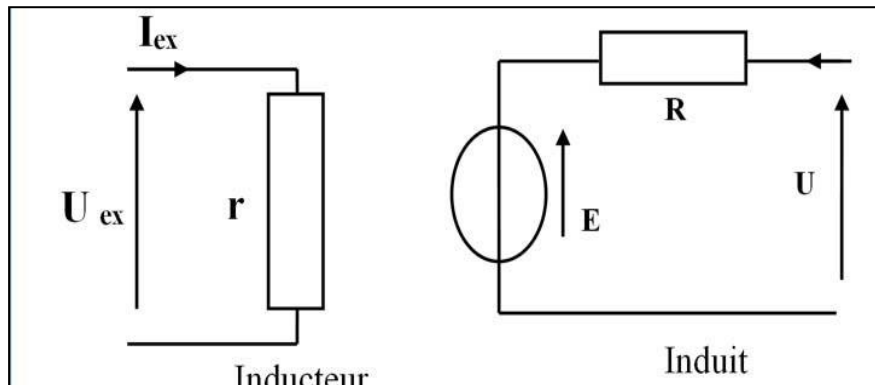


Figure (IV-07) : Schéma électrique du MCC à excitation séparée

• Equations électriques :

D'après le schéma électrique d'un MCC à excitation séparée (figure IV-07), on peut déduire les expressions suivantes en régime permanent : [39]

• Pour l'induit :

$$U = E + R_{ind} \cdot I_{ind} \tag{IV-01}$$

$$E = K\Phi\omega \tag{IV-02}$$

Le flux magnétique  $\Phi$  est constant donc La f.é.m. E est proportionnelle à la vitesse de rotation du moteur.

• Pour l'inducteur :

$$U_{ex} = r_{ex} \cdot I_{ex} \tag{IV-03}$$

$R_{ind}$ : représente la résistance de l'induit, et U : la tension d'alimentation de circuit de l'induit.  
 $I_{ind}$  : courants dans le circuit de l'induit, et K : la constante du moteur, et  $\Phi$  : flux magnétique.  
 $\omega$ : vitesse de rotation.

$r_{ex}$ : représente la résistance de l'inducteur, et  $U_{ex}$  : la tension d'alimentation de circuit de l'inducteur.  $I_{ex}$ : courants dans le circuit de l'inducteur,

• Equation mécanique :

On déduit l'expression générale de la vitesse d'un moteur à courant continu : [39]

$$\omega = U/K\Phi - R_{ind} \cdot I_{ind} / K\Phi \tag{IV-04}$$

$$C_{em} = K\Phi I_{ind} \tag{IV-05}$$

On remarque qu'on peut faire modifier la vitesse d'un moteur à courant continu en agissant sur les trois paramètres suivants :

- Résistance du circuit d'induit.
- Flux d'excitation (Dans ce cas il est constant).
- Tension d'induit du réseau appliqué au moteur.

Le couple électromagnétique  $C_{em}$  est proportionnel au courant d'induit [39].

#### IV.4.2/ Modélisation du moteur :

Un moteur électrique à courant continu est régi par les équations physiques découlant de ses caractéristiques électriques, mécaniques et magnétiques. D'après la loi de Newton, combiné à des lois de Kirchhoff, on peut écrire les équations différentielles dans le domaine temporel : [43]

##### • Equations électriques :

$$U = R_{ind} \cdot i_{ind}(t) + L_{ind} \frac{di_{ind}(t)}{dt} + E(t) \quad (IV-06)$$

$$U_{ex} = r_{ex} \cdot i_{ex}(t) + L_{ex} \frac{di_{ex}(t)}{dt} \quad (IV-07)$$

$$E(t) = K\Phi\omega(t) \quad (IV-08)$$

$L_{ind}$  : représente la self équivalente de l'enroulement d'induit,  $L_{ex}$  : représente la self équivalente de l'enroulement d'inducteur.

##### • Equation mécanique :

D'après la loi fondamentale de la dynamique :

$$C_{em}(t) - C_r(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + f\omega(t) \quad (IV-09)$$

$C_r(t)$  le couple résistant, et  $f$  : coefficient de frottement du moteur,  $J$  le moment d'inertie de l'ensemble moteur charge.

#### IV.4.3/ Simulation du MCC à excitation séparée :

- Paramètres de l'enroulement de l'induit :  $R_{ind} = 1.5 \text{ Ohm}$ ,  $L_{ind} = 0,012 \text{ H}$ .
- Paramètres de l'enroulement d'excitation :  $r_{ex} = 275 \text{ Ohm}$ ,  $L_{ex} = 1.25 \text{ H}$ .
- Somme des moments d'inertie de la machine :  $J = 0.11 \text{ (Kg.m}^2\text{)}$ .
- Vitesse nominale de rotation :  $w = 1451 \text{ tr/min}$ .
- Puissance nominale :  $P_u = 3000 \text{ W}$ .
- La tension aux borne d'induit :  $U = 220 \text{ V}$ .
- Courant nominal d'induit :  $i_{ind} = 15 \text{ A}$ .
- Courant nominal d'excitation :  $i_{ex} = 0.8 \text{ A}$ .

### IV.5/ Le correcteur :

Le correcteur permet d'améliorer les caractéristiques de précision, stabilité et la rapidité du système.

La synthèse d'un asservissement consiste à concevoir, à calculer et à réaliser le correcteur pour satisfaire un cahier des charges contenant les performances désirées.

Les étapes de cette synthèse sont :

- Choix du type de correcteur.
- Calcul des éléments du correcteur (calcul de  $C(p)$ ).
- Vérification (par simulation) des performances.
- Réalisation et insertion réelle du correcteur dans la chaîne d'asservissement [44].

Parmi les types de correcteur on trouve : P, PI, PID. Dans notre travail on a utilisé un correcteur Proportionnel Intégral (PI).

#### IV.5.1/ Le correcteur proportionnel intégral (PI) :

Chaque boucle de régulation est dotée d'un PI classique, il comporte une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité avec laquelle la régulation doit avoir lieu et une action intégrale qui sert à éliminer l'erreur statique entre la grandeur régulée et sa propre consigne. Le PI est réalisable physiquement, c'est d'ailleurs le correcteur le plus utilisé [39].

La transmittance du régulateur PI peut être exprimée de la manière suivante :

$$kp1 + \frac{ki1}{p} = \frac{ki1}{p} \cdot (1 + \tau1 \cdot p) \quad (IV-10)$$

Avec :

$$\tau1 = \frac{kp1}{ki1} \quad (IV-11)$$

Remarque :

- En régime permanent, il annule l'erreur statique [44].
- Ce correcteur introduit un pôle à l'origine.
- L'action de ce correcteur se fait sur les basses fréquences.
- Un correcteur PI possède une intégration, mais il ralentit le système et le déstabilise s'il est mal placé, on veillera donc à respecter une marge de phase suffisante mais pas trop grande non plus (plus la marge de phase est grande, plus la réponse est lente et les risques de saturation augmentent) [45].

