

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE IENTIFIQUE



UNIVERSITE DE M'SILA  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME  
D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE ELECTROTECHNIQUE

**OPTION : ELECTROMECHANIQUE**

## Thème

---

**UTILISATION D'UN CONVERTISSEUR QUASI-RESONNANT  
DANS UN ENTRAINEMENT ELECTRIQUE**

**« Etude et simulation »**

---

Proposé et dirigé par :

*M<sup>me</sup>*. BELOUNIS Ouassila

Présenté par :

- BENNACEUR Raouf

-ACHIKA Nadir

- IBRIR Amir

Année Universitaire 2011-2012

# Remerciements

*Nous tenons à remercier tout premièrement **Dieu** le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous adonné durant toutes ces longues années.*

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreuse **M<sup>me</sup> BELOUNIS Ouassila** pour avoir d'abord proposé ce thème, pour suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils.*

*Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidés à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.*

*Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département d'Electrotechnique qui ont contribués à notre formation*

*Nos sincères remerciements à tous les membres du jury qui on accepté de juger notre travail.*

*En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral et matériel...*

# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail :*

*A ma très chère mère et mon père*

*A mes sœurs*

*A mes frères*

*A toute ma famille*

*A mes chers amis*

*A tous les amis (es) d'études surtout ceux*

*D'électromécanique*

*Promotion 2012*

*B.RAOUF*

*A.NADIR*

*I.AMIR*

**TABLE DES MATIÈRES**



**INTRODUCTION GENERALE.....01**

**CHAPITRE I :                      LES FONCTIONS INTERRUPTEURS**

I.1- Introduction.....4  
I.2- Les interrupteurs réels de puissance .....5  
    I.2.a-Diode .....5  
    I.2.b-Thyristor.....6  
    I.2.C-Thyristor GTO .....8  
    I.2.d- Transistor .....9  
I.3- Interrupteur a 3 segments bidirectionnels en courant.....11  
    I.3.a- Fonction « thyristor RCT » .....11  
    I.3.b-Fonction « thyristor dual » .....12  
I.4- Interrupteur a 3 segments bidirectionnels en tension.....13  
    I.4 .a- Thyristor.....13  
    I.4 .b- Thyristor GTO.....13  
    I.4 .c- GTO - diode « en série ».....14  
    I.4.d- Fonction « RCT dual » .....14  
I.5 -Chois des composants semi-conducteurs.....14  
I .6 -Conclusion .....15

**CHAPITRE II :                      LES COMMUTATIONS**

II.1-Introduction.....16  
II.2-Représentation des sources.....16  
    II.2.1- Réversibilités des sources.....18  
    II.2.2- Amélioration ou changement de nature d'une source.....19  
        II.2.2.a-Amélioration de la nature d'une source..... 19  
        II.2.2.b-Changement de nature d'une source.....19  
    II.2.3- Règles de connexion .....20  
        II.2.3.a- Une source de tension.....20  
        II.2.3.b-Une source de courant.....21  
II.3- La commutation dure .....21  
II.4-Adoucissement de commutation.....26  
    II.4.1- Circuit d'aide à la commutation.....28  
    II.4.2-Cas des interrupteurs à fermeture ou ouverture commandée.....28

## **TABLE DES MATIERES**

---

II.4.2.a- Influence d'une inductance en série avec un interrupteur.....	28
a) Fermeture commandée.....	29
b) ouverture commandée .....	30
II.4.2.b- Influence d'une capacité en parallèle avec un interrupteur.....	30
a) Fermeture commandée.....	30
b) ouverture commandée .....	31
II.4.2.c- Conséquence sur les conditions de commutation.....	32
II.4.3- Cas des interrupteurs à fermeture et ouverture commandée.....	33
II.5- Commutation douce.....	35
II.6- Conclusion.....	36

### **CHAPITRE III :**

#### **PRESENTATION DES STRUCTURES DES CONVERTISSEURS CONTINU-CONTINU**

III.1-Introduction.....	37
a)- Hacheur à thyristor.....	38
b)- Hacheur à transistor .....	39
III.2- Les hacheur à liaison directe.....	39
III.2.1- Hacheur série (buck converter).....	40
III.2.2- Hacheur Parallèle (boost converter).....	41
III.2.3- Hacheur réversible en courant (Hacheur deux quadrants ou en demi-Pont)....	42
III.2.4- Hacheur réversible en tension.....	44
III.2.5- Hacheur réversible en tension et en courant (hacheur quatre quadrants).....	46
III.3- Les hacheurs à liaison indirecte .....	49
III.3.1- Hacheur série (ou dévolteur).....	49
III.3.1.a- Conduction continue du courant $i_L$ .....	50
III.3.1.b- Conduction discontinue du courant $i_L$ .....	51
III.3.1.c-Formes d'ondes.....	51
III.3.2- Hacheur parallèle (ou survolteur).....	52
III.3.2-a : conduction continue.....	53
III.3.2.b- Formes d'ondes.....	54
III.3.3-Comparaison entre les hacheurs série et parallèle.....	54
III.4- Résultat de simulation.....	55
III.4.1- Hacheur série .....	55
a) conduction continue.....	55
b) conduction critique.....	56
c) conduction discontinue.....	57
III.4.2- Hacheur parallèle.....	58
III.4.3- Hacheur réversible en courant (deux quadrant).....	59
III.4.4- Hacheur quatre quadrants.....	60
III.5-Conclusion.....	61

**CHAPITRE IV :**

**LES CONVERTISSEURS CONTINU-CONTINU A INTERRUPTEURS  
RESONNANTS**

IV.1- Introduction.....	62
IV.2- Les interrupteurs résonnants.....	62
IV.2.1- Interrupteurs résonnants à commutation douce à l'ouverture (mode ZCS).....	63
IV.2.1.a- Fonction « Thyristor résonnant ».....	63
IV.2.1.b- Fonction " RCT résonnant ".....	64
IV.2.2- Interrupteurs résonnants à commutation douce à la fermeture (MODE ZVS)..	64
IV.2.2.a- Fonction "Thyristor dual résonnant" .....	65
IV.2.2.b- Fonction "RCT dual résonnant".....	65
IV.3-Interrupteurs résonnants bicommandés.....	66
IV.3.1-Interrupteurs bicommandés résonnants en courant.....	67
IV.3.1.a-Interrupteur principal du type thyristor.....	67
IV.3.1.b- Interrupteur principale du type RCT.....	68
IV.3.2-Interrupteurs bicommandés résonnants en tension.....	68
IV.4- Cellule de commutation à interrupteur résonnant.....	69
IV.4.1- Ouverture au passage par zéro du courant (ZCS).....	69
IV.4.1.a-Cellule élémentaire de commutation à thyristor résonnant.....	69
IV.4.1.b-Cellule élémentaire de commutation à RCT résonnant.....	70
IV.4.2- Fermeture au passage par zéro de la tension (ZVS).....	71
IV.4.2.a-Cellule élémentaire de commutation à thyristor dual résonnant.....	71
IV.4.2.b-Cellule élémentaire de commutation RCT dual résonnant.....	71
IV.5- Convertisseurs continu-continu quasi-résonnant en mode ZCS.....	72
IV.5.1- Hacheur série quasi-résonnant en mode ZCS.....	72
IV.5.1.a-Montage avec thyristor résonnant .....	72
IV.5.1.b-Montage avec RCT résonnant.....	73
IV.5.2- Hacheur parallèle quasi-résonnant en (Mode ZCS).....	74
IV.5.2.a-Montage avec thyristor résonnant (unidirectionnel).....	74
IV.5.2.b-Montage avec RCT résonnant (bidirectionnel).....	75
IV.6- Convertisseurs continu-continu quasi-résonnants en mode (ZVS).....	75
IV.6.1- Hacheur série quasi-résonnant en mode ZVS.....	76
IV.6.1.a-Montage à thyristor dual résonnant (unidirectionnel).....	76
IV.6.1.b-Montage à « RCT dual résonnant » .....	76
IV.6.2- Hacheur parallèle quasi-résonnant en mode ZVS.....	77
IV.6.2.a-Montage à thyristor dual résonnant.....	77
IV.6.2.b-Montage à RCT dual résonnant.....	78
IV.7 Résultat de simulation.....	79
IV.7.1 Hacheur série à RCT résonant.....	79
a) Conduction continue.....	79

## **TABLE DES MATIERES**

---

b) Conduction discontinue.....	81
IV .8-Conclusion.....	82

### **CHAPITRE V :                  **ETUDE DE SYSTEME EN BOUCLE FERMEE****

V.1-Introduction.....	83
V.2-Caractéristique générale d’un système asservi.....	83
V.2.1-Système en boucle ouverte.....	84
V.2.2-Système en boucle fermée.....	85
V.2.3-Performance d’un système asservi.....	85
V.3-La régulation.....	86
V.3.1- Régulateur.....	86
V.3.2-Les régulateurs classiques analogiques (P-I-PI).....	86
V.3.2.a-Régulation à action proportionnelle (P).....	86
V.3.2.b-Régulation à action intégrale (I).....	87
V.3.2.c-Régulation à action (PI).....	88
V.3.3-Rôle du régulateur .....	89
V.3.4-La régulation en cascade.....	89
V.3.4.a-Fonction de transfert du moteur.....	91
V.3.4.b-Calcul des paramètres statiques du moteur.....	93
V.3.4.c-Résultat de simulation.....	94
V.4-Le convertisseur utilise.....	95
V.4.1-La Fonction de transfert de convertisseur.....	96
V.4.2-Schéma bloc de l’ensemble Convertisseur-Moteur à courant continu.....	97
V.5-Etude de la boucle de courant.....	97
V.5.1-Capteur de courant d’induit.....	97
V.5.2-Synthèse de la boucle de courant.....	99
V.5.3-Détermination des paramètres du régulateur de courant.....	99
V.6- Etude de la boucle de vitesse.....	100
V.6.1-Capteur de vitesse.....	101
V.6.2-Synthèse de la boucle de vitesse: Le schéma bloc final du moteur.....	101
V.6.3-Détermination des paramètres de régulateur de vitesse.....	102
V.7-Résultat de simulation.....	103
V.8-Conclusion.....	104
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>105</b>
<b>ANNEXE.....</b>	<b>106</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>107</b>

**Tables des figures**

**CHAPITRE I**

Figure I-1: Représentation schématique et la caractéristique statique d'une diode .....06  
Figure I-2: Thyristor.....07  
Figure I-3: Thyristor GTO.....08  
Figure I-4 : Transistor de puissance.....09  
Figure I-5 : Les caractéristiques des interrupteurs.....11  
Figure I-6 : Le thyristor à conduction inverse (RCT).....12  
Figure I-7: Thyristor dual.....12  
Figure I-8: Thyristor.....13  
Figure I-9: Thyristor GTO.....13  
Figure I-10 :Interrupteur 3 segments bidirectionnel en tension GTO.....14  
Figure I-11 :Interrupteur 3 segment à RCT dual.....14  
Figure I-12:Les performances électriques ET fréquentielles pour chaque famille  
de composants .....15

**CHAPITRE II**

Figure II-1 : Représentation des sources .....17  
Figure II-2 : Formes des tensions parfaites.....18  
Figure II-3 : Changement de nature d'une source .....20  
Figure II-4 : Cellule élémentaire de commutation.....21  
Figure II.5 : Les formes d'ondes de  $v_k, i_k$  et  $v_{k'}, i_{k'}$ . Pour les deux cas  
de commutation.....23  
Figure II-6 : Commutation  $K \rightarrow K'$  avec U et I positif .....24  
Figure II-7 : Commutation  $K \rightarrow K'$  avec  $U < 0 ; I > 0$  .....24  
Figure II-8 : La nature des commutations.....24  
Figure II-9 : Commutation dure.....26  
Figure II-10: Commutation adoucie.....27  
Figure II-11 : Effet d'une inductance en série avec un interrupteur.....29  
Figure II-12 : Les variations de  $v_k, i_k$  et  $v_{k'}, i_{k'}$  pendant fermeture de K.....29  
Figure II-13 : Effet d'une capacité en parallèle avec un interrupteur.....30  
Figure II-14 : Les variations de  $v_k, i_k$  et  $v_{k'}, i_{k'}$  pendant l'ouverture de K.....31  
  
Figure II-15 : Effet de circuit d'aide à la commutation CALC.....33  
Figure II-16 : Schéma classique de snubber dissipatif..... 33  
Figure II-17 : Schémas équivalents à la fermeture et à l'ouverture.....34  
Figure II-18 : Commutation douce.....35

### **CHAPITRE III**

Figure III-1 : Convertisseur DC/ DC.....	37
Figure III-2 : Hacheur à thyristor .....	38
Figure III-3 : Hacheurs à transistor.....	39
Figure III-4 : Principe du hacheur série .....	40
Figure III-5 : Principe du hacheur parallèle.....	41
Figure III-6 : Principe du hacheur deux quadrants.....	42
Figure III-7 : Schéma équivalent au principe du hacheur deux quadrants.....	43
Figure III-8 : Allure des caractéristiques $E'$ ( $I_s$ ) ou $N(C)$ .....	44
Figure III-9 : Principe de hacheur réversible en tension.....	45
Figure III-10 : Forme de la tension et de courant .....	45
Figure III-11 : Principe du hacheur quatre quadrants .....	46
Figure III-12 : Schéma équivalent au principe du hacheur quatre quadrants .....	47
Figure III-13: Allure des caractéristiques $E'$ ( $I'$ ) ou $N(C)$ .....	48
Figure III-14 : Convertisseur abaisseur de tension.....	50
Figure III-15 : Formes d'ondes de la conduction continue et discontinue pour un hacheur série .....	52
Figure III-16 : Convertisseur élévateur de tension.....	53
Figure III-17: Formes d'ondes de la conduction continue et discontinue pour hacheur parallèle .....	54
Figure III-18 : Schéma de bloc d'un hacheur série.....	55
Figure III-19 : Courant et tension délivrée par un hacheur série (conduction continue) .....	56
Figure III-20 : Tension et courant délivrée par un hacheur série (conduction critique) série (conduction continue).....	56
Figure III-21 : Courant et tension délivrée par un hacheur série (conduction discontinue) série (conduction discontinue).....	57
Figure III-22 : Schéma de bloc d'un hacheur parallèle.....	58
Figure III-23 : Tension et courant délivrée par un hacheur parallèle .....	58
Figure III-24 : Schéma de bloc d'un hacheur réversible en courant (deux quadrant) .....	59
Figure III-25 : tension et courant délivrée par un hacheur réversible en courant.....	59
Figure III-26 : Schémas de bloc d'un hacheur quatre quadrants.....	60
Figure III-27 : Tension et courant délivrée par un hacheur quatre quadrants .....	61

### **CHAPITRE IV**

Figure IV-1 : Interrupteur résonnant à commutation douce à l'ouverture mode ZCS .....	63
Figure IV-2 : Interrupteur à commutation à thyristor résonnant (Mode ZCS).....	64

Figure IV-3 : Interrupteur à commutation douce à RCT Résonnant (MODE ZCS) .....	64
Figure IV-4 : Interrupteur résonnant à commutation douce à la Fermeture (Mode ZVS) .....	65
Figure IV-5 : Interrupteur résonnant à commutation douce à Thyristor dual résonnant (mode ZVS).....	65
Figure IV-6 : Interrupteur résonnant à commutation Douce à RCT dual résonnant (mode ZVS).....	66
Figure IV-7 : Les interrupteurs résonnants bicommandés(en courant et en tension).....	67
Figure IV-8: Montage et les formes d'ondes d'Interrupteur principal du type thyristor.....	68
Figure IV-9 : Montage et les formes d'ondes d'interrupteur principale du type RCT .....	68
Figure IV-10: Interrupteurs bicommandés résonnants en tension avec interrupteur principal du type RCT dual.....	69
Figure IV-11 : Cellule élémentaire de commutation à thyristor résonnant.....	70
Figure IV-12 : Cellule élémentaire de commutation à RCT résonnant.....	70
Figure IV-13 : Cellule élémentaire de commutation à thyristor dual résonnant .....	71
Figure IV-14 : Cellule élémentaire de commutation à RCT dual résonnant .....	72
Figure IV-15 : Hacheur série quasi -résonnant à thyristor Résonnant en mode ZCS. ....	72
Figure IV-16 : Les variations de $U_{S\text{ MOY}}/U$ en fonction de $f/f_0$ .....	72
Figure IV-17 : Hacheur série quasi-résonnant en mode ZCS a' RCT Résonnant. ....	73
Figure IV-18 : Les variations de $U_{S\text{ MOY}}/U$ en fonction de $f/f_0$ .....	73
Figure IV-19 : Hacheur parallèle quasi-résonnants en Mode ZCS .....	74
Figure IV-20 : Hacheur parallèle quasi .résonnant à Thyristor résonnant en mode ZCS .....	74
Figure IV-21 : Les variations de $U_{S\text{ MOY}}/U$ en fonction de $f/f_0$ .....	74
Figure IV-22 : Hacheur parallèle quasi-résonnant à RCT Résonnant en mode ZCS .....	75
Figure IV-23 : Les variations de $U_{S\text{ MOY}}/U$ en fonction de $f/f_0$ .....	75
Figure IV-24 : Hacheur quasi-résonnant à Thyristor dual résonnant en mode ZVS .....	76
Figure IV-25 : les variations de $U_{S\text{ MOY}}/U$ en fonction de $f/f_0$ .....	76
Figure IV -26 : Hacheur série quasi-résonnant en mode ZVS à RCT dual résonnant. ....	77
Figure IV-27 : Lles variations de $U_{S\text{ MOY}}/U$ en fonction de $f/f_0$ .....	77
Figure IV-28 : Hacheur parallèle quasi-résonnant en mode ZVS à thyristor dual résonnant .....	77
Figure IV-29 : Les variations de $U_{S\text{ MOY}}/U$ en fonction de $f/f_0$ .....	77
Figure IV-30 : Hacheur parallèle quasi-résonnant en mode ZVS à RCT dual résonnant .....	78
Figure IV-31 : Les variations de $U_{S\text{ MOY}}/U$ en fonction de $f/f_0$ .....	78
Figure IV-32: Schéma de bloc d'un hacheur série quasi-résonnant en mode ZCS à RCT résonnant .....	79
Figure IV-33: Tension et courant délivrés par un hacheur série à RCT résonnant (conduction continue) .....	80
Figure IV-34: tension et courant délivrés par un hacheur série à RCT résonnant(conduction discontinue) .....	81

## **CHAPITRE V**

Figure V-1 : Organisation fonctionnelle d'un système asservi.....	84
Figure V-1 : Organisation fonctionnelle d'un système asservi.....	85
Figure V-3 : Schéma de bloc et électronique d'un régulateur P.....	87
Figure V-4 : Schéma de bloc et électrique d'un régulateur I.....	88
Figure V-5 : Schéma de bloc et électrique d'un régulateur PI.....	89
Figure V-6 : Réglage en cascade.....	90
Figure V-7 : Structure globale d'une régulation en cascade d'un entraînement à courant continu.....	90
Figure V-8 : Schéma bloc du système (Moteur à courant continu).....	93
Figure V-9 : Démarrage à vide du MCC pour ( $U_d = 220V$ , $C_r = 0$ ).....	94
Figure V-10 : Démarrage en charge avec perturbation du MCC pour ( $U_d = 220V$ , $C_r = 2,127N.m$ ).....	94
Figure V-11 : Détermination du coefficient du convertisseur statique " $K_{con}$ ".....	96
Figure V-12 : Schéma fonctionnel de l'association (Hacheur-Moteur).....	97
Figure V-13 : Schéma bloc de régulation de courant.....	99
Figure V-14 : Schéma bloc final de l'association convertisseur – MCC.....	101
Figure V-15 : Schéma bloc du régulateur en cascade.....	103
Figure V-16 : Démarrage à vide de l'ensemble (Régulateur PI – Hacheur – MCC).....	104
Figure V-17 : Démarrage en charge avec perturbation de l'ensemble (Régulateur PI – Hacheur – MCC).....	104

**NOTATIONS**

**Symboles**

A	: Anode.
A, B, C, D	: Les branches des segments.
$a$	: Fermeture commandé.
$b$	: Ouverture commandé.
C	: Collecteur.
$C_r(N.m)$	: Couple résistant.
$C_m(N.m)$	: Couple moteur.
D	: Diode.
E	: Emetteur.
E(V)	: la force électromotrice.
$f(Hz)$	: La fréquence.
G	: Gâchette.
$G_1 \dots \dots G_7$	: Des Fonctions de transfert.
$G_R$	: Fonction de transfert de régulateur.
$G_{CC}$	: Fonction de transfert du capteur de courant.
$G_{CON}$	: Fonction de transfert de convertisseur.
$G_{cr}$	: Fonction de transfert de régulateur de courant.
$G_{cv}$	: Fonction de transfert de capteur de vitesse.
$i$	: Valeur instantané de courant.
$i_B$	: Courant de base.
$I_d$	: Courant continu d'induit.
$I_{dn}$	: Courant continu nominal.
J	: Moment d'inertie.
K	: Interrupteur.
K	: Cathode.
$K_P$	: Constante proportionnelle.
$K_i$	: Constante intégrale.
$k$	: Coefficient d'amplification de régulateur de courant.
$K_{CC}$	: Facteur de transfert pour un convertisseur de courant.
$K_{con}$	: Coefficient de convertisseur statique.
$K_{cv}$	: Facteur de transfert du capteur de vitesse.
$K_{RC}$	: Facteur de régulateur de courant.
$K_{Rv}$	: Facteur de régulateur de vitesse.
$K_m$	: Coefficient électromécanique.
L	: Inductance.
$L_a$	: Inductance d'induit.
M	: Moteur à courant continu.
N	: Vitesse de rotation (tr/min).

## NOTATIONS

---

$R_a$	: Résistance d'induit du moteur.
$R(\Omega)$	: Résistance.
$P_n$	: Puissance nominale
$T_{cc}$	: Constante de temps de capteur de courant.
$T_{cm}$	: Constante de temps de convertisseur de courant.
$T_e$	: Constante de temps électrique du moteur.
$T_i$	: Constante du temps d'intégration.
$T_m$	: Constante de temps électromécanique
$T_{con}$	: Constante de temps d'hacheur.
$T$	: Période de hachage.
$Th$	: Thyristor.
$U$	: Tension de d'entrée.
$U_{moy}$	: Tension moyenne.
$U_{cm}$	: Tension de la commande.
$U_d$	: Tension continue d'induit.
$u$	: Tension d'entrée.
$u'$	: Tension de sortie.
$V_{CE}$	: La tension aux bornes considérées.
$W_{cbi}$	: La fréquence de coupure de boucle de courant.
$w_n(rad/s)$	: Vitesse de rotation nominale (rad/s).
$\alpha$	: Rapport cyclique de hacheur.
$\varepsilon$	: Erreur statique.
$\tau_1 et \tau_2$	: Les constantes de temps des régulateurs de courant et de vitesse
$\tau, \tau_a, \tau_b$	: Les constantes de temps de méthode de l'optimum symétrique.
$\tau_{cc}$	: Constante de temps du capteur du courant.
$\tau_e$	: Constante de temps électrique.
$\omega_{coi}$	: La pulsation de coupure.
$\eta$	: Farceur de mérite.
$\phi$	: Flux magnétique.

## NOMENCLATURE

**GTO:** Gate-Turn-Off -thyristor.

**IGBT:** Insulated-Gate-Bipolar-Transistor.

**MOS:** Metal-Oxide-Semiconductor.

**RCT:** Reverse conducting thyristor

**ZCS:** *Zero current switching.*

**ZVS:** *Zero current switching.*

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'augmentation des puissances commutées, la facilité de contrôle et le coût réduit des composants semi-conducteurs de puissance depuis moins d'une dizaine d'années ont conduit à l'utilisation de convertisseurs de puissance dans un nombre d'applications toujours croissant. Cette montée en puissance a également ouvert un champ de nouvelles topologies pour les applications en électronique de puissance. Pour bien comprendre la faisabilité de ces nouvelles applications, il est essentiel de décrire les caractéristiques des semi-conducteurs de puissance utilisés.

Le principe des convertisseurs consiste à faire commuter des courants entre mailles adjacentes, ce qui nécessite l'emploi de composant permettant de réaliser la fonction interrupteur. Idéalement, l'interrupteur fermé aura une tension pratiquement nulle à ses bornes alors que le courant sera fixé par le reste du dispositif. En revanche, l'interrupteur ouvert aura une tension imposée par l'extérieur à ses bornes. On désignera les actions (blocage ou amorçage) commandées (grâce à un signal électrique extérieur) des actions spontanées.

Les convertisseurs continu-continu ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. La tension continue de départ peut être un réseau alternatif redressé et filtré, une batterie d'accumulateurs, une alimentation stabilisée...

On distingue deux types de convertisseurs continu-continu. Ceux qui sont non isolés, que l'on appellera hacheurs, et ceux qui comportent un transformateur assurant l'isolation galvanique, que l'on appelle alimentations à découpage.

L'une des principales tendances de la conversion d'énergie en ce moment est l'accroissement des fréquences de commutation. Lorsque l'on souscrit à cette tendance, en utilisant les convertisseurs à commutation commandée, on se heurte rapidement, entre autre problèmes, à l'accroissement parallèle des pertes par commutation dans les interrupteurs. Une première solution consiste à doter ces interrupteurs de circuits d'aide à la commutation (CALC), toute en conservant le principe des structures précédentes. Une

deuxième solution réside dans définition de convertisseurs dans lesquels les interrupteurs sont naturellement soumis à un régime de commutation à faibles pertes.

Le moteur à courant continu longtemps été considéré comme le moteur le mieux adapté au fonctionnement à vitesse variable, parce qu'il suffit d'agir sur la tension d'alimentation de l'induit pour régler la vitesse de rotation ou le couple électromagnétique.

L'asservissement d'un moteur à courant continu nécessite l'utilisation d'un convertisseur de puissance réversible en courant et en tension permettant ainsi l'accélération et le freinage dans les deux sens de rotation. Les structures des régulations sont choisies pour répondre aux plusieurs nécessités il convient d'abord de régler ou d'asservir la machine de façon à imposer à la charge la vitesse, la position ou le couple désirés tout en assurant des fonctions supplémentaires importantes concernant la sécurité tel que la limitation « active » du courant maximale.

Le présent travail concerne l'utilisation des convertisseurs quasi-résonnants dans un entraînement électrique. Pour ce faire on a adopté le plan de travail constitué de cinq chapitres organisés comme suite :

Le premier chapitre nous présente les fonctionnements et les caractéristiques des semi-conducteurs de puissance. Les éléments non commandables (diode), et les éléments commandables à l'ouverture ou à la fermeture (thyristor), ainsi les éléments commandables à l'ouverture et à la fermeture (thyristor GTO, transistor IGBT).

Au second chapitre on étudiera comment caractériser les générateurs et les récepteurs par rapports aux commutations, ainsi les déroulements et les types des commutations (dure, adoucie, douce).

Le troisième chapitre nous présente les diverses structures des convertisseurs continu-continu sans transformateur intermédiaire, avec une étude et simulation des différents types des hacheurs.

Le quatrième chapitre est consacré aux différents types des interrupteurs résonnants, propriétés et leurs fonctionnements. Aussi les convertisseurs « quasi-résonnant » avec une partie de simulation.

Dans le dernier chapitre on fera l'étude du système en boucle fermée « hacheur-moteur à courant continu », après le calcul des paramètres du régulateur (type PI), du

courant et de vitesse, on procède à la simulation du de l'ensemble à base des schémas blocs.

Nous finirons ce travail par une conclusion générale qui résume l'ensemble des résultats obtenus. On terminera par une annexe (les paramètres de la machine à courant continu), ainsi qu'une bibliographie indiquant quelques sources d'informations utilisées.

The page features three decorative blue circles of varying sizes, each composed of concentric circles in different shades of blue. Two thin blue lines intersect at the top left, forming a large 'V' shape that frames the text and circles. The circles are positioned in the top right, middle right, and bottom right areas of the page.

# CHAPITRE I

## LES FONCTIONS INTERRUPTEURS



**LES FONCTIONS INTERRUPTEURS**

## **I.1- INTRODUCTION**

L'électronique de puissance utilise des semi-conducteurs fonctionnent en « interrupteurs », un « interrupteur » peut être formé par un seul semi-conducteur ou par un groupement en série ou en parallèle de plusieurs semi-conducteurs. Pour montrer le rôle qu'un « interrupteur » peut remplir, on indique dans le plan [tension  $v$  aux bornes-courant  $i$  traversant l'interrupteur] :

- La branche de caractéristique où il peut travailler,
- Les changements de branches qu'il peut assurer.

Un interrupteur semi-conducteur, comme un interrupteur mécanique, équivaut à une résistance très faible lorsqu'il est fermé, ou très forte lorsqu'il est ouvert, mais toujours positive, son point de fonctionnement ne peut se situer que dans les quadrants 1 et 3 du plan  $[v, i]$  ou  $v/i$  est positif. Le passage de l'un de ces quadrants à l'autre ne peut se faire qu'en passant par le point O.

Puisqu'un interrupteur dynamique fonctionne par tout ou rien, en dehors des commutations son point de fonctionnement ne peut se déplacer que sur les branches que les segments suivants :

- ❖ OA, fermé avec un courant direct ( $i > 0, v > 0$  très faible),
- ❖ OB, ouvert avec une polarisation directe ( $v > 0, i > 0$  très faible),
- ❖ OC, fermé avec un courant inverse ( $i < 0, v < 0$  très faible),
- ❖ OD, ouvert avec une polarisation inverse ( $v < 0, i < 0$  très faible).

La caractéristique statique d'un interrupteur est formée des segments sur lesquels son point de fonctionnement peut se déplacer. Si l'interrupteur est commandable à la fermeture par action sur l'électrode de commande, on peut faire passer très rapidement son point de

fonctionnement du segment OB au segment OA (ou de OD à OC).

S'il est commandable à l'ouverture, on peut faire passer très rapidement son point de fonctionnement de OA à OB (ou de OC à OD).

En première approximation, lors de l'étude des circuits, on suppose les interrupteurs Parfaits:

- On néglige la chute de tension à l'état fermé,
- On néglige le courant de fuite à l'état ouvert,
- On suppose que les changements d'état sont instantanés. [3]

Avant d'aborder l'étude des montages à semi-conducteurs quelques rappels sur les Semi-conducteurs, nous indique simplement les caractéristiques à l'état passant et à l'état bloqué et indiquons ce qui permet de passer d'un état à l'autre.

## **I.2- Les interrupteurs réels de puissance**

### **I.2.a-Diode**

La diode est un élément semi-conducteur non commandable, présente deux bornes : l'anode A et la cathode K. son fonctionnement, lui est totalement imposé par le circuit dans lequel elle est insérée. [5]

Quand ce circuit tend à faire passer un courant dans le sens direct ou perméable c'est-à-dire de A vers K, la diode est conductrice ou passante.

Quand ce circuit applique une tension négative ou inverse à ses bornes, la diode est bloqué ou isolante.

Une diode est essentiellement caractérisée par :

- Le courant direct moyen qu'elle peut écouler,
- La tension maximale qu'elle peut supporter. [3]

La représentation symbolique d'une diode est donnée en figure (I-1-a).

La caractéristique statique d'une diode est donc celle d'un interrupteur unidirectionnel en courant et en tension (figure I-1-b).