#### IV.5.1.1/ Calcul des paramètres $kp1$ et $ki1$ du régulateur PI :

La boucle de régulation de la vitesse de la machine à courant continu est présentée par la figure (IV-08)



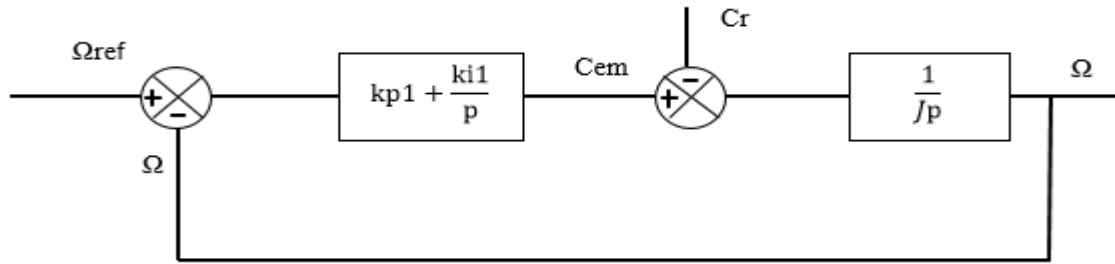


Figure (IV-08) : Schéma bloc simplifié du système de contrôle

La sortie du correcteur est  $C_{em}$  car la partie mécanique est la plus dominante et la dynamique de la vitesse dépend de la constante de temps mécanique. On considère donc la fonction de transfert de la machine comme une partie mécanique ( $\frac{1}{Jp}$ ) en négligeant le coefficient de frottement.

La fonction de transfert en boucle fermée du système de la figure (IV-08) est donnée par :

$$\frac{\Omega(p)}{\Omega_{ref}(p)} = \frac{1 + \tau_1 p}{\frac{J}{k_{i1}} p^2 + \tau_1 p + 1} \tag{IV-12}$$

En comparant l'équation caractéristique de la fonction de transfert (IV-12) avec la forme standard du second ordre, on trouve que :

$$\omega_0^2 = \frac{k_{i1}}{J} \tag{IV-13}$$

$$\tau_1 = \frac{2\xi}{\omega_0} \tag{IV-14}$$

Avec :

$\xi$  : Coefficient d'amortissement

$\omega_0^2$  : Fréquence propre d'oscillation.

$\tau_1$  : Constante de temps associée au régulateur PI et qui définit la bande passante.

A partir des équations (IV-13), (IV-14) et  $\xi=1$ , pour un amortissement critique, on obtient :

$$k_{i1} = \frac{4J}{\tau_1^2} \tag{IV-15}$$

Pour calculer  $k_{i1}$ , la constante de temps associée au régulateur  $\tau_1$  est choisie en fonction de la constante de temps de l'induit qui caractérise la dynamique du couple. En augmentant la bande passante du régulateur (c'est à dire en diminuant  $\tau_1$ ), la rapidité de la réponse du système peut être améliorée.

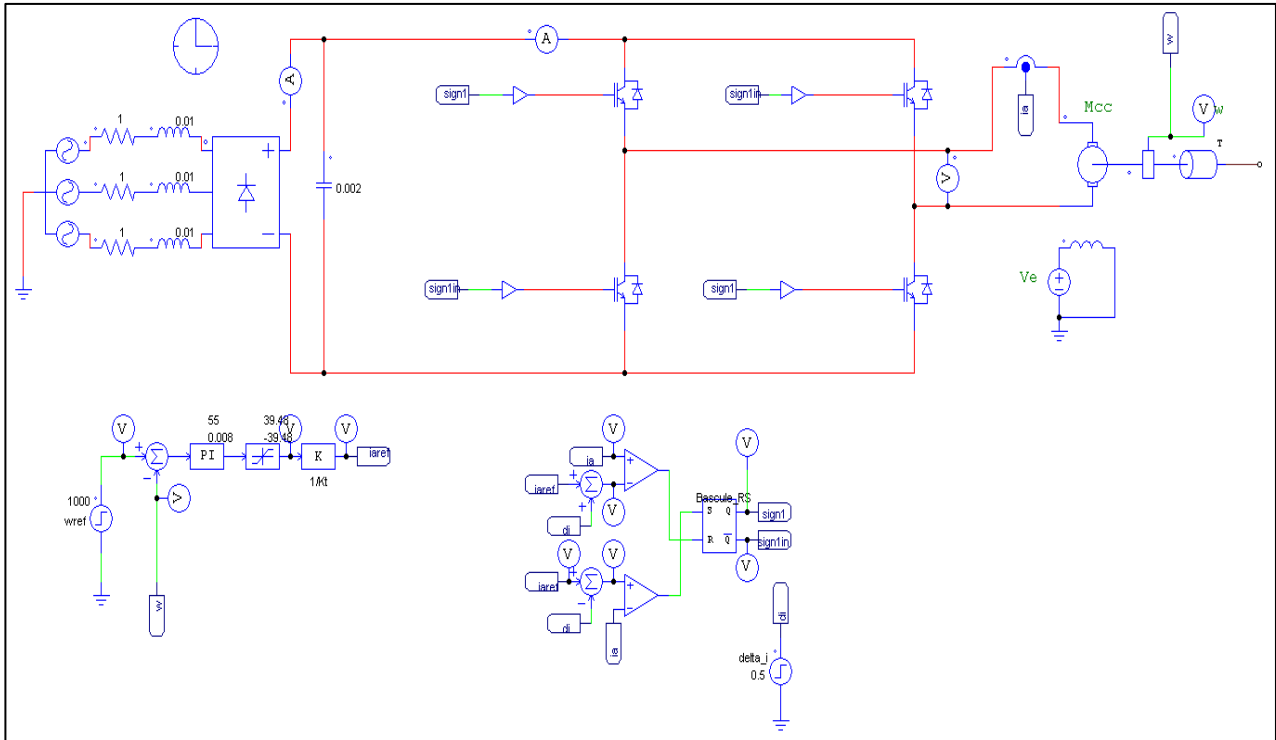
Finalement, la constante  $k_{p1}$  est donnée simplement par :

$$k_{p1} = k_{i1} \cdot \tau_1 \tag{IV-16}$$

Pour  $\tau_1 = 0.008(s)$ , nous trouvons  $k_{i1} = 6875$  et  $k_{p1} = 55$ , ce qui nous permet de simuler le schéma bloc de la figure (IV-08).

**IV.6/ Simulation :**

La figure (IV-09) représente le schéma de simulation pour réguler la vitesse du MCC, réalisé sous PSIM :



**Figure (IV-09) :** Schéma de régulation associée hacheur-moteur

On a fait une commande symétrique des interrupteurs par le contrôle du courant par hystérésis.