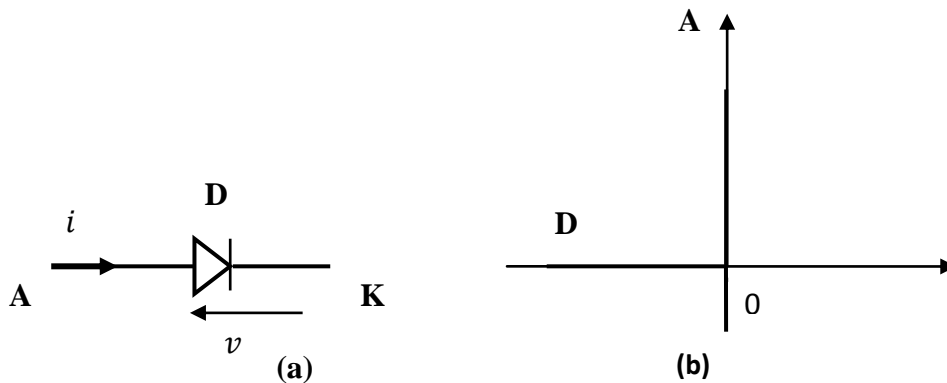


Figure I-1 : Représentation schématique et la caractéristique statique d'une diode

➤ **Caractéristiques de la diode**

En électronique de puissance, on s'intéresse essentiellement aux performances suivantes pour une diode :

- Faible chute de tension à l'état passant ( $f = 1$ );
- Faible courant à l'état bloqué ( $f = 0$ ) ;
- Temps de commutation très faible. [7]

➤ **Domaine d'utilisation**

La diode est très intéressante pour le redressement des signaux alternatifs. Cette fonction se rencontre surtout dans les alimentations continues, mais on l'utilise aussi pour détecter l'amplitude d'une tension (par exemple dans certains amplificateurs à commande automatique de gain). [8]

**I.2.b-Thyristor :**

Un thyristor est un composant semi-conducteur à fermeture commandée, utilisé essentiellement et en électronique industrielle pour le redressement commandé. Outre l'anode A et la cathode K, un thyristor possède une électrode de commande appelée gâchette (notée G), C'est par cette patte que va arriver l'impulsion positive de commande qui va rendre le thyristor passant.

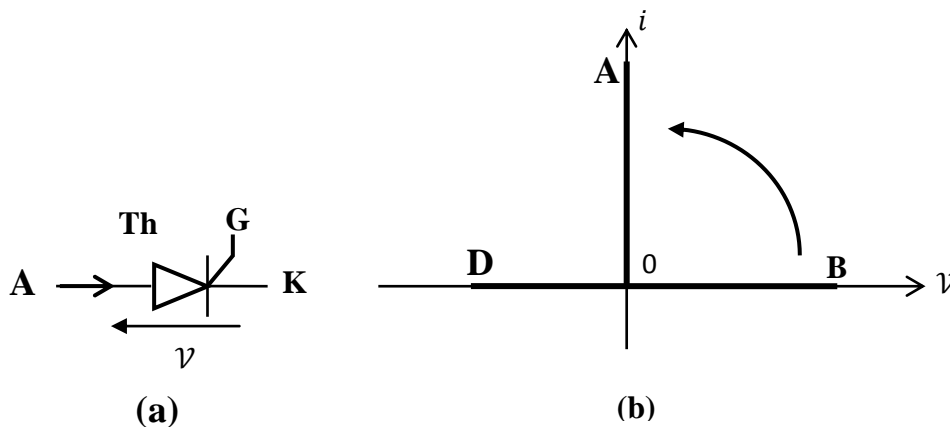
Si la tension entre l'anode et la cathode est négative, le thyristor est bloqué.

Si la tension entre l'anode et la cathode est positive, dès que l'ordre est reçu par la gâchette du thyristor (amorçage), celui-ci laisse passer le courant dans son sens passant, c'est-à-dire, de l'anode vers la cathode, d'où le nom de sa fonction de redresseur commandé. [6]

La figure (I-2-b) montre les trois segments de fonctionnement.

Les thyristors symétriques ont une tension inverse maximale égale à la tension directe, qu'ils peuvent bloquer à courant de gâchette nul. Les thyristors asymétriques ne peuvent tenir en inverse qu'une tension très inférieure à leur tension directe maximale.

La caractéristique statique d'un thyristor est donc celle d'un interrupteur unidirectionnel en courant et en tension. [2]



*Figure I-2 : Thyristor*

➤ **Domaines d'utilisation**

C'est le composant le plus répandu, car le plus ancien, il permet la réalisation de convertisseurs de fortes puissances jusqu'à quelques KW. [5]

Le thyristor peut servir d'interrupteur commandé à la fermeture dans des circuits fonctionnant en continu avec des tensions élevées, C'est souvent le cas pour décharger un condensateur. Deux exemples classiques : le déclenchement d'un flash électronique et le circuit d'allumage électronique d'une voiture.

L'application courante du thyristor en électronique de puissance est le redressement commandé. [8]

I.2.C-Thyristor GTO

Le GTO Thyristor (*Gâche- Turn-Off Thyristor*) est un interrupteur électronique unidirectionnel à fermeture et ouverture commandées, dont la fermeture et l'ouverture peuvent être commandées par la gâchette. Ce composant est surtout destiné à travailler avec des sources de tensions continues. [4]

La figure (I-3) montre le symbole de GTO et les trois segments de sa caractéristique statique de fonctionnement.

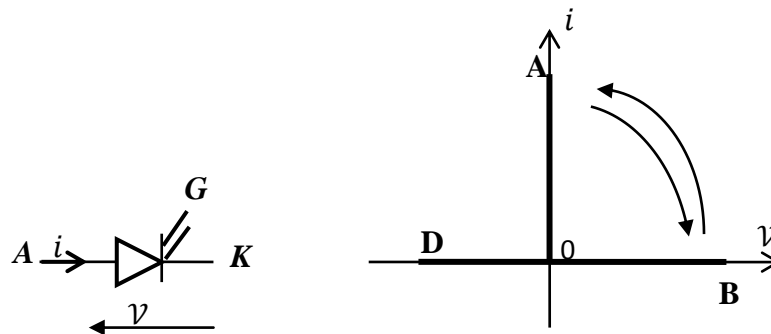


Figure I-3 : Thyristor GTO

Le GTO comme le thyristor ordinaire, peut être symétrique ou asymétrique. La plupart des GTO sont asymétriques car utilisés en parallèle inverse avec une diode.

Quand «  $v$  » est positif, une impulsion positive du courant de gâchette permet de fermer le GTO (passage direct de OB à OA).

Quand il est conducteur, il peut se bloquer spontanément comme une diode quand le circuit dans lequel il est inséré annule le courant qui le traverse, mais une forte impulsion négative du courant de gâchette permet de commander son ouverture (passage direct de OA à OB).

Lors de l'ouverture commandée, pendant la remontée de la tension «  $v$  » positive aux bornes du GTO, le courant «  $i$  » positif ne s'annule qu'assez lentement; il y a ce qu'on appelle un « Courant de queue ».

Aussi le GTO qui constitue le composant à fermeture et ouverture commandées réservé aux très fortes puissances, a-t-il une fréquence de fonctionnement limitée. [3]

La caractéristique statique de thyristor GTO est donc celle d'un interrupteur unidirectionnel en tension et en courant dans la fermeture et l'ouverture peuvent être commandée.

### I.2.d- Transistor

Un transistor est un composant électronique à semi-conducteur qui sert à amplifier le courant ou obtenir un courant quand il est commandé en tension. Il s'agit d'un tripôle actif qui possède trois électrodes. On distingue plusieurs types de transistors :

- Transistors bipolaires (à jonctions) NPN et transistors bipolaires PNP,
- Transistors à effet de champ à canal N ou à canal P,
- Transistors MOSFET, CMOS, HEMT, IGFET, MODFET, TEGFET et MESFET. [6]

Un transistor est formé d'un barreau de semi-conducteur dans lequel on a créé deux jonctions. Deux variantes apparaissent suivant la nature des dopages (P ou N) : le transistor NPN et le transistor PNP.

On représente le transistor par leurs symboles normalisés (figure I-4-a). Les trois bornes sont appelées base(B), émetteur(E) et collecteur(C). Le transistor est un tripôle (élément à trois bornes). [8]

Le transistor de puissance commandable. La commande externe agit sur la fermeture et l'ouverture, le transistor est de type MOS (métal oxyde silicium) ou IGBT (bipolaire à grille isolée). [7]

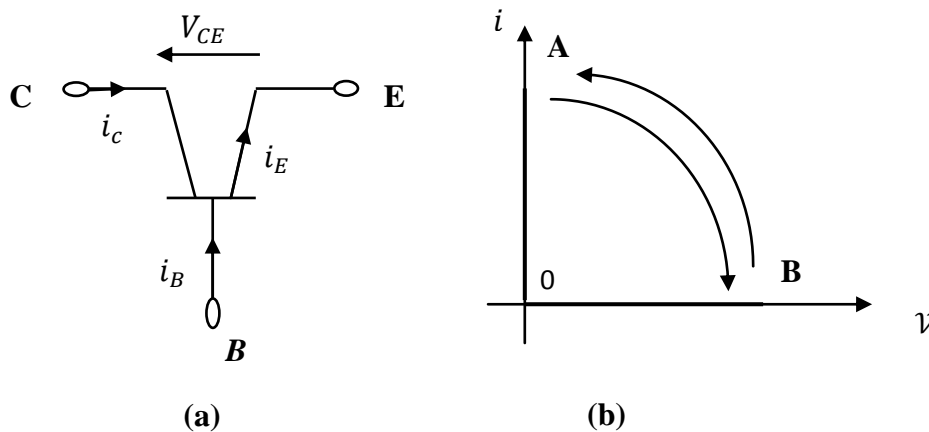


Figure I-4 : Transistor de puissance

#### ➤ Domaine d'utilisation

Le transistor peut remplir de multiples fonctions dans tous les domaines de l'électronique. Toutefois, l'avènement des circuits intégrés a considérablement diminué le rôle des transistors discrets en permettant de simplifier la conception des montages.

Certaines applications restent cependant du ressort des transistors : la puissance, les hautes fréquences. On rencontre également quelques transistors dans les montages à circuits intégrés : ils remplissent des fonctions d'adaptation de niveaux de tension ou de courant. [8] La caractéristique statique des transistors de puissances se réduit donc à deux segments (figure I-4-b).

- Le segment OB correspond à l'état bloqué ou isolant : le courant ou la tension de commande nul ou négatif rend négligeable le courant  $i$  traversant le composant ;
- Le segment OA correspond à l'état passant ou conducteur : le courant ou la tension de commande a une valeur positive suffisante pour minimiser la chute de tension  $v$  dans le composant.

Le courant ou la tension de commande de la fermeture doit être maintenu pendant toute la durée de celle-ci, car il ne s'agit pas d'un amorçage ou d'un blocage par impulsion comme pour les thyristors.

Les composants semi-conducteurs permettent de jouer le même rôle dans un circuit. Suivant la puissance et la fréquence de fonctionnement, on choisit celui qui est le mieux adapté. On distinguera trois fonctions de bases :

- La fonction « diode » assurée par un interrupteur non commandé, noté D et ayant le symbole d'une diode.
- La fonction « thyristor » assuré par un interrupteur à fermeture commandée, noté Th et ayant le symbole d'un thyristor.
- La fonction « transistor » assuré par un interrupteur à fermeture et ouverture commandée, noté T et dont le symbole est celui d'un thyristor qui aurait deux gâchettes, l'une pour commander la fermeture, l'autre pour commander l'ouverture. [3]

Les caractéristiques demandées aux interrupteurs à utiliser pour réaliser le convertisseur peuvent être différentes de celles des composants. On réalise alors ces interrupteurs en associant plusieurs composants.

Les caractéristiques de ces interrupteurs peuvent être à :

- 2 segments : unidirectionnels en courant et en tension,
- 3 segments : unidirectionnel en tension et bidirectionnel en courant ou unidirectionnel en courant et bidirectionnel en tension,
- 4 segments : bidirectionnels en courant et en tension.

On se limitant à l'étude des interrupteurs à 3 segments, pour plus d'information sur les autres types de l'interrupteur consulté. [1]

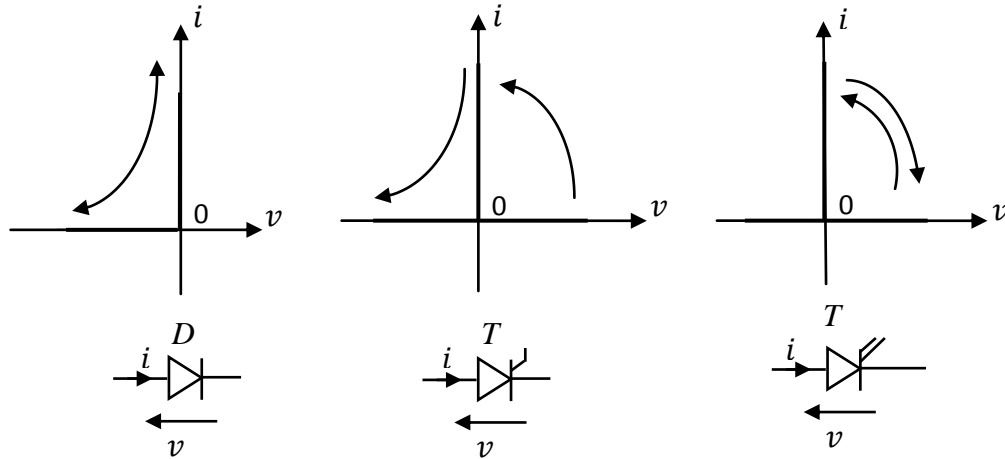


Figure I-5 : Les caractéristiques des interrupteurs

### I.3- Interrupteur a 3 segments bidirectionnels en courant

La diode, le thyristor et le transistor étant tous unidirectionnels en courant, un tel interrupteur ne peut être synthétisé que par l'association de deux composants élémentaires.

#### I.3.a- Fonction « thyristor RCT »

Le thyristor à conduction inverse (reverse conducting thyristor) est un composant qui regroupe un thyristor asymétrique  $Th$  et une diode  $D$ .

Si la fermeture doit être commandée, on peut utiliser le thyristor à conduction inverse,

Qui correspond à l'association d'un thyristor et d'une diode en parallèle inverse.

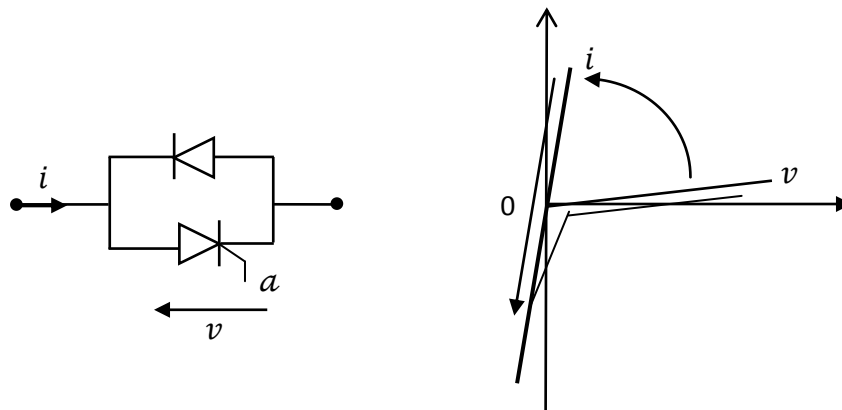


Figure I-6 : Le thyristor à conduction inverse (RCT)

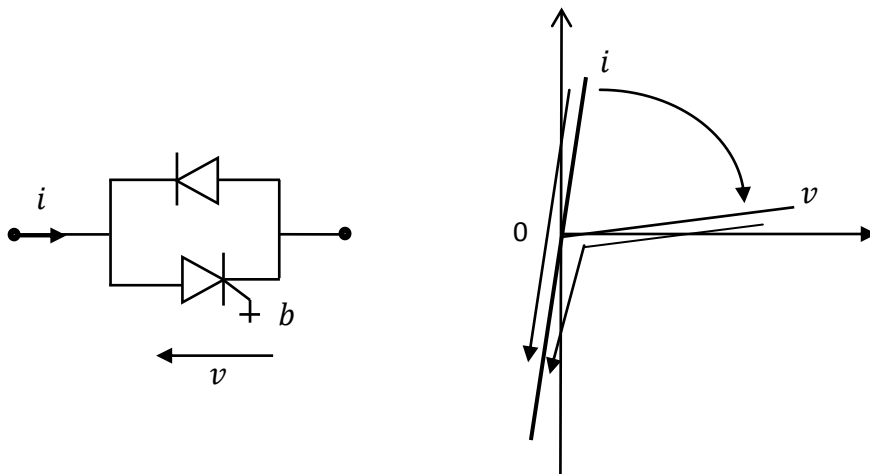
Lorsque l'interrupteur est bloqué, il supporte une tension positive. On peut le rendre conducteur en commandant la mise en conduction du thyristor par une impulsion de gâchette. Lorsque sous l'action de circuit extérieur, le courant de positif devient négatif, le thyristor se bloque et le courant est transféré à la diode. Le retour à l'état bloqué de l'interrupteur correspond à l'ouverture spontanée de la diode. [1]

**I.3.b-Fonction « thyristor dual »**

Si l'ouverture seule doit être commandée, on peut utiliser le thyristor dual. Le thyristor dual, dont le concept est dû à H.FOCH et à son équipe, s'obtient en appliquant au thyristor conventionnel le principe de la dualité, non seulement au niveau des variables électriques.

$v \rightleftharpoons i$  ; Mais aussi au niveau de la commande.

*Fermeture  $\Leftrightarrow$  ouverture ;*



*Figure I-7 : Thyristor dual*

Comme le montre sa caractéristique dans le plan  $[v, i]$  (Figure I-7) ; le thyristor dual doit :

- Pouvoir écouler un courant positif ou négatif,
- Se fermer dès que la tension à ses bornes cesse d'être positive,
- Pouvoir être commandé à l'ouverture lorsque le courant qui le traverse est positif.

**I.4- Interrupteur a 3 segments bidirectionnels en tension**

Cet interrupteur étant unidirectionnel en courant peut être réalisé avec un seul composant ou la mise en série de plusieurs composants. [1]

I.4 .a- Thyristor

L'interrupteur 3 segment bidirectionnel en tension a la caractéristique statique d'un thyristor, mais on ne peut utiliser que pour les applications ou seule la fermeture doit être commandée.

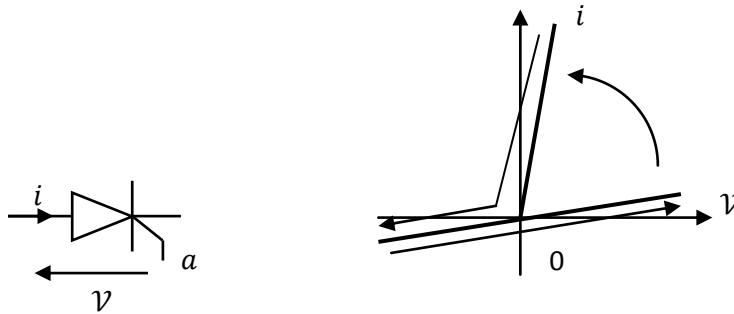


Figure I-8 : Thyristor

I.4 .b- Thyristor GTO

Si l'interrupteur 3 segments doit être à ouverture et fermeture commandée, il faut utiliser un composant lui-même à ouverture et fermeture commandées. Si ce composant est bidirectionnel en tension, GTO symétrique par exemple, il constitue à lui seul l'interrupteur.

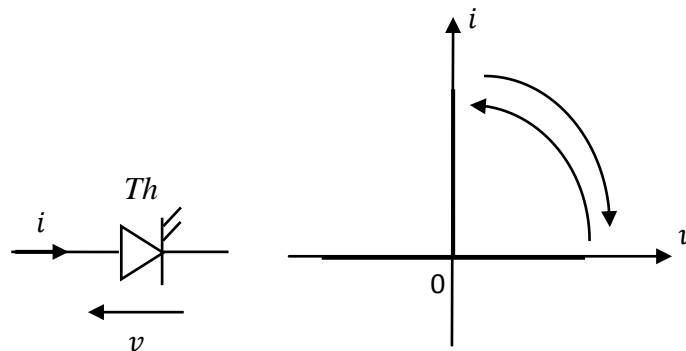


Figure I-9 : Thyristor GTO

I.4 .c- GTO - diode « en série »

Si le composant est unidirectionnel en tension, il faut monter en série avec lui une diode. La figure (1-10) montre la mise en série d'un GTO et d'une diode, dont les caractéristiques ont en commun le segment situé sur l'axe des i, donne la caractéristique désirée.

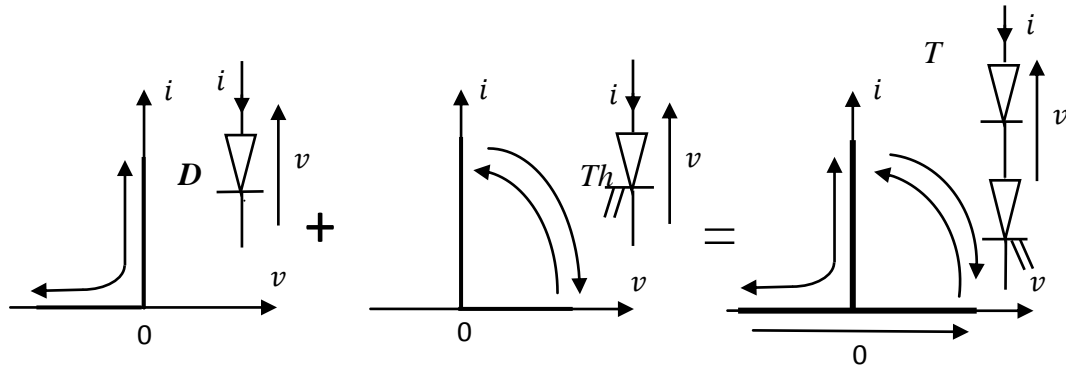


Figure I-10 : Interrupteur 3 segments bidirectionnel en tension GTO

**I.4.d- Fonction « RCT dual »**

En appliquant au thyristor à conduction inverse le principe de dualité on obtient le RCT dual, interrupteur 3 segments dont seule l'ouverture est commandée. [1]

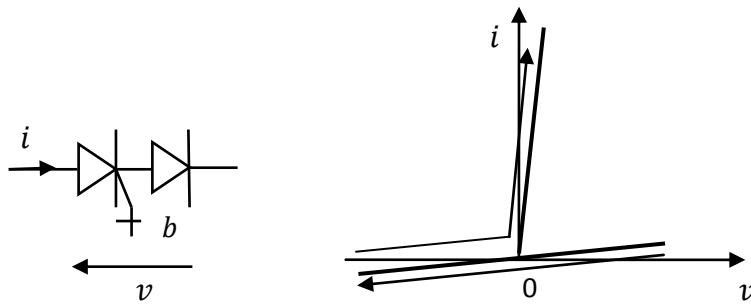


Figure I-11 : Interrupteur 3 segment à RCT dual

**I.5 -Choix des composants semi-conducteurs**

Selon le composant utilisé, la fréquence de « découpage »  $f = 1/T$  à laquelle est soumis le composant change. En général, on cherche à utiliser la fréquence la plus élevée possible. Cependant, plus la puissance nominale  $P_n$  d'un convertisseur est élevée, plus cette fréquence est faible. On cherche donc à établir « un facteur de mérite »  $\eta$  à chaque composant qui serait le produit :  $\eta = P_n * f$ .

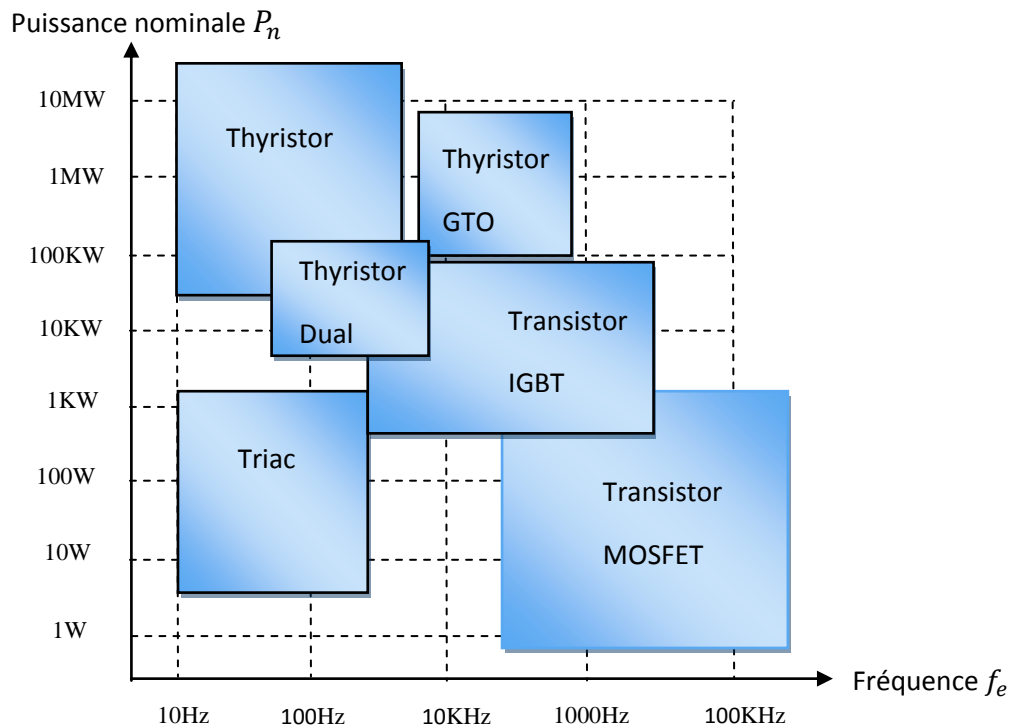
La figure (I-12) présente un diagramme à échelle logarithmique des domaines d'utilisations de chaque composant. [7]

Selon le niveau de puissance, de fréquence et de courant on sélectionne le composant électronique le plus convenable à notre application ; Parmi ses éléments-semiconducteur, le choix d'un transistor IGBT se porte sur l'utilisation d'un tel transistor, c'est que le

# CHAPITRE I

## LES FONCTIONS INTERRUPTEURS

convertisseur est un hacheur ou un onduleur, la puissance nominale envisagées et comprise 1kw et 500kw.



*Figure I-12 : Les performances électriques et fréquentielles pour chaque famille de composants*

### I.6 -CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents éléments semi-conducteurs et leurs fonctionnements. Actuellement le choix des composants repose sur deux stratégies :

- La première se base sur les exigences industrielles (vitesse, rendement, fiabilité, dimensions réduites,...etc.).
- La deuxième se base sur les principes ou sur les matériaux qui permettent d'avoir des idées nouvelles de structure.

*CHAPITRE I*  
*LES FONCTIONS INTERRUPTEURS*

---

The page features a decorative graphic consisting of three blue circles of varying sizes, each composed of concentric rings of different shades of blue. These circles are arranged in a vertical line, with the largest at the top and bottom, and a smaller one in the middle. Two thin, light blue lines intersect at the top left and extend diagonally across the page, framing the central text area.

# CHAPITRE II

# LES COMMUTATIONS



## **LES COMMUTATIONS**

### **II.1-INTRODUCTION**

En électronique de puissance on demande aux semi-conducteurs de modifier de façon périodique, la configuration d'un circuit en jouant le rôle d'interrupteurs s'ouvrant ou se fermant suivant une séquence déterminée. Souvent en leur demande de s'ouvrir alors qu'ils sont parcourus par un courant. La commutation d'un courant est son transfert d'une voie à une autre. La fermeture d'un interrupteur à semi-conducteur connecte les bornes qu'il relie, son ouverture interrompt cette connexion.

Au moment où il se ferme, il force les potentiels de deux bornes qu'il relie à devenir égaux. La fermeture d'un interrupteur entraîne une discontinuité du potentiel d'au moins une des bornes, sauf si à cet instant, les deux potentiels étant égaux, la tension aux bornes de l'interrupteur est nulle.

Au moment de l'ouverture, l'interrupteur de connexion entre les deux bornes que l'interrupteur reliait force le courant qui circulait. D'une borne à l'autre à s'annuler. Ce courant subit une discontinuité, sauf si à cet instant il était nul.

Ces contraintes sont acceptables si elles sont compatibles avec la continuité de l'énergie au sein de montage dans lequel les interrupteurs sont insérés. En pratique cela revient généralement à vérifier que les commutations n'entraînent pas

- De discontinuité de la tension aux bornes d'un ou plusieurs condensateurs,
- De discontinuité du courant dans une ou plusieurs inductances.

Aussi avant d'examiner le déroulement des commutations, est-il nécessaire de voir comment caractériser les générateurs et récepteurs entre lesquels sont montés les interrupteurs.

### **II.2- Représentation des sources**

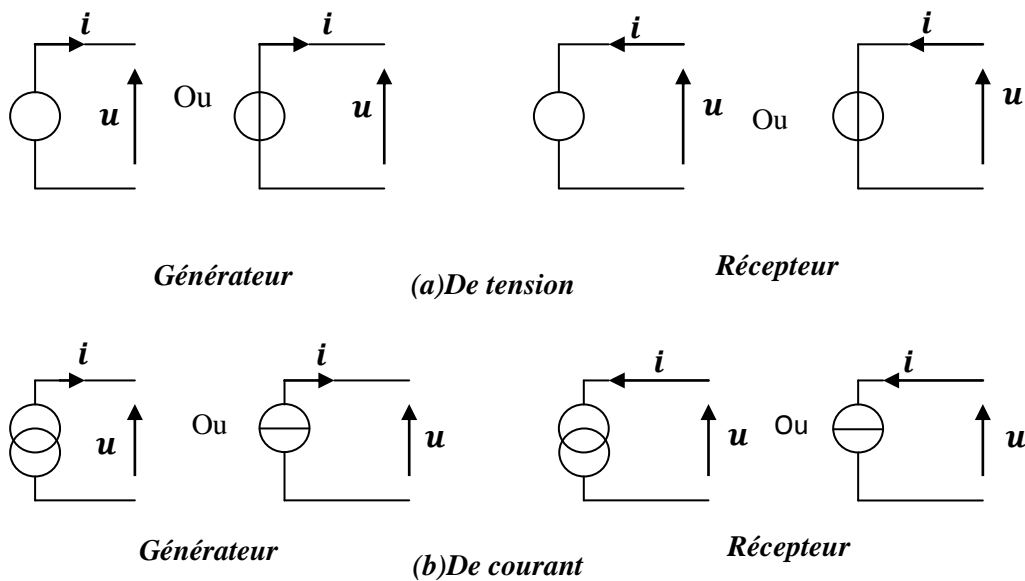
En électronique de puissance, on caractérise les générateurs et les récepteurs par rapport aux commutations en indiquant s'il s'agit d'un générateur ou d'un récepteur:

**CHAPITRE II**  
**LES COMMUTATIONS**

De tension ou de courant, continu ou alternatif.

— Un générateur ou un récepteur est dit de tension si la forme d'onde de la tension à ses bornes n'est pas affectée par le courant qui le traverse, en particulier par les rapides variations de ce courant lors des commutations. On le représente (figure II.1.a) par un cercle portant à l'intérieur le symbole (=) s'il est de tension continue, le symbole (~) s'il est de tension alternative, ou bien par un cercle traversé par un trait dans le sens de passage du courant.

— Un générateur ou un récepteur est dit de courant si la forme d'onde du courant qui le traverse n'est pas affectée par les variations de la tension à ses bornes, en particulier lors des commutations. On le représente par deux cercles entrelacés (figure II-1-b) avec dans l'un d'eux le symbole = ou ~, ou bien par un seul cercle traversé par un trait perpendiculaire au sens de passage du courant.