Le limiteur de courant est utilisé pour limiter la valeur du courant en cas de défaut notamment de court-circuit et protéger le système, ses paramètres sont ( $2C_u = 39.48 \text{ Nm}$  ;  $-2C_u = -39.48 \text{ Nm}$ ) avec :

$$C_u = \frac{P_u}{\omega} \text{ Avec : } \omega \text{ (rad/s), } P_u \text{ (W), } C_u \text{ (N.m)} \tag{IV-17}$$

On a pris :  $V_s = 220V$  ;  $R = 1\Omega$  ;  $L = 0.01H$  ;  $w_{ref} = 1000 \text{ tr/min}$  ;  $C_r = 0$  ; le gain  $K = 0.769$

Les résultats de simulation obtenus sont les suivants :

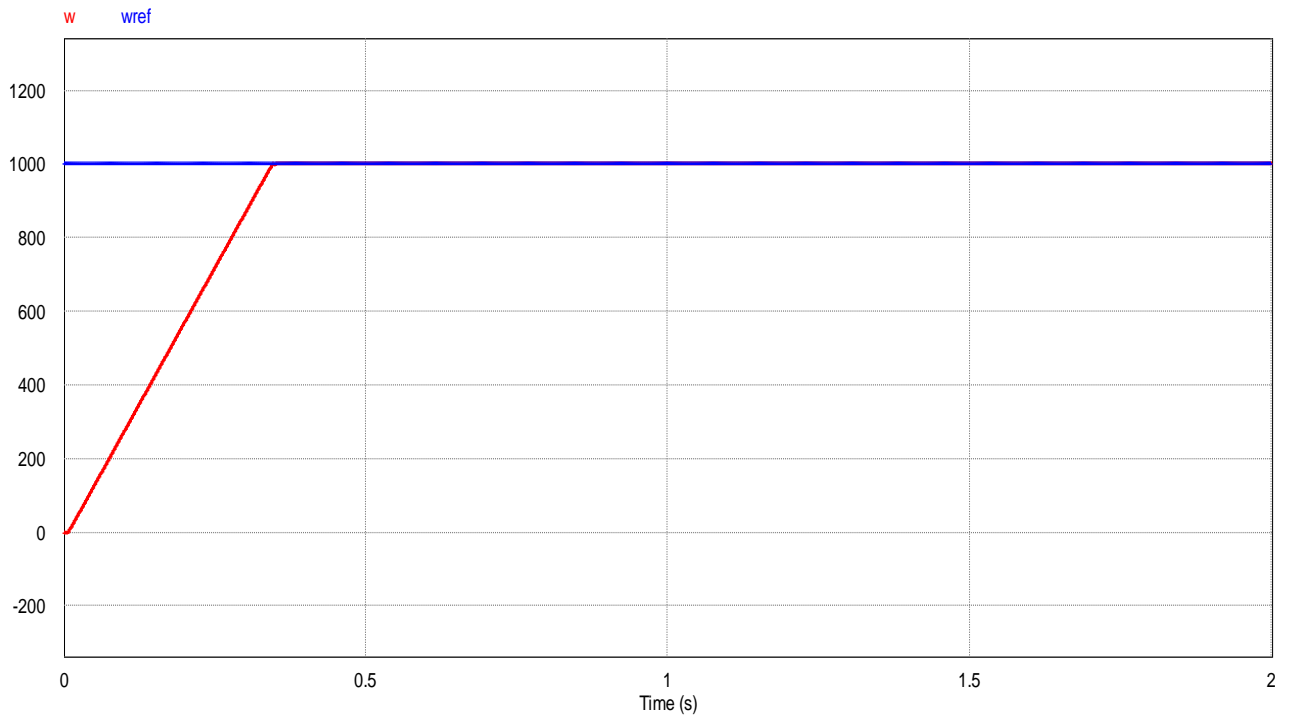


Figure (IV-10) : Formes d’ondes de la vitesse  $w$  (tr/min) avec sa référence  $w_{ref}$  (tr/min)

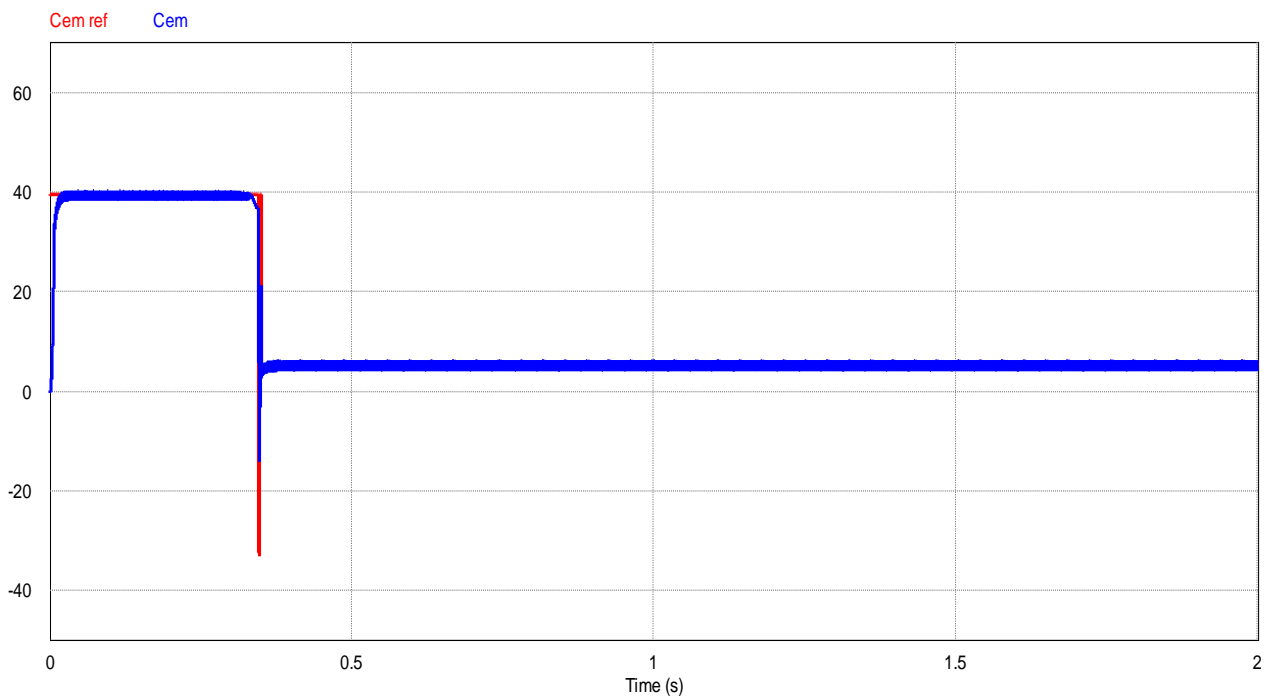


Figure (IV-11) : Formes d’ondes du couple  $C_{em}$  (N.m) avec sa référence  $C_{emref}$  (N.m).