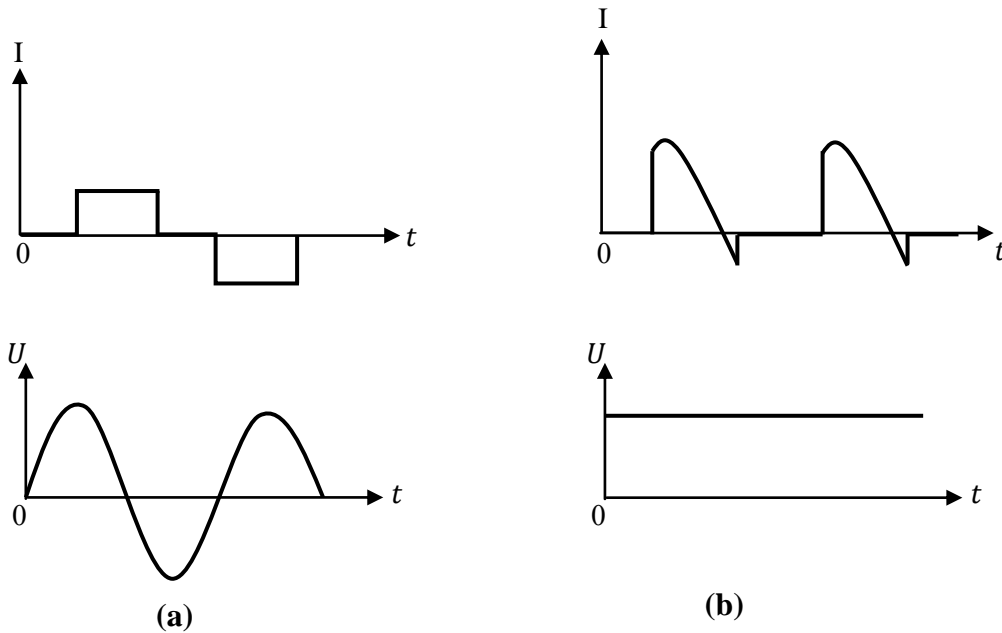
*Figure II-1 : Représentation des sources*

Pour la tension  $u$  et le courant  $i$  on adopte des conventions de signe telles que la valeur moyenne du produit  $ui$  soit positive pour un générateur débitant de la puissance ou pour un récepteur en recevant.

- A titre d'exemples, on a tracé les formes d'ondes de la tension  $u$  et du courant  $i$

- ❖ D'un générateur de tension sinusoïdale parfait débitant un courant formé de créneaux rectangulaires (figure II-2-a),
- ❖ D'un générateur de tension continue parfait débitant un courant formé d'arcs de sinusoïdes (figure II-2-b).

Ces générateurs de tension sont parfaits puisque  $u$  reste sinusoïdale ou constante malgré les brusques variations de  $i$  provoquées par les commutations. [3]



**Figure II-2 : Formes des tensions parfaites**

### II.2.1- Réversibilités des sources

Pour caractériser un générateur ou un récepteur, il faut en outre indiquer ses réversibilités en précisant s'il est:

- ✓ Réversible en tension ( $u > 0$  ou  $u < 0$ ) ou non,
- ✓ Réversible en courant ( $i > 0$  ou  $i < 0$ ) ou non,
- ✓ Réversible en tension et en courant ( $u > 0$  ou  $u < 0$ , et  $i > 0$  ou  $i < 0$ ) ou non.

Ainsi, une batterie d'accumulateurs est un générateur de tension réversible en courant mais pas en tension. Les moteurs à courant continu et les moteurs à courant alternatif, synchrones ou asynchrones, sont des récepteurs de courant à cause de leur inductance. Ils sont réversibles en courant et en tension. [2]

## II.2.2- Amélioration ou changement de nature d'une source

**II.2.2.a-Amélioration de la nature d'une source :** « Les sources ne sont jamais parfaites ».

▪ Si une source de tension  $U$  a une impédance interne non négligeable, les variations du courant  $i$  qui la traverse, surtout celles à fort  $\frac{di}{dt}$ , entraînent des variations de la tension  $u$  à ses bornes. Pour corriger une source de tension trop imparfaite compte tenu de la  $\frac{di}{dt}$  que lui impose le convertisseur, on dérive un condensateur entre ses bornes. Ce condensateur s'oppose aux discontinuités de la tension  $u$  ; il fournit du courant quand  $u$  diminue, en absorbe quand  $u$  augmente, réduisant ainsi les variations de  $u$  provoquées par celles de  $i$ .

▪ Une source de courant ne peut avoir une impédance interne infinie. Les variations de la tension  $u$  à ses bornes, surtout celle à fort  $\frac{du}{dt}$ , entraînent des variations du courant  $i$  qui la traverse.

Pour améliorer une source de courant, on augmente son inductance en ajoutant une inductance supplémentaire en série. Plus l'inductance totale  $L$  est grande, plus la f.é.m. d'induction  $L \frac{di}{dt}$  réduit les variations du courant  $i$  dues aux variations de la tension  $u$ . [2]

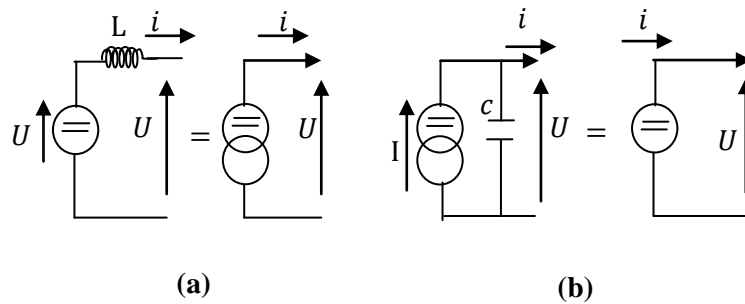
### II.2.2.b-Changement de nature d'une source

• Pour obtenir une source de courant continu à partir d'une source de tension continue, on met en série avec celle-ci une inductance  $L$  de valeur suffisante (figure II-3-a).

L'inductance se charge ou se décharge sous l'effet des variations de  $u$ . Si sa valeur est suffisante, les variations de  $i$  sont négligeables:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U - u}{L}$$

▪ Pour transformer en source de tension continue une source de courant continu, on dérive aux bornes de celle-ci un condensateur de capacité  $C$  suffisant (figure II-3-b).



**Figure II-3 : Changement de nature d'une source**

Les courants  $I$  et  $i$  ont mêmes valeurs moyennes. Le courant de charge ou décharge de la capacité ou d'une forte inductance peut entraîner une consommation ou une création de puissance réactive excessive. Il est alors nécessaire d'utiliser un filtre.

➤ **Remarque :**

- L'imperfection d'une source dépend de la fréquence de fonctionnement du convertisseur auquel elle est reliée. Plus cette fréquence est élevée, plus les  $\frac{di}{dt}$  et les  $\frac{du}{dt}$  sont forts et risquent de produire des surtensions ou des surintensités élevées.

-Toutefois, pendant les commutations, qui sont d'ordinaire très brèves en regard de la période de fonctionnement, on peut admettre:

- ✓ Que la tension d'une source de tension, continue ou alternative, est constante;
- ✓ Que le courant d'une source de courant, continue ou alternative, est constant.

### II.2.3- Règles de connexion

Les connexions établies par les semi-conducteurs doivent tenir compte de la nature des sources entre lesquelles le convertisseur est monté et, éventuellement, des sources intérieures à celui-ci. Les semi-conducteurs et leur commande doivent respecter les principes de base de la théorie des circuits électriques:

- ✓ Unicité du potentiel en un point,
- ✓ Somme de courants nulle en un nœud.

#### II.2.3.a- Une source de tension:

- ✓ Ne doit pas être reliée directement à une source de tension différente,
- ✓ Peut être mise en circuit ouvert,

- ✓ Ne doit pas être mise en court-circuit, si non son courant serait très fort (théoriquement infini).

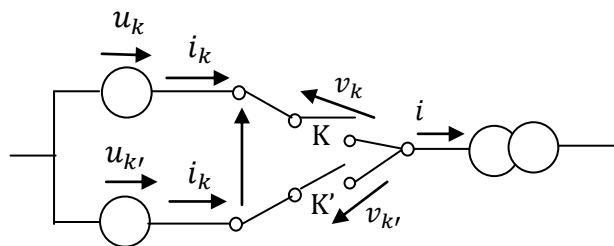
**II.2.3.b- Une source de courant:**

- ✓ Ne doit être relié directement à une source de courant différente,
- ✓ Peut être mise en court-circuit,
- ✓ Ne doit pas être mise en circuit ouvert, si non la tension à ses bornes serait très grande (théoriquement infinie).

Ces principes conduisent à la règle d'« alternance des sources » : un convertisseur direct, c'est-à-dire sans élément interne de stockage de l'énergie, ne peut relier que deux sources de nature différente, l'une de tension, l'autre de courant. [2]

**II.3- La commutation dure**

Pour suivre le déroulement de ce transfert, on peut se limiter à l'examen de la partie de l'ensemble du circuit concernée : l'association en série de deux interrupteurs sous la tension  $u$  assurant l'aiguillage du courant  $i$  (figure II-4); c'est la "cellule élémentaire de commutation".



**Figure II-4 : cellule élémentaire de commutation**

On considère la commutation correspondant à l'ouverture de l'interrupteur K, donc au transfert du courant  $i$  de la voie que fermait cet interrupteur à la voie que ferme l'interrupteurs  $K'$ . Les courants dans ses deux voies doivent varier très rapidement, passant de  $i$  à 0 à  $i$  pour  $i_k$  de 0 à  $i$  pour  $i_{k'}$ . [2]

Pour simplifier la présentation de la commutation  $K \rightarrow K'$ , on suppose que, pendant toute sa durée :

## **CHAPITRE II**

---

### **LES COMMUTATIONS**

- la tension  $u$ , égale à  $u_k \rightarrow u_{k'}$ , reste constante et égale à  $U$ ,
- le courant  $i$  reste constant et égal à  $I$ ,
- les variations des tensions  $v_k$  et  $v_{k'}$ , et des courants  $i_k$  et  $i_{k'}$  sont linéaires.

Si ces hypothèses ne sont pas satisfaites, la description des phénomènes et les conclusions qu'on en tire ne sont pas notablement affectées ; seules les formes d'ondes tracées aux (figures II-5) sont plus ou moins altérées.

Suivant les signes de  $I$  de  $U$ , il y a quatre possibilités :

$I > 0$  et  $U > 0$ ,

$I > 0$  et  $U < 0$ ,

$I < 0$  et  $U < 0$ ,

$I < 0$  et  $U > 0$ .

L'étude des deux premières suffit ; les deux autres sont les même à conditions de permuter  $K$  et  $K'$ , d'inverser le sens positif du courant dans les interrupteurs et celui de la tension à leurs bornes.

#### ➤ **Commutation $K \rightarrow K'$ avec $U$ et $I$ positifs**

- Quand  $K$  conduit, la tension aux bornes de  $K'$  est égale à  $(-U)$  donc négative. Cet interrupteur ne peut écouler  $I$  tant que  $v_{k'}$  est négatif.

La commutation commencée donc par la montée de la tension  $v_k$  qui passe de  $t=t_0$  à  $t=t_1$ , de 0 à  $(+U)$ . Pendant cet intervalle,  $i_k$  reste égal à  $I$ ,  $i_{k'}$  reste nul et  $v_{k'}$  passe de  $-U$  à 0.

Quand  $v_{k'}$  s'annule, l'interrupteur  $K'$  peut entrer en conduction. Pendant la montée du courant  $i_{k'}$  de 0 à  $I$ , qui correspond à l'intervalle  $(t_1, t_2)$ ,  $i_k$  décroît de  $I$  à 0,  $v_k$  reste égale à  $U$  et  $v_{k'}$  à 0. A l'instant  $t=t_2$  le transfert de  $I$  est terminé.

Le trajet des points de fonctionnement montre que ce type de commutation nécessite la commande à l'ouverture de  $K$  qui doit donc être du type transistor.

L'interrupteur  $K'$  effectue une fermeture spontanée : il doit donc se comporter comme une diode. Si le courant  $I$  transféré à une diode, ce qui est souvent le cas, il n'est pas de problème. Si  $I$  est transféré à un semi conducteur à fermeture commandée, du type thyristor ou transistor, il faut que celui-ci se comporte comme une diode, c'est-à-dire qu'il devienne passant dès que la tension à ses bornes tend à devenir positive, ce qui nécessite qu'une commande lui soit appliquée. [3]

**CHAPITRE II**  
**LES COMMUTATIONS**

➤ **Commutation K → K' avec I positif et U négatif**

- Quand l'interrupteur K conduit, la tension à ses bornes ne peut devenir négative tant que le courant positif qui le traverse ne s'est pas annulé.

La commutation commence par un intervalle ( $t_0, t_2$ ), pendant lequel  $i_k$  décroît de I à 0,  $i_{k'}$  croît de 0 à I, pendant lequel  $v_k$  reste nulle et  $v_{k'}$ , égale à  $-U$ .

Quand  $i_k$  s'annule, la tension  $v_k$  peut décroître de 0 à U et  $v_{k'}$  de  $-U$  à 0. A la fin de ce second intervalle ( $t_1, t_2$ ), la commutation est finie.

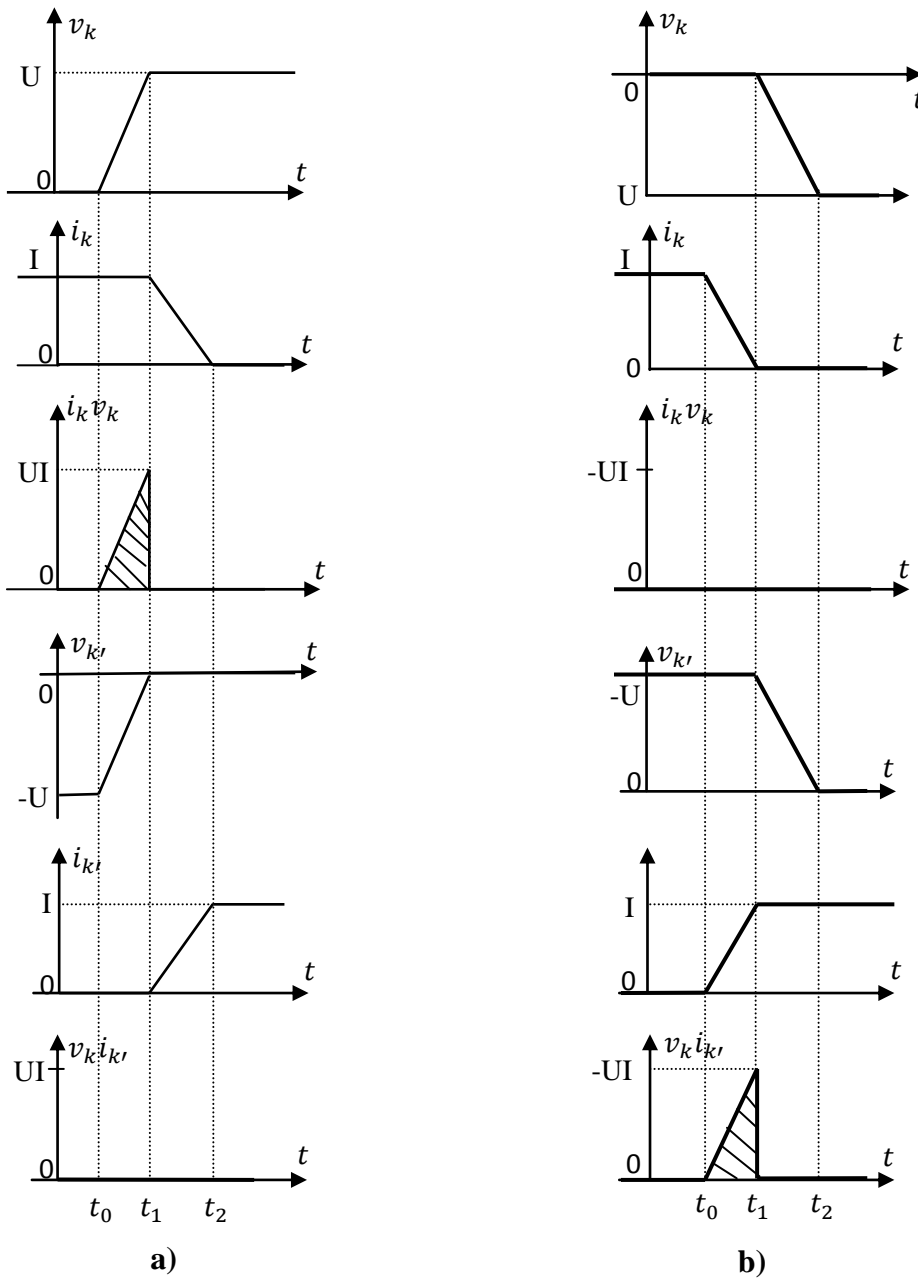
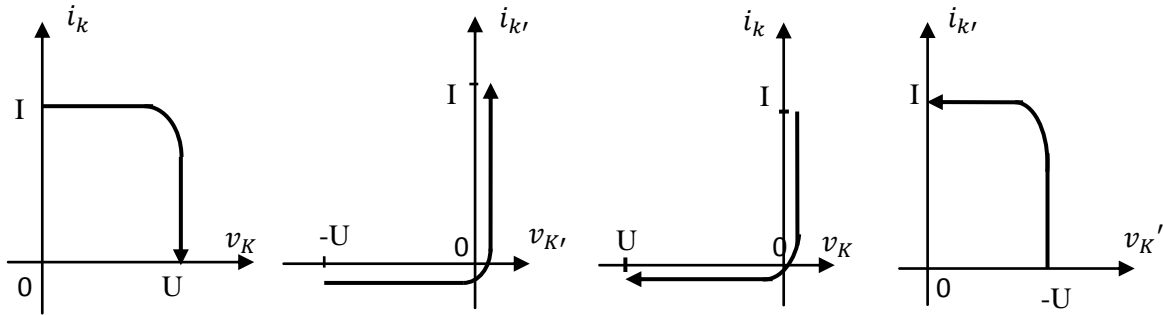


Figure II.5 : Les formes d'ondes  $v_k, i_k$  et  $v_{k'}, i_{k'}$ . Pour les deux cas de commutations

**CHAPITRE II**  
**LES COMMUTATIONS**



**Figure II-6 :** Commutation  $K \rightarrow K'$   
avec  $U > 0$  et  $I > 0$

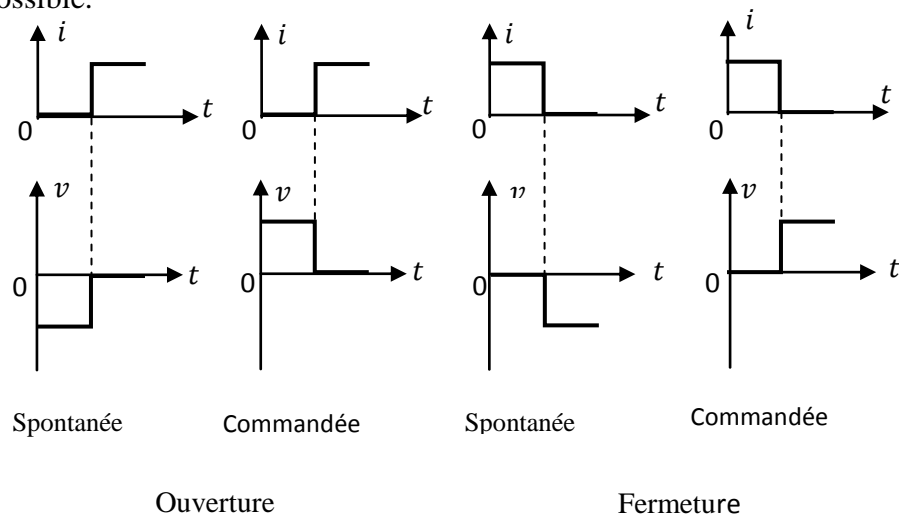
**Figure II-7 :** Commutation  $K \rightarrow K'$   
avec  $U < 0$  et  $I > 0$

Le trajet des points de fonctionnement montre que ce type de commutation nécessite une commande à la fermeture de l'interrupteur  $K'$  ; suivant qu'il a ou n'a pas à assurer des ouvertures commandées, il sera du type transistor ou du type thyristor.

L'interrupteur  $K$  doit, lors de cette commutation de se comporter comme une diode. S'il s'agit effectivement d'une diode, il n'y a pas de problème. Il n'y en a pas non plus s'il s'agit d'un thyristor car celui-ci se comporte comme une diode lorsqu'il est à l'état passant.

Pour la présentation du principe de fonctionnement d'un convertisseur et la détermination des caractéristiques liant les valeurs des grandeurs d'entrée et de sortie, on peut d'ordinaire négliger la durée des commutations devant la période de fonctionnement. On suppose les commutations instantanées.

Sur la forme d'onde du courant  $i$  dans un interrupteur et celle de la tension  $U$  à ses bornes, les commutations apparaissent alors comme des discontinuités. La figure (II-8) les représente dans les quatre cas possible.



**Figure II-8:** la nature des commutations

## **CHAPITRE II**

---

### **LES COMMUTATIONS**

- On remarque que la commutation commandée d'un interrupteur est toujours associée à la commutation spontanée de l'autre. Sur les formes d'ondes schématiques telles celles de la figure (II-8), il est aisé de reconnaître la nature des commutations :

- Dans une commutation commandée, le courant dans l'interrupteur lorsqu'il est fermé et la tension à ses bornes lorsqu'il est ouvert sont de même signe.

- Dans une commutation spontanée, ce courant et cette tension sont des signes contraires.

- Les surfaces hachurées sur les figures (II-5-a et II-5-b) montrent l'énergie dissipée dans l'interrupteur qu'effectue une ouverture ou une fermeture commandée :

$i_k$  est égale à  $i$  pendant toute la montée de  $v_k$ , dans le premier cas ;

$v_k$  est égale à  $U$  pendant toute la montée de  $i_{k'}$ , dans le second.

Ces commutations commandées sont dites « dures » par opposition aux commutations Spontanées (ou à pertes nulles) dites « douces ». [3]

**La commutation dure** également appelée commutation forcée résulte de l'emploi d'un composant commandé à l'ouverture et à la fermeture ; les contraintes importantes qui sont alors imposées à celui-ci dépendent fortement des inductances de connexion et de câblage et de diverses capacités parasites ce qui entraîne :

- \* Des pertes élevées
- \* Des surtensions et des surintensités aux bornes de l'interrupteur;
- \* Des rapides variations de tension et de courant ( $\frac{du}{dt}$  et  $\frac{di}{dt}$ );
- \* Des fortes oscillations en particulier pour le découpage à haute fréquence.

Pour limiter ces effets, On peut associer aux semi-conducteurs des circuits d'aide à la commutation (CALC), dont le rôle essentiel est de réduire les pertes correspondantes et de limiter les surtensions et/ou surintensités. [10]

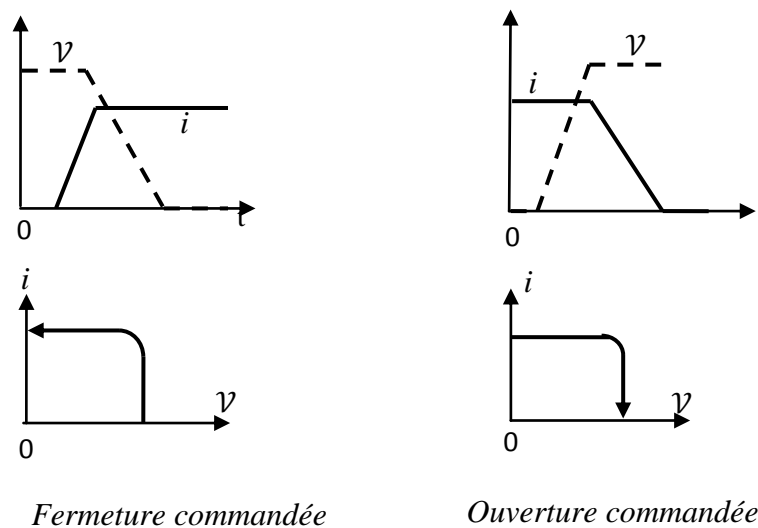
Les commutations commandées sont :

- A la fermeture, le courant dans l'interrupteur monte avant que la tension à ses bornes ne soit descendue ;
- A l'ouverture, la tension aux bornes de l'interrupteur monte avant que le courant qui le traverse ne soit descendu.

Il en résulte des pertes de commutation élevées qui limitent la possibilité de montée en fréquence des convertisseurs.

La figure (II-9) schématise la forme d'onde de la tension  $v$  aux bornes d'un interrupteur qui le traverse ainsi que celle du courant  $i$  qui le traverse ainsi que le trajet de son point de fonctionnement dans le plan  $[v, i]$  :

- ✓ Lors d'une fermeture commandée,
- ✓ Lors d'une ouverture commandée. [2]



**Figure II-9 : commutation dure**

#### **II.4- Adoucissement de commutation**

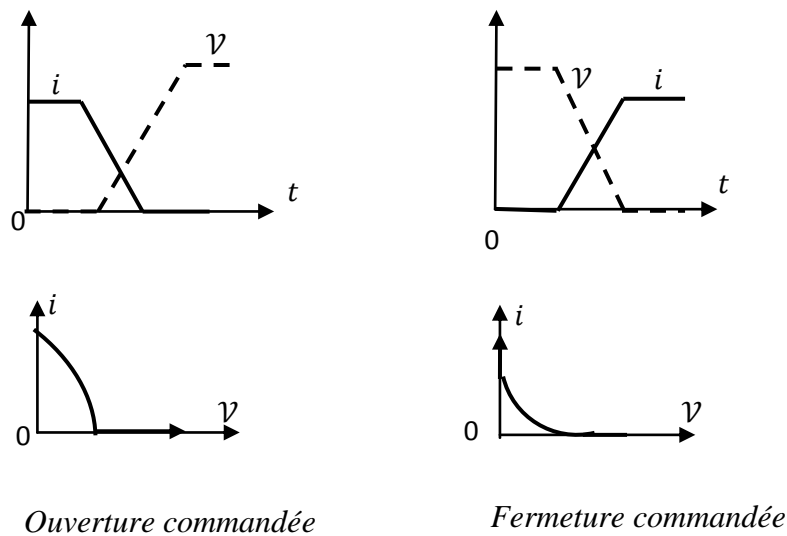
Dans les commutations types telles qu'on vient de les présenter, l'interrupteur dont la commutation est commandée effectue une commutation dure :

- Il doit reprendre le courant avant que la tension à ses bornes descende, s'il est commandé à la fermeture ;
- Il doit reprendre la tension avant que le courant qui le traverse descende, s'il est commandé à l'ouverture.

Il en résulte des pertes de commutation qui limitent la fréquence à laquelle on peut faire commuter les interrupteurs.

**CHAPITRE II**  
**LES COMMUTATIONS**

---



**Figure II-10 : commutation adoucie**

Pour réduire ces pertes, on peut :

- Soit reporter une partie de l'énergie dissipée dans l'interrupteur lors des commutations dans des éléments réactifs placés en série ou en parallèle avec lui. C'est le rôle des circuits d'aide à la commutation (C A L C), appelés *snubbers* en anglo-saxon. L'interrupteur reste entièrement commandable mais la durée de la commutation adoucies est allongée ;

-Soit associer à l'interrupteur un circuit résonnant qui va permettre :

- D'assurer une fermeture commandée fortement adoucie suivie d'une ouverture spontanée par passage par zéro du courant dans l'interrupteur (*Zero Current Switching, Z C S*);
- Ou d'assurer une ouverture commandée fortement adoucie suivie d'une fermeture spontanée par passage par zéro de la tension aux bornes de l'interrupteur (*Zero Voltage Switching, Z V S*).

Ces interrupteurs "résonnants" ne sont plus entièrement commandable (sauf addition d'un interrupteur supplémentaire, mais les circuits deviennent alors complexes). Les convertisseurs qui utilisent de tels interrupteurs sont dits quasi-résonnants. Leurs principales applications se trouvent dans la conversion continu-continu.

Pour l'étude de l'adoucissement des commutations, on reprend la cellule de commutation présentée précédemment et on suppose encore que la tension  $u$  le courant  $i$  restent constants et égaux à  $U$  et à  $I$  durant toute la commutation. [3]

### **II.4.1- Circuit d'aide à la commutation**

La commutation commandée d'un interrupteur à semi-conducteur s'accompagne obligatoirement de pertes dans l'interrupteur puisque son point de fonctionnement doit traverser, dans le plan courant-tension, un quadrant dans lequel le produit courant-tension est positif. Le circuit d'aide à la commutation (CALC) pour le rôle :

- Soit de mettre les interrupteurs commandés dans des conditions favorables lors des commutations pour que celles-ci puissent s'effectuer avec des pertes réduites dans les interrupteurs ;
- Soit de rendre les commutations possibles lorsque les imperfections des sources de courant ou de tension risquent d'entraîner pour les interrupteurs des surtensions ou des surintensités intolérables.

On prendra en compte les temps de montée et de descente du courant dans les interrupteurs et de la tension à leurs bornes pour évaluer leurs pertes de commutation. [1]

### **II.4.2-Cas des interrupteurs à fermeture ou ouverture commandée**

La présence, au sein de la cellule de commutation, d'inductance en série avec les interrupteurs ou de capacités en parallèle peut les mettre dans des conditions favorables aux changements d'états souhaités lors des commutations.

#### **II.4.2.a- Influence d'une inductance en série avec un interrupteur**

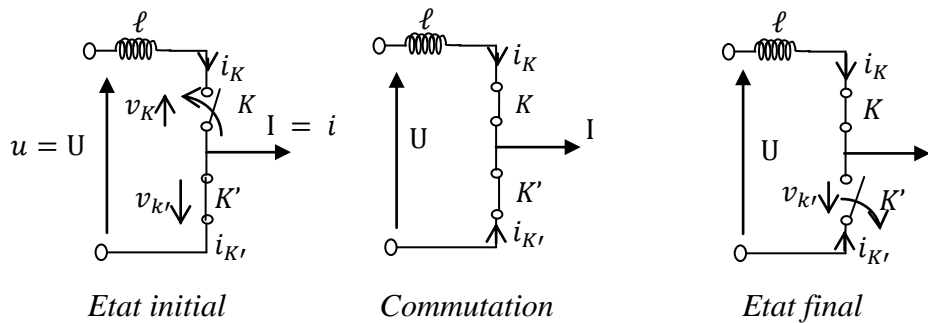
Pour étudier l'effet que la présence d'inductances placées en série avec les interrupteurs peut avoir sur les commutations, nous allons considérer le cas où une inductance  $\ell$  est en série avec l'interrupteur commandé K (figure II-11).

Cette inductance peut rendre compte de l'imperfection des sources de tension raccordées à la cellule et traduire leur sensibilité aux brusques variations du courant qui les traverse. Elle peut également représenter un dispositif volontairement ajouté à la cellule et constituer un élément d'un circuit d'aide à la commutation, ou encore représenter la mise en série d'un élément de CALC et d'une inductance parasite.

**CHAPITRE II**  
**LES COMMUTATIONS**

**a) Fermeture commandée**

La figure montre le schéma équivalent au circuit avant, pendant et à la fin la fermeture de K.



**Figure II-11 : Effet d'une inductance en série avec un interrupteur**

Les interrupteurs sont supposés idéaux ; on néglige les variations de la tension  $u$  et du courant  $i$  pendant la commutation et on désigne par  $U$  et  $I$  leurs valeurs durant toute celle-ci. La (figure II-12) montre les variations de  $v_K$ ,  $i_K$  et de  $v_{K'}$  et  $i_{K'}$ .

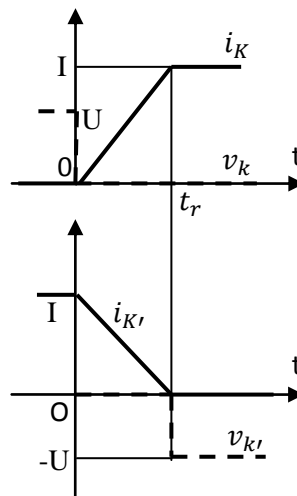
A l'instant initial,  $i_K = 0$  ;  $v_K = U$  ;  $i_{K'} = I$  ;  $v_{K'} = 0$ .

A partir de l'instant où on commande la fermeture de  $K$ ,  $v_K = 0$ ; le courant  $i_K$  ne peut varier brusquement, donc  $i_{K'}$  reste positif,  $K'$  reste passant et  $v_{K'} = 0$ .

De  $\ell \frac{di_K}{dt} = U$  on déduit  $i_K = \frac{U}{\ell} t$ .

Le courant  $i_K$  atteint  $I$  en  $t = t_r$  tel que :  $t_r = \frac{\ell I}{U}$ .