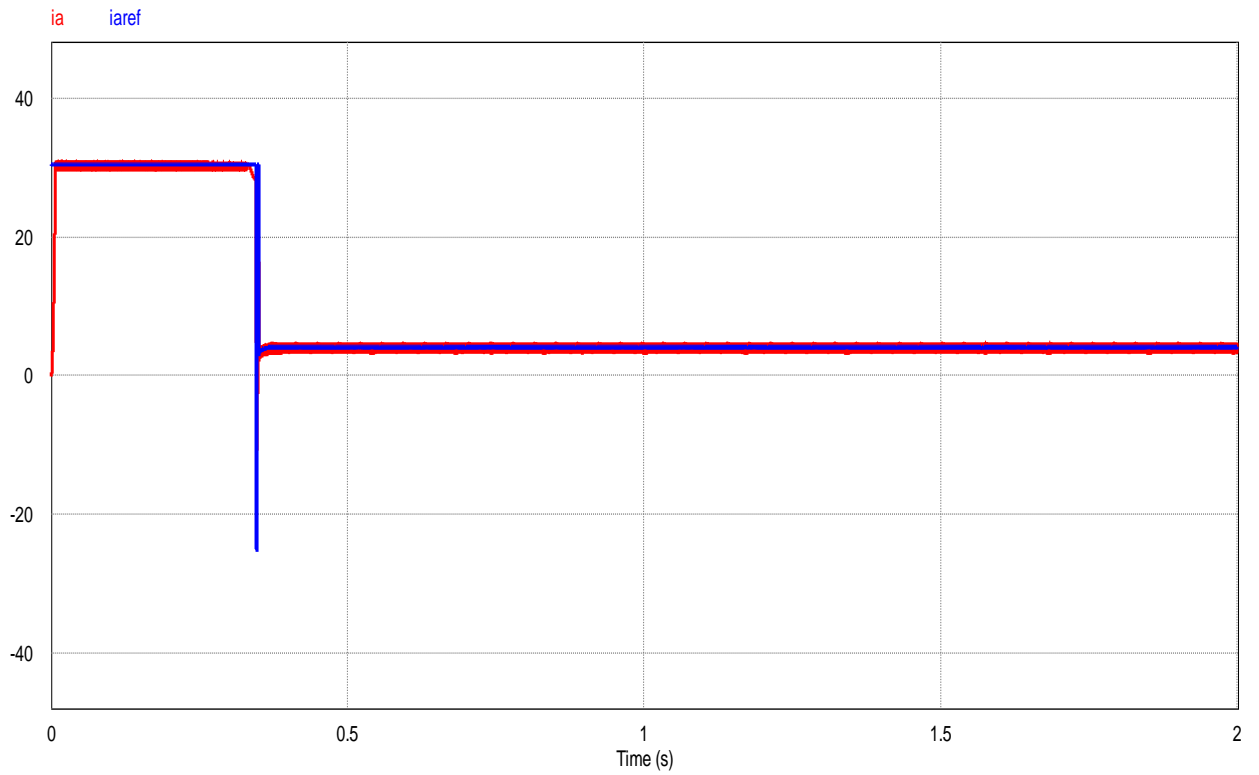


Figure (IV-12) : Formes d'ondes du courant d'induit  $i_a$  (A) avec sa référence  $i_{ref}$  (A)

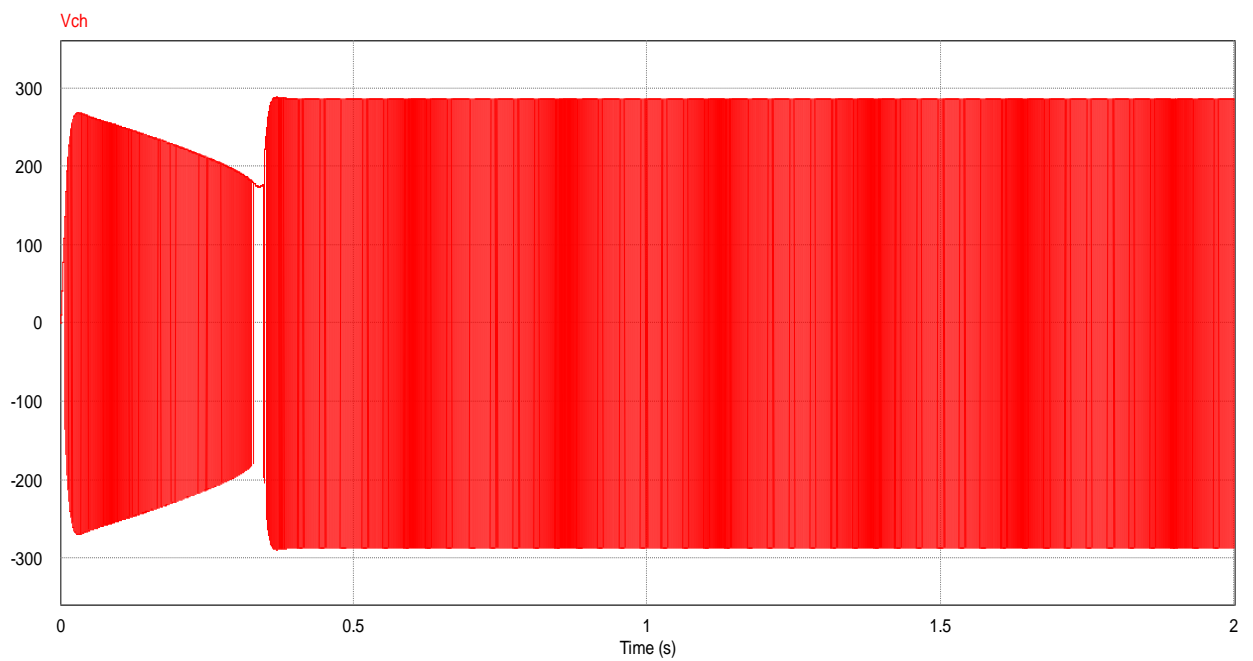


Figure (IV-13) : Forme d'onde de la tension de l'induit  $V_{ch}$  (V)