Alors  $i_{K'}$  est nul et l'ouverture de  $K'$  se fait spontanément au zéro de courant (commutation douce ou *Zero Current Switching ZCS*).



**Figure II-12 : les variations de  $v_K$ ,  $i_K$  et  $v_{K'}$ ,  $i_{K'}$  pendant fermeture de  $K$**

**CHAPITRE II**  
**LES COMMUTATIONS**

On voit qu'à cause de l'inductance série, le changement de valeur de  $i_K$  se produit sans discontinuité à tension  $v_K$  nulle et la commutation de  $K'$  se fait au zéro de courant. L'inductance série rend plus favorables les conditions de cette commutation. [1]

**b) Ouverture commandée**

L'ouverture commandée de  $K$ , dans l'état final de la figure (II-11), provoque une discontinuité du courant  $i_K$  et donc une surtension  $\ell \frac{di_K}{dt}$  théoriquement infinie. Elle suppose également la fermeture instantanée de l'interrupteur  $K'$  pour assurer la continuité du courant  $I$ . La présence d'inductance série entraîne les contraintes excessives sur l'interrupteur à ouvrir.

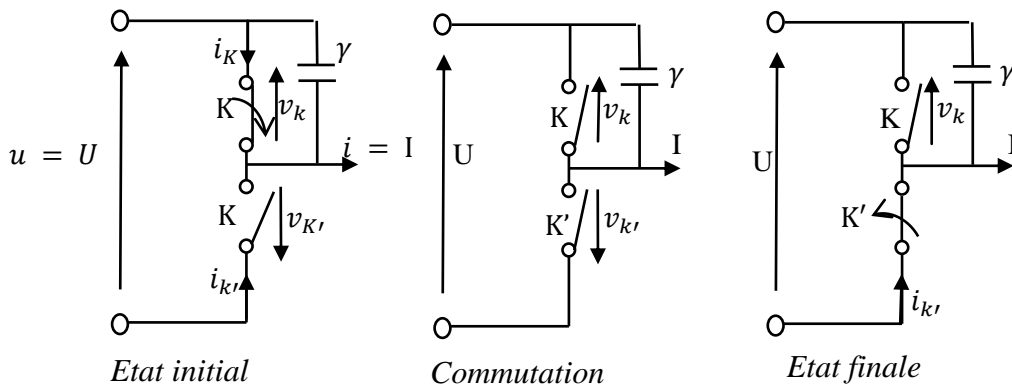
**II.4.2.b- Influence d'une capacité en parallèle avec un interrupteur**

Pour étudier les effets que des capacités placées en parallèle avec des interrupteurs peuvent avoir sur les commutations, nous allons considérer le cas où une capacité  $\gamma$  est mise en parallèle avec l'interrupteur commandée  $K$  (figure II-13).

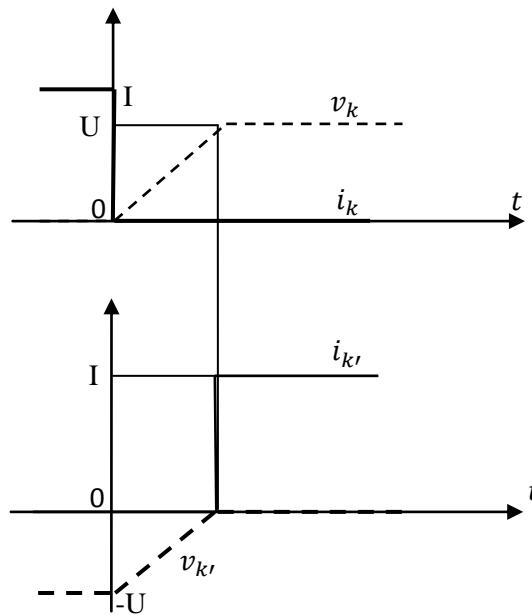
Cette capacité peut soit représenter l'imperfection de la source du courant  $i$  et traduire sa sensibilité aux brusques variations de la tension à ses bornes, soit être un dispositif volontairement ajouté à la cellule constituant ainsi un élément d'un circuit d'aide à la commutation, soit représenter une combinaison d'un élément de CALC et d'une capacité parasite.

**a) Ouverture commandée**

La (figure II-13) donne d'une part les schémas permettant de suivre l'ouverture de l'interrupteur  $K$ , d'autre part les formes d'onde de  $v_K, i_K$  et  $v_{K'}, i_{K'}$ , pendant cette commutation.



**Figure II-13 : Effet d'une capacité en parallèle avec un interrupteur**



**Figure II-14** : les variations de  $v_k, i_k$  et  $v_{k'}, i_{k'}$  pendant l'ouverture de K

On néglige les variations de  $u$  et de  $i$  pendant de la commutation; on les désigne par  $U$  et  $I$ .

A l'état initial  $i_K = I$  ;  $v_K = 0$  ;  $i_{K'} = 0$  ;  $v_{K'} = -U$ .

A partir de l'instant où on commande l'ouverture de K, le courant  $i_K$  est nul ;

La tension  $v_K$  ne peut varier instantanément, donc  $v_{K'}$  reste négatif, K' bloqué et  $i_{K'}$  nul.

$$\gamma \frac{dv_k}{dt} = I \text{ donne } v_k = \frac{I}{\gamma} t .$$

$$v_k \text{ Atteint } U \text{ en } t = t_r \text{ tel que } : t_r = \gamma \frac{U}{I} .$$

La commutation spontanée de K' peut alors s'effectuer au zéro de tension (commutation douce ou *Zero Voltage Switching ZVS*).

La capacité parallèle a adouci les variations de  $v_K$  et  $v_{K'}$  et; la montée de  $v_K$  s'effectue à courant nul.

**b) Fermeture commandée**

La fermeture commandée de K, dans l'état final de la figure (II-14), court-circuit.

La capacité parasite et crée donc une surintensité  $\frac{dv_K}{dt}$  théoriquement infinie.

Elle suppose également l'ouverture instantanée de K' pour éviter le court-circuit de la source de tension  $U$ .

Les capacités parallèles placent donc les interrupteurs commandés dans des conditions favorables pour l'ouverture, mais inacceptable pour la fermeture.

#### **II.4.2.c- Conséquence sur les conditions de commutation**

• Cette brève étude des effets des inductances séries et des capacités parallèles montre que :  
Chaque fois que cela s'avère possible, pour placer les interrupteurs dans des conditions de commutations favorables, il faut :

- Soit n'utiliser que des interrupteurs commandés à la fermeture (fonction thyristor ou RCT) et adoucir les commutations par des CALC formés d'inductances placées en série avec les interrupteurs (ces inductances pouvant être le cas échéant, en tout ou partie, les inductances parasites des sources de tension).

- Soit n'utiliser que des interrupteurs commandés à l'ouverture (fonction thyristor dual ou RCT dual) et adoucir les commutations par des CALC formé de capacité en parallèle avec des Interrupteurs. (Ces capacités pouvant le cas échéant être, en tout en partie, les capacités parasites des sources de courant).

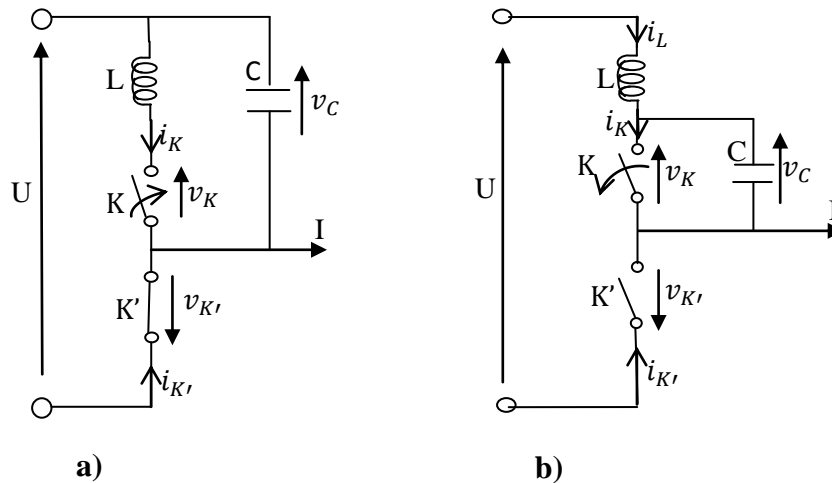
• Lorsque les deux types de commande, fermeture et ouverture, sont nécessaires on ne peut se contenter :

- ✓ D'adoucir seulement les commutations à la fermeture par des inductances en série puisque ces inductances feraient apparaître des surtensions intolérables aux bornes des interrupteurs lors de leurs ouvertures commandées,
- ✓ D'adoucir seulement les commutations à l'ouverture par des capacités en parallèle avec les interrupteurs, puisque ces capacités feraient apparaître des surintensités intolérables dans les interrupteurs lors de leurs fermetures commandées.

Si l'on veut pouvoir commander les interrupteurs à l'ouverture et à la fermeture en adoucissant leurs commutations ou en présence de sources ayant des inductances ou des capacités parasites, il faut utiliser des CALC plus élaborés. Ainsi

- ✓ Pour limiter la surintensité à la fermeture due à une capacité parallèle, on peut mettre en série avec l'interrupteur une inductance L (figure II-15-a) ;
- ✓ Pour limiter la surtension à l'ouverture due à une inductance série, on peut placer en parallèle avec l'interrupteur une capacité C (figure II-15-b).

Mais comme le montre la comparaison des figures (a et b), la disposition relative de L et C doit être différente dans les deux cas. [1]



**Figure II-15 : Effet de circuit d'aide à la commutation CALC**

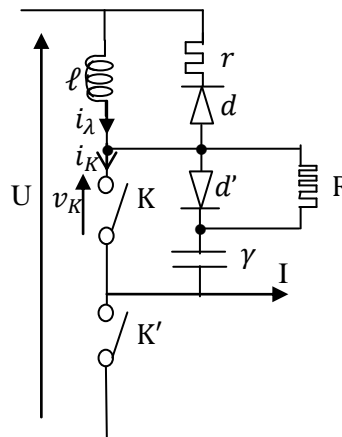
### II.4.3- Cas des interrupteurs à fermeture et ouverture commandée

Lorsqu'il faut une inductance pour adoucir la fermeture et une capacité pour adoucir l'ouverture, il est nécessaire de limiter la surintensité à la fermeture due à la décharge de la capacité et la surtension à l'ouverture due à la décharge de l'inductance.

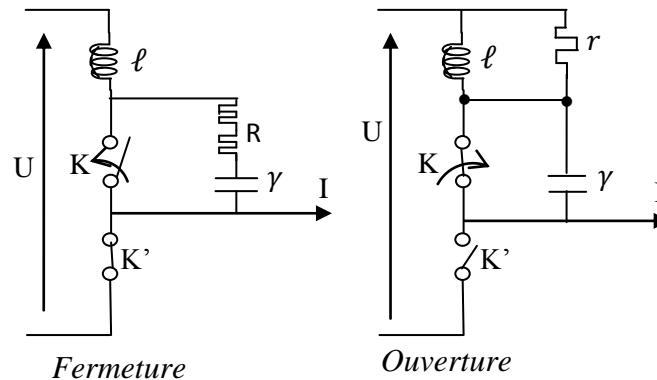
➤ **Exemple de snubber dissipatif**

La (figure II-16) donne le schéma le plus classique de *snubber* dissipatif, c'est-à-dire sans récupération de l'énergie emmagasinée dans l'inductance  $\ell$  à la fermeture, dans la capacité  $\gamma$  à l'ouverture. Il associe les deux snubbers, avec leurs deux diodes d'aiguillage  $d$  et  $d'$ , la résistance  $r$  de décharge de  $\ell$  et la résistance  $R$  de décharge de  $\gamma$ .

L'examen des schémas équivalents (figure II-17) à la fermeture (les deux diodes  $d$  et  $d'$  sont alors bloquées) et à l'ouverture (alors  $d$  et  $d'$  conduisent) montre que ces deux régimes transitoires sont ceux de circuits oscillants amortis. Leur étude nécessite la modélisation de l'interrupteur en régime dynamique.



**Figure II-16 : Schéma classique de snubber dissipatif**



**Figure II-17** : schémas équivalents à la fermeture et à l'ouverture

**REMARQUE**

- Sans *snubber*, à cause des inductance et capacités parasites, on a des régimes oscillants de fréquence plus élevée donnant d'ordinaire lieu à des surintensités et des surtensions plus fortes.
- Le choix des éléments d'un *snubber* résulte d'un compromis entre les réductions des pertes par commutation dans l'interrupteur et la limitation de la surintensité et de la surtension.

Il existe un grand nombre de schémas possibles. Certains permettent la récupération de tout ou partie de l'énergie stockée dans l'inductance à la fermeture, dans la capacité à l'ouverture.

- La plupart des commutations commandées à la fermeture correspondent au transfert du courant d'une diode à un transistor. La surintensité dans celui-ci est accrue à cause de la forte pointe de courant inverse qui traverse une diode lorsque sont blocage s'opère de manière rapide (phénomène de recouvrement inverse). [3]

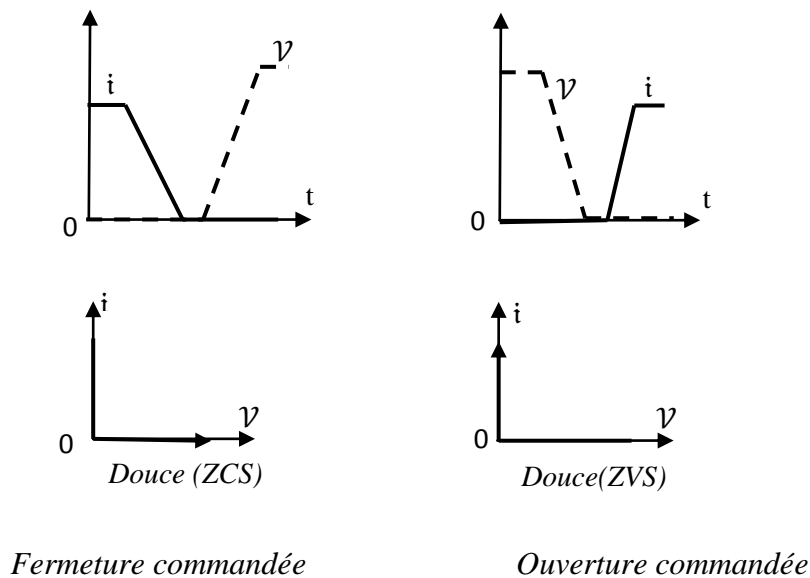
## II.5- Commutation douce

En commutation naturelle ou douce, les interrupteurs présentent une commutation commandée et une commutation spontanée.

Il est possible de regrouper ces convertisseurs en deux familles :

\*La première correspond à des commutations pilotées par les grandeurs- d'états de nature électrique, il s'agit par-exemple de certains convertisseurs reliés au réseau alternatif, c'est le cas des convertisseurs quasi-résonnants qui utilisent un couple de composants passifs L-C pour provoquer l'annulation du courant ou de la tension.

\*La seconde est relative aux structures pour laquelle les commutations spontanés des interrupteurs sont obtenus consécutivement à la commutation d'autres interrupteurs, c'est le cas pour les hacheurs de puissance à un thyristor principale dont l'extinction est assurée par un circuit auxiliaire de nature oscillante comprenant un deuxième thyristor dit le soufflage.[10]



**Figure II-18 : commutation douce**

Pour cette commutation spontanée, les pertes par commutation associées sont nulles. Dans cette configuration, il est de surcroît aisé d'assister la commutation commandée restante, par introduction d'un CALC qui sera, par principe, non dissipatif. Indiquons également que, dans la littérature anglo-saxonne, consacrés sont ZCS (*Zero-Current-switching*) pour la commutation commandée d'amorçage, et ZVS (*Zero-voltage-switching*) pour la commutation commandée de blocage.

## II.6- CONCLUSION

La montée en fréquence des convertisseurs statiques entraîne une augmentation des pertes par commutation dans les interrupteurs. Ces pertes peuvent être réduites, mais surtout délocalisées par l'adjonction de circuit d'aide à la commutation (CALC) sans modifier le principe de fonctionnement du convertisseur.