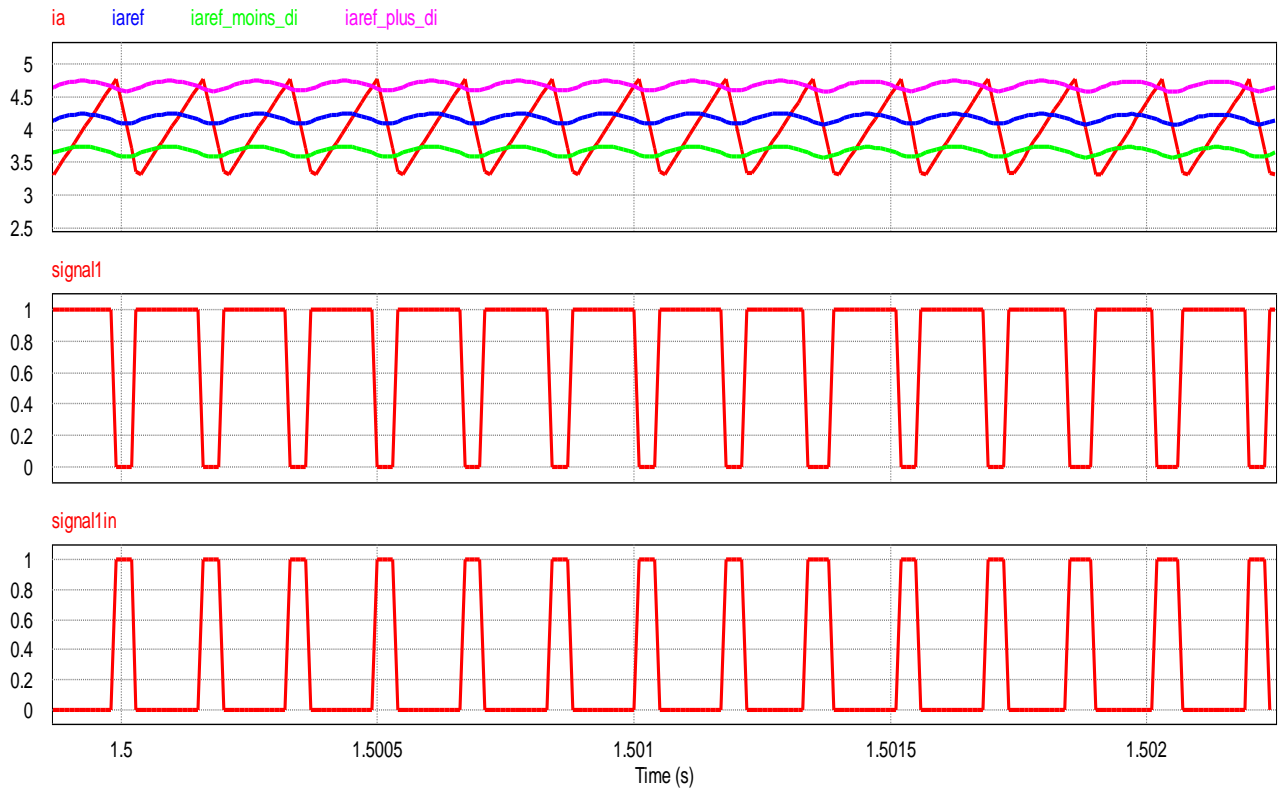


Figure (IV-14) : Formes d’ondes du Modulation hystérésis

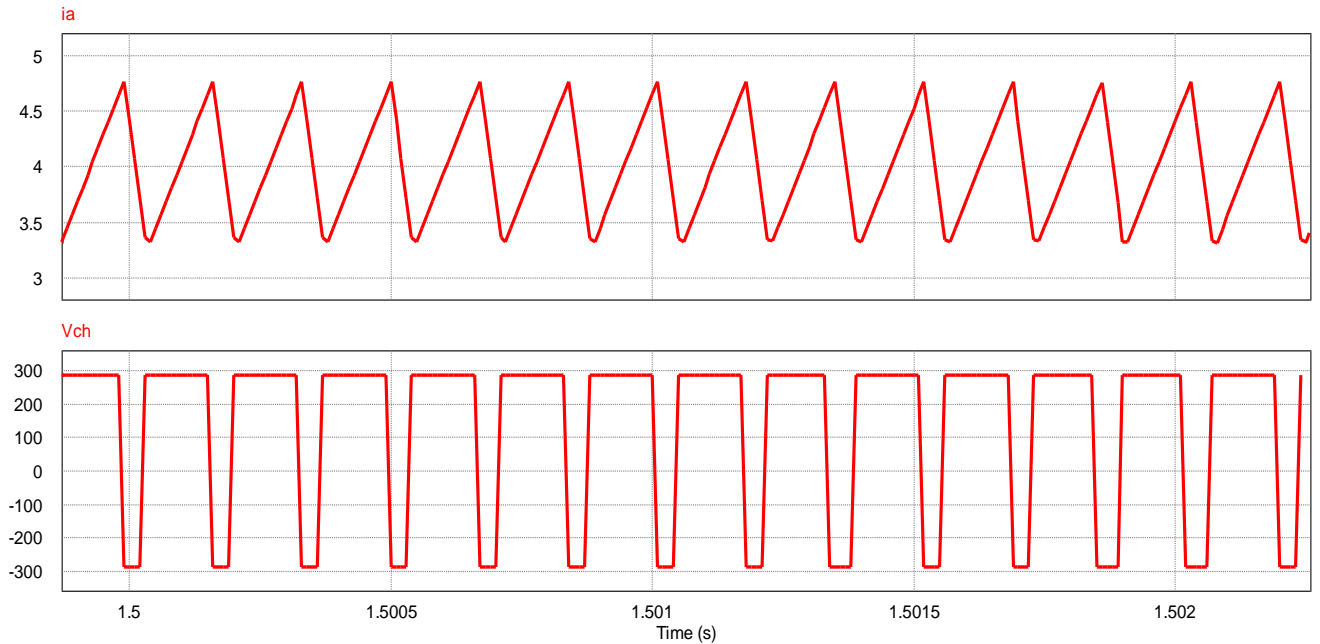


Figure (IV-15) : Formes d’ondes du courant d’induit  $i_a$  (A) et de la tension de l’induit  $V_{ch}$  (V) en régime permanent

● **Interprétation des résultats :**

- Les résultats de simulation (figures IV-10, IV-11 et IV-12) montrent que chaque grandeur réelle de la MCC suit la trajectoire de sa référence, il passe par un régime transitoire puis il se maintient autour de sa consigne. Alors on peut dire que les réponses du système commandé par PI sont précises et assez rapides.

- On remarque que l'allure de la vitesse  $w$  est obtenue sans dépassement (l'absence des oscillations) et elle stabilise très vite donc on a une réponse amortie critique puisque lors du calcul des paramètres du correcteur PI on a choisi le coefficient d'amortissement ( $\xi = 1$ ).

- La figure (IV-14) montre que la fréquence de commutation des interrupteurs (fréquence de hachage) est variable dans le temps, ainsi elle dépend en grande partie des paramètres de la machine ( $i_a$  ;  $C_{em}$ ) et largeur de la bande fixe.

- le couple électromagnétique et le courant d'induit ont la même allure. C'est-à-dire que le courant est l'image du couple.

$$C_{em} = K\Phi I_{ind} \quad (IV-18)$$

La machine utilisée est un MCC à excitation séparée ce qui fait que le flux  $\Phi$  est constant donc le courant d'induit est l'image du couple.

- quand la source d'entrée est de type réseaux, l'ondulation du courant de charge soit plus grande que la source d'entrée de type continue ou batterie..., car cette dernière va délivrer un courant plus lisse.

- La tension aux bornes de la charge du hacheur quatre quadrants, dans le cas de la commande symétrique, varie entre + 286 V et - 286 V qui est la même valeur de la tension aux bornes du condensateur.

- La vitesse et le couple sont positives alors dans ce cas la machine fonctionne dans le quadrant 1 ( $W.C_{em} > 0$ ).

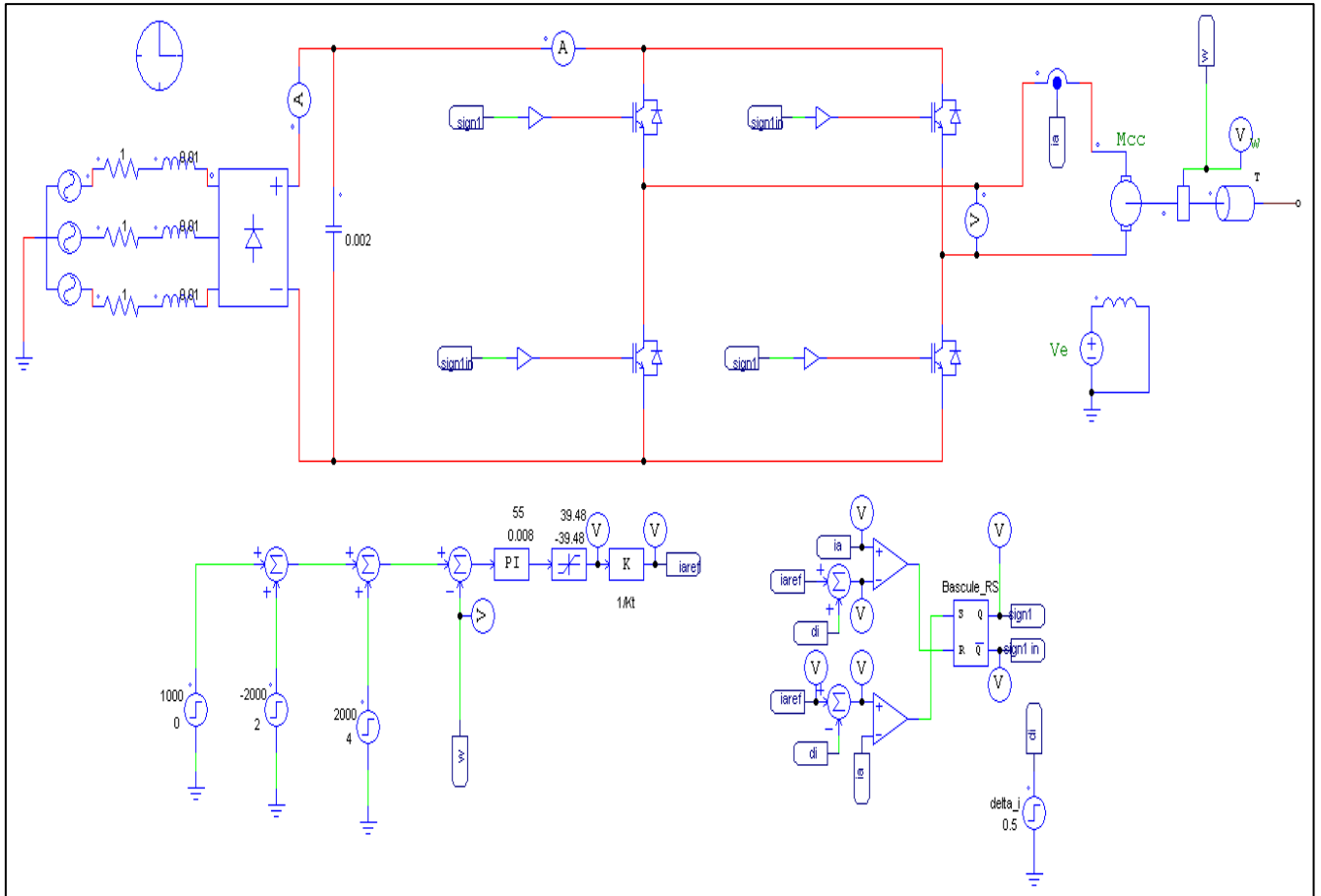
La partie prochaine montre comment la machine fonctionne dans les quatre quadrants en variant la référence de la vitesse  $w_{ref}$  :

Lorsque  $0(s) < t < 2(s)$   $w_{ref} = 1000$  tr/min

Lorsque  $2(s) < t < 4(s)$   $w_{ref} = -1000$  tr/min

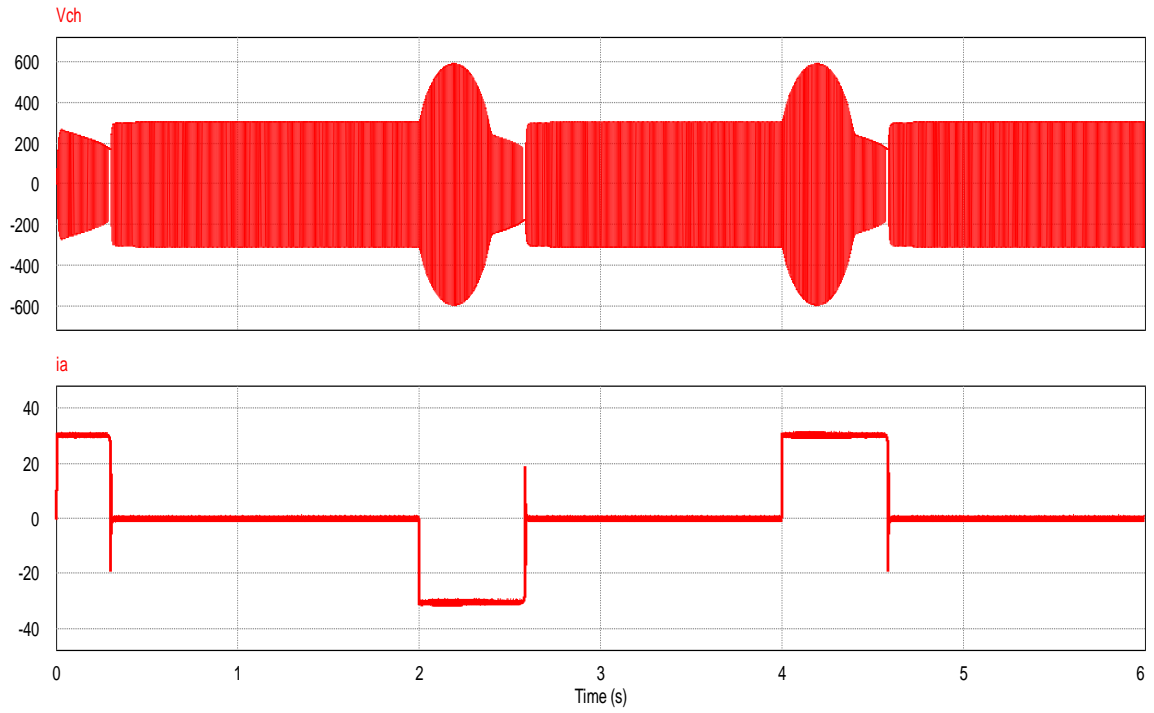
Lorsque  $4(s) < t < 6(s)$   $w_{ref} = 1000$  tr/min

La figure (IV-16) représente le schéma de simulation dans ce cas, réalisé sous PSIM :

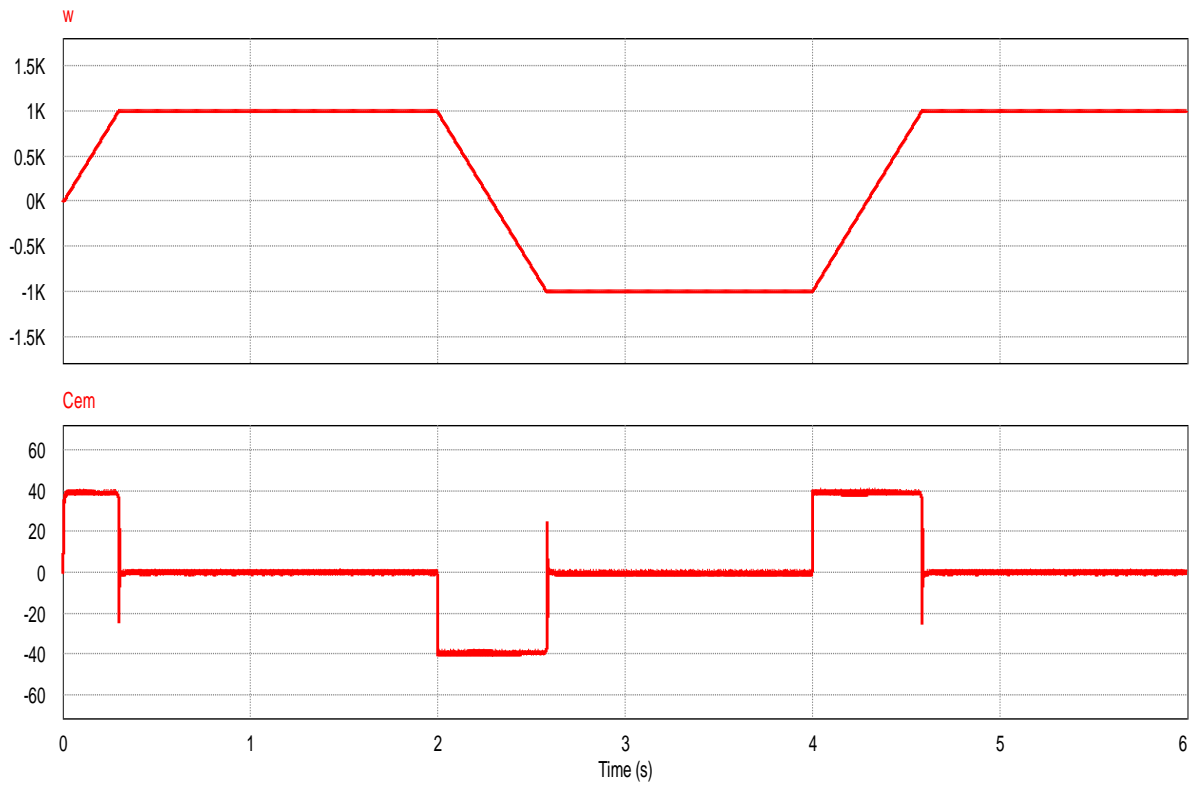


**Figure (IV-16) :** Schéma de régulation associée à un hacheur quatre quadrants

Les résultats obtenus sont les suivants :



**Figure (IV-17) :** Formes d’ondes de la tension de l’induit  $V_{ch}$  (V) et du courant d’induit  $i_a$  (A)



**Figure (IV-18) :** Formes d’ondes du couple  $C_{em}$  (N.m) et de la vitesse de rotation  $w$  (tr/min)



**• Interprétation des résultats :**

A la lumière des résultats de simulation donnés par les figures (IV-17 et IV-18), on peut dire que la régulation est satisfaisante, étant donné que les signaux sont admissibles pour la machine fonctionnant dans les quatre quadrants :

Pour  $0 \text{ s} < t < 2 \text{ s}$  on remarque que la vitesse et le couple sont positives ( $W.Cem > 0$ ) donc la machine fonctionne en moteur dans le quadrant 1.

Pour  $2 \text{ s} < t < 2.3 \text{ s}$  on remarque que le couple devient négatif mais la vitesse est toujours positive ( $W.Cem < 0$ ) donc la machine fonctionne en génératrice dans le quadrant 4.

Pour  $2.3 \text{ s} < t < 4 \text{ s}$  on remarque que la vitesse et le couple sont négatives ( $W.Cem > 0$ ) donc la machine fonctionne en moteur dans le quadrant 3.

Pour  $4 \text{ s} < t < 4.3 \text{ s}$  on remarque que la vitesse est négative par contre le couple est devenu positif ( $W.Cem < 0$ ) donc la machine fonctionne en génératrice dans le quadrant 2.

Pour  $4.3 \text{ s} < t < 6 \text{ s}$  on remarque que la vitesse et le couple sont positives ( $W.Cem > 0$ ) donc la machine fonctionne en moteur dans le quadrant 1.

L'allure (IV-18) montre que le couple  $Cem$  prend la valeur 0 dans le régime permanent parce que la machine est à vide.

Remarque :

- Lorsque la machine fonctionne en génératrice, l'énergie va être transférée de la machine vers le réseau, mais comme le pont redresseur n'est pas commandé (le redresseur à diodes n'est pas un convertisseur réversible) ; on constate une surtension aux bornes du condensateur de filtrage lors des phases des freinages. Donc si on veut récupérer cette énergie vers le réseau, on remplace ce redresseur par un convertisseur réversible comme le redresseur à thyristor.

**IV.7/ Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté une application d'une régulation de vitesse d'une machine à courant continu alimentée par un hacheur quatre quadrants.

La régulation de la vitesse repose sur un régulateur PI. La régulation du courant d'induit est assurée par un régulateur à hystérésis. Les résultats de simulation montrent le fonctionnement de la machine dans les quatre quadrants du plan courant-tension (couple-vitesse) grâce à un hacheur réversible en courant et en tension. Pour avoir la possibilité de renvoyer l'énergie vers le réseau, on doit remplacer le redresseur à diodes par un redresseur réversible à thyristors

# **Conclusion Générale**

### Conclusion Générale :

L'étude présentée dans ce mémoire porte essentiellement sur les montages hacheurs et ses applications qui font partie de la catégorie des convertisseurs statiques, on a commencé par l'étude des interrupteurs à semi-conducteur qui sont les éléments clés de la conversion d'énergie en interrompant ou non le transfert d'énergie entre les divers éléments du circuit, 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, chaque élément travaille dans un certain niveau de puissance. D'autre part on a présenté aussi leurs caractéristiques statiques et dynamiques, types et leurs applications.

Dans ce travail nous avons présenté aussi une comparaison entre les montages hacheurs réversibles et non réversibles et l'analyse par simulation de chaque type sous le programme PSIM. Cette étude nous a permis d'identifier deux types de convertisseurs :

- Convertisseurs DC-DC non isolés appelés hacheurs qui sont l'axe de notre travail.
- Convertisseurs DC-DC isolés appelés alimentations à découpage.

Dans cette étude nous avons analysé le principe de fonctionnement des hacheurs et leurs utilisations, ainsi que la maîtrise du programme PSIM destiné à ces types d'applications.

Pour les hacheurs non réversibles on distingue deux types : Les hacheurs à liaison directe qui associent deux sources de nature différentes (hacheur série et parallèle) et les hacheurs à liaison indirecte ou à accumulation ; qui associent deux sources de même nature : hacheur à stockage inductif et capacitif.

L'utilité des hacheurs non réversibles est d'abaisser, d'élever, d'abaisser ou d'élever des niveaux de tension ou de courant continu selon la valeur du rapport cyclique.

L'utilité des hacheurs réversibles est d'inverser le sens de parcours de l'énergie par la réversibilité en courant ou en tension ou en courant et en tension permettant à la machine de travailler dans les deux ou les quatre quadrants du plan courant-tension (couple-vitesse) avec deux possibilités de commande (symétrique et alternée).

Finalement on a fait une application qui consiste à commander la vitesse d'un moteur à courant continu en boucle alimenté par un hacheur quatre quadrants. Les interrupteurs sont commandés symétriquement par la modulation par hystérésis. Les résultats de simulation montrent clairement le fonctionnement dans les quatre quadrants ; mais le système n'est pas réversible car le redresseur côté réseau est non réversible (redresseur à diodes).

# **Bibliographie**

## Bibliographie

---

### Bibliographie

- [1] : <https://www.electronique-mixte.fr/formation-pdf/formation-pdf-electronique-de-puissance/cours-17-introduction-generale-sur-l-electronique-de-puissance>
- [2] : **KHELIFI Fateh** « sureté de fonctionnement et fiabilité des circuits de l'électronique de puissance ». Mémoire de magister, Université de Boumerdès, 2008.
- [3] : **Boulakroune Souad** « Commande à vitesse variable d'un moteur à Courant continue alimenté par hacheur Bidirectionnel en courant ». Mémoire de Fin d'étude, université BADJI MOKHTAR ANNABA, 2018.
- [4] : **Maouche Youcef Kechit Said** « Etude et réalisation d'un hacheur série ». Mémoire de Fin d'étude, Université de Tizi-Ouzou, 2016.
- [5] : <https://studylibfr.com/doc/2114956/les-interrupteurs-semi-conducteurs>
- [6] : **MOULFI Mohamed, BEKADA BEN CHAIB OUSSAMA** « Impact CEM des liaisons d'interconnexions dans un système électrique de 100W à base d'une RSIL et un convertisseur dc/dc de type BUCK ». Mémoire de Fin d'étude, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2019.
- [7] : [http://denis.rabaste.free.fr/ressources/cours\\_base/I\\_diodes.pdf](http://denis.rabaste.free.fr/ressources/cours_base/I_diodes.pdf)
- [8] : **HANOUN Brahim** « étude et réalisation d'un hacheur Boost destine à l'implémentation des commandes à base de DSP ». Mémoire de magister, Université DE OUM EL BOUAGHI 2016.
- [9] : **NETTARI Yakoub** « Commandes robustes et intelligentes des convertisseurs DC-DC ». Mémoire de magister, université FERHAT ABBAS — SETIF1, 2014.
- [10] : **Bouzghaya Imed** « Etude d'un Hacheur à Stockage Capacitif ». Mémoire fin d'étude, université Larbi Ben M'hidi-Oum El-Bouaghi, 2014
- [11] : **MAYOUF Somia** « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec une commande vectorielle ». Mémoire fin d'étude, université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2016.
- [12] : <http://www.isetn.rnu.tn/archives/fr/images/documents/cours/Electronique%20de%20puissance%20L2%20S2.pdf>
- [13] : **Ourabi Lassaad** « Support de cours Électronique de puissance » chapitre 1, les convertisseurs continue/continu, les hacheur, I.S.E.T de Bizerte, 1999
- [14] : **ATCHOUM Safa** « Réalisation d'un convertisseur BUCK - MPPT.». Mémoire fin d'étude, université Université LARBI BEN M'HIDI Oum El-Bouaghi, 2017.
- [15] : <https://studylibfr.com/doc/6380337/chapitre-4-hacheurs>
- [16] : **Benaouali brahim elkhalil** « étude et simulation des hacheurs entrelacés ». Mémoire fin d'étude, Université Biskra, 2017.

## Bibliographie

---

- [17] : **Mr GAY SEGUIER** « électronique de puissance. Les fonctions de base et leur principe application » septième Edition 2000
- [18] : **J.P. Ferrieux & F. Forest** « Alimentation à découpage, convertisseurs à résonance », Dunod 3ème Edition, Paris, 1999.
- [19] : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Convertisseur\\_Buck-Boost](https://fr.wikipedia.org/wiki/Convertisseur_Buck-Boost)
- [20] : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Thyristor>
- [21] : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Diode>
- [22] : <http://www.zpag.net/Electroniques/Diode/diodeDes.htm>
- [23] : **Guy seguier, fransic labrique, philipe delarue** « électronique de puissance. Structure, commande, applications » Dunod 10ème Edition , 2015.
- [24] : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Thyristor\\_GTO](https://fr.wikipedia.org/wiki/Thyristor_GTO)
- [25] : <https://www.astuces-pratiques.fr/electronique/le-thyristor-gto-principe-de-fonctionnement>
- [26] : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Transistor\\_%C3%A0\\_effet\\_de\\_champ\\_%C3%A0\\_grille\\_m%C3%A9tal-oxyde](https://fr.wikipedia.org/wiki/Transistor_%C3%A0_effet_de_champ_%C3%A0_grille_m%C3%A9tal-oxyde).
- [27] : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Transistor\\_bipolaire](https://fr.wikipedia.org/wiki/Transistor_bipolaire)
- [28] : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Transistor>
- [29] : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Transistor\\_bipolaire\\_%C3%A0\\_grille\\_isol%C3%A9e](https://fr.wikipedia.org/wiki/Transistor_bipolaire_%C3%A0_grille_isol%C3%A9e)
- [30] : **Philippe Barrade** « électronique de puissance- méthodologie et convertisseur élémentaires » Édition presse électrotechniques et universitaire romandes,2006
- [31] : **Guy Chateigner , Michel Boès ,Daniel Bouix , Jacques Vaillant ,Daniel Verkindère**  
« MANUEL DE GÉNIEÉLECTRIQUE » Edition Dunod.2007.
- [32] : **BEGAG Souhila** « Commande en Courant par Hystérésis Numérique pour les Systèmes de l'électronique de Puissance ». Mémoire de magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF, 2008.
- [33] : **Mr ZEMOURI AZEDDINE** « ETUDE EXPERIMENTALE D'UN CONVERTISSEUR DC/DC CONTROLER PAR UNE COMMANDE ROBUSTE ». Mémoire de magister, l'Université de Batna, 2014.
- [34] : **Thierry LEQUEU** « Cours d'électronique de puissance, IUT GEII, » Mars 2005.
- [35] : **Bougandoura Abdelwahab** « Etude sur la Commande du Hacheur Quatre Quadrants.». Mémoire fin d'étude, université Université Larbi Ben Mhidi Oum El-Bouaghi, 2013.
- [36] : **C Glaize** « cours : propriétés générales de la variation de vitesse des machines électriques » université Montpellier 2, mars 2005

## Bibliographie

---

[37] : <https://nicolaspertot-sii.jimdofree.com/app/download/11076056721/Rappels+MCC+et+hacheur+profs+.pdf?t=1496406251>

[38] : **M<sup>r</sup>. FILALI Jugurta** « Étude et calcul d'un système d'entraînement électrique d'un mécanisme de levage ». Mémoire de magister, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU, 2013.

[39] : **Ghania Boukerche** « Etude et Synthèse d'un Contrôleur PI et Application » mémoire de master, Université Badji Mokhtar-Annaba 2017.

[40] : **Mohamed Talel CHEBBAH** « ÉTUDE ET SIMULATION D'UN CONVERTISSEUR MULTINIVEAUX TYPE PUC » mémoire de master, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC 2014.

[41] : **F.Mekri** « Commande robuste des conditionneurs Actifs de puissances » thèse Doctorat en sciences, USTO Oran, 2007.

[42] : **DAILI YACINE** « contrôle de la Fréquence de Commutation des Hystérésis Utilisés dans les Commandes d'une Machine à Induction » thèses magister,2007.

[43] : **KAREB Malik ; GADI Lysa** « Etude et implémentation d'une commande PID en utilisant le PIC18F2550 pour le contrôle de vitesse d'un MCC » Mémoire de Fin d'Etudes, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU, 2016.

[44] : **ADGHAR Amokrane ; HADDAD Abbas ; NAIT SIDENNAS Hamid** « Etude de la commande d'une machine à courant continu pilotée par un PC » Mémoire de Fin d'Etudes, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU, 2010.

[45] : **M<sup>elle</sup> MAMERI Sabrina ; M<sup>r</sup> LEGHIMA Massinissa Hamid** « Asservissement de vitesse d'un moteur à courant continue » Mémoire de Master, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU, 2018.