Une autre possibilité consiste à modifier la nature des interrupteurs pour qu'ils réalisent une commutation spontanée, dite aussi commutation douce car les pertes sont nulles, mais aussi celle des convertisseurs qui doivent alors créer les conditions de commutations. Ces convertisseurs sont dits convertisseurs « quasi » résonnants.

Deux types d'interrupteurs peuvent être utilisés, conduisant à deux types de commutations douces :

- ✚ Interrupteur à amorçage commandé et blocage spontané, comme le thyristor. Le blocage est alors réalisé au passage à zéro du courant, nommé *ZCS (Zero Current Switching)*
- ✚ Interrupteur à blocage commandé et amorçage spontané. Le blocage est alors réalisé au passage à zéro de la tension ou *ZVS (Zero Voltage Switching)*.

Pour parvenir au passage à zéro de l'une des grandeurs il est nécessaire d'ajouter un circuit oscillant dans le montage, d'où leur nom de convertisseurs quasi résonnants.

The page features a decorative graphic consisting of three overlapping blue circles of varying sizes, arranged in a vertical line. Two thin blue lines intersect at the center of the middle circle, forming an 'X' shape that extends towards the corners of the page. The circles are composed of concentric layers of different shades of blue, creating a 3D effect.

# CHAPITRE III

## PRESENTATION DES STRUCTURES DES CONVERTISSEURS CONTINU-CONTINU



PRÉSENTATION DES STRUCTURES DES  
CONVERTISSEURS CONTINU-CONTINU

III.1-INTRODUCTION

Un convertisseur **DC/DC** a pour vocation d'assurer le transfert d'énergie entre une source de tension continue et une source de courant continu.

La représentation symbolique la plus couramment utilisée est donnée par la figure (III-1-a).

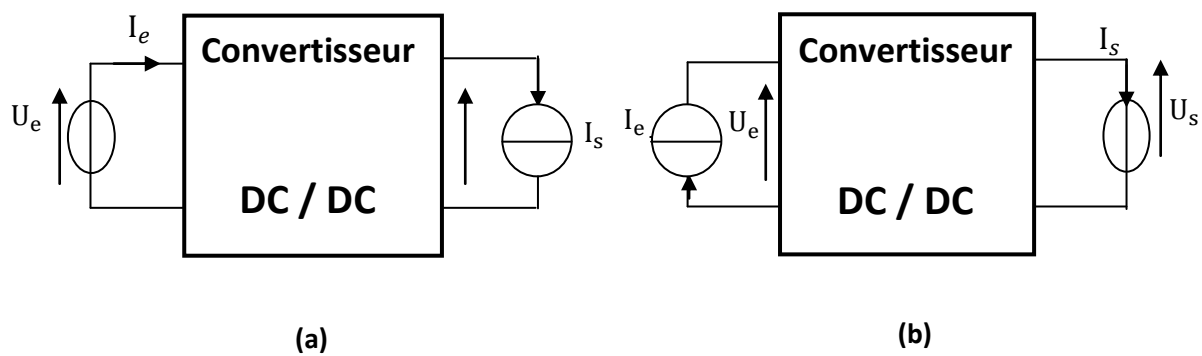


Figure III-1 : Convertisseur DC/DC

Une telle représentation peut laisser penser que dans tous les cas de figure, la source de courant  $I_e$  sera la charge qui suivant les modes de fonctionnement, absorbera ou restituera de la puissance, alors que la source de tension  $U_e$  est l'alimentation, susceptible de fournir ou de stocker de la puissance.

Pour certains convertisseurs, on est amené à changer une telle représentation, surtout si le transfert d'énergie ne peut se faire que de la source de courant vers la source de tension (Suivant la structure de convertisseur). On se réfère alors à la représentation symbolique donnée (figure III-1-b). [12]

Le convertisseur qui transforme l'énergie électrique délivrée sous forme continue pour alimenter une charge en continue est le « *hacheur* ».

Un hacheur est un convertisseur statique qui permet de régler la tension ou le courant dans la charge (récepteur) à partir d'une source de tension continue fixe.

Il s'agit donc d'un convertisseur continu-continu qui sert dans les *alimentations à découpage* et pour alimenter des moteurs à courant continu dont on veut faire varier la vitesse.[6]

Le hacheur est composé d'une diode et d'un semi-conducteur à double commande (interrupteur ouvert ou fermé) tel que transistor, thyristor IGBT ou GTO.

La diode conduit spontanément dès que la tension à ses bornes a la bonne polarité. Elle s'ouvre dès que le courant passe par zéro. Le semi-conducteur à double commande est muni de deux gâchettes : une de fermeture, l'autre d'ouverture. Il conduit si la tension à ses bornes à la bonne polarité et si l'on envoie une impulsion sur la gâchette de fermeture. On l'appellera de manière générale T, interrupteur commandable à l'ouverture et à la fermeture.

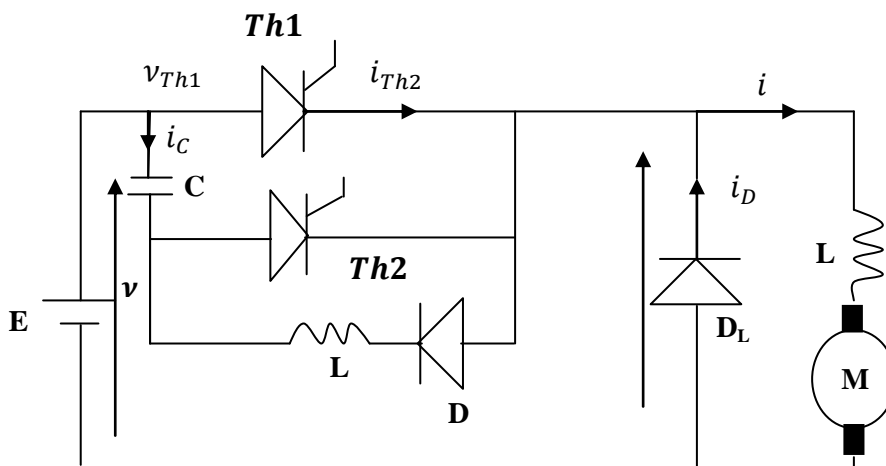
On rappelle que le rapport cyclique du hacheur est :

$$\alpha = \frac{\text{durée de conduction du composant principale}}{\text{période } T}$$

Selon le modèle du hacheur, un hacheur peut être abaisseur ou élévateur en tension (un quadrant), réversible en courant (deux quadrants), réversible en tension (deux quadrant), réversible en tension et en courant (quatre quadrants).

**a)- Hacheur à thyristor**

Les hacheurs à thyristors sont les hacheurs les plus couramment utilisés, car ils peuvent contrôler des courants intenses et des tensions élevées. Ils sont difficiles d'emploi car, si L'amorçage par la gâchette est difficile, La coupure du courant nécessite un passage à zéro de la tension aux bornes du thyristor ou la création d'une tension inverse sur la cathode.



*Figure III-2 : Hacheur à thyristor*

**b)- Hacheur à transistor**

L'apparition de transistor de puissance sur le marché a ouvert de nouvelle voie pour la modulation de l'énergie. On peut réaliser des transistors de puissance ayant un courant de collecteur 200 A et supportant une tension inverse pouvant atteindre 1000 V.

Ce montage permet d'obtenir des fréquences de hachage beaucoup plus importantes qu'avec des thyristors et ne nécessite pas de circuit d'extinction.

En revanche, un circuit d'aide à la commutation (CALC) est nécessaire pour permettre une commutation plus rapide, donc un meilleur rendement.

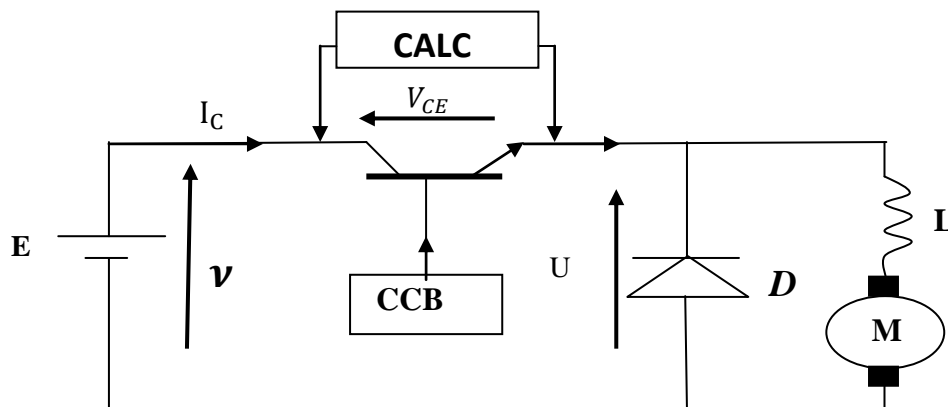


Figure III-3 : Hacheurs à transistor

Le transistor n'a pas de pouvoir de blocage en sens inverse. Le passage du courant en inverse sous l'effet d'une tension «  $V_{CE}$  » négative provoque sa destruction.

Le circuit d'aide à la commutation (CALC) : permet, par sa mise en conduction, de ralentir la croissance de la tension  $V_{CE}$  et, par son blocage, de ralentir la montée du courant  $I_C$ .

Circuit de commande de base (CCB) : assure l'isolement du circuit de puissance et un courant de base suffisant.

**III.2- LES HACHEURS A LIAISON DIRECTE**

Les hacheurs directs comportant des interrupteurs sans avoir besoin d'un élément de stockage d'énergie (inductance ou capacité).

Pour simplifier, on considère les composants parfaits; et en particulier l'interrupteur électronique unidirectionnel en courant commandable à l'ouverture et à la fermeture. Celui-ci peut être réalisé avec un transistor bipolaire, un MOSFET, un thyristor, un GTO, etc. [4]

On désignera par :

$U_E$  et  $i_E$ , la tension et le courant d'entrée,

$u_S$  et  $I_S$ , la tension et le courant de sortie,

$U_{S moy}$ ,  $I_{S moy}$ ,  $U_{E moy}$  et  $I_{E moy}$ , les valeurs moyennes de  $u_S$ ,  $I_S$ ,  $U_E$  et  $i_E$ .

Si on néglige les pertes à l'intérieur du hacheur, les puissances moyennes à l'entrée et à la sortie sont les mêmes dans un hacheur direct, puisqu'il n'y a pas d'élément interne de Stockage, il en est de même des puissances instantanées :

$$U_E \cdot i_E = u_S \cdot I_S$$

### III.2.1- Hacheur série (*buck converter*)

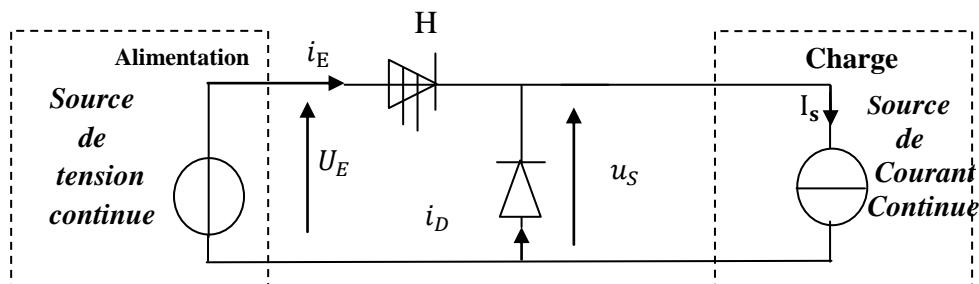
Le hacheur série, aussi abaisseur de tension ou buck converter, commande le débit :

- D'un générateur de tension dont la tension est toujours positive,
- Dans un récepteur de courant dont le courant ne peut devenir négatif. [3]

Il comporte un interrupteur à amorçage commandé (transistor, bipolaire, transistor MOS ou IGBT...) et un interrupteur à blocage spontané (diode).

Ce hacheur permet un « abaissement » de tension. Il est parfois appelé « hacheur dévolteur », car la tension moyen  $\langle U_{S moy} \rangle$  de la source de courant  $I_S$  réceptrice est inférieure à la tension  $U_E$  de la source génératrice. Par contre, le courant continu de sortie est supérieur au courant moyen d'entrée. [7]

L'interrupteur électronique H, placé en série avec la source de tension, est périodiquement fermé pendant une durée  $\alpha T$  et ouvert pendant  $(1 - \alpha)T$ , où  $T$  est la période.



*Figure III-4 : Principe du hacheur série*

- De  $t= 0$  à  $t =\alpha T$ , l'interrupteur électronique H est fermé, la diode D est bloquée et se comporte comme un interrupteur ouvert. La source de tension fournit de l'énergie à la source de courant. On a :

$$u_S =U_E \quad i_E=I_S \quad i_D=0$$

- De  $t= \alpha T$  à  $t =T$ , l'interrupteur électronique H est ouvert, la diode D est passante et se comporte comme un interrupteur fermé. On a:

$$u_S =0 \quad i_E=0 \quad i_D = I_S$$

D'où:

$$U_{S\text{ MOY}} = \alpha U_E \quad I_{E\text{ MOY}}=\alpha I_S$$

$$P_{E\text{ MOY}} =U_E I_{E\text{ MOY}} = \alpha U_E I_S= U_{S\text{ MOY}} I_S = P_{S\text{ MOY}}$$

La tension moyenne de sortie est inférieure à la tension continue d'entrée : le hacheur série est abaisseur de tension, d'où le nom de *hacheur dévolteur*. Par contre, le courant continu de sortie est supérieur au courant moyen d'entrée. [4]

Ce hacheur ne peut fonctionner que sur un quadrant lorsque le rapport cyclique  $\alpha$  varie (notation 1Q) puisque le transfert de la puissance ne peut être que positif ou nul. [7]

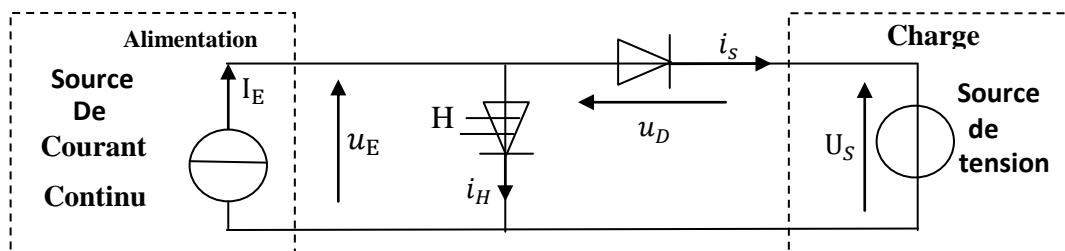
### III.2.2- Hacheur Parallèle (*boost converter*)

Le hacheur parallèle ou élévateur où boost converter commande le début

- D'un générateur de courant dont le courant  $i$  est toujours positif,
- Dans un récepteur de tension dont la tension  $u'$  ne peut d'avenir négatif. [4]

Ce hacheur permet une « élévation » de tension. Il est parfois appelé « *hacheur survolteur* », car la tension  $U_S$  de la source réceptrice est supérieure à  $\langle U_{E\text{ moy}} \rangle$ , tension moyenne de la source de courant  $i_E$  génératrice. [7]

L'interrupteur électronique H, placé en parallèle sur la source de courant, est périodiquement ouvert pendant une durée  $\beta T$  et fermé pendant  $\alpha T$  ( $\alpha = 1 - \beta$ ), où T est la période.



*Figure III-5 : Principe du hacheur parallèle*

De  $t=0$  à  $t=\beta T$ , l'interrupteur électronique H est ouvert, la diode D est passante et se comporte comme un interrupteur fermé. La source de tension fournit de l'énergie à la source de courant. On a :

$$u_E = U_S \quad i_S = I_E \quad i_H = 0$$

– De  $t = \beta T$  à  $t = T$ , l'interrupteur électronique H est fermé, la diode D est bloquée et se comporte comme un interrupteur ouvert. On a :

$$u_E = 0 \quad i_S = 0 \quad i_H = I_E$$

D'où :

$$I_{S\text{ MOY}} = \beta I_E = (1 - \alpha) I_E \quad U_{E\text{ MOY}} = \beta U_S = (1 - \alpha) U_S$$

$$P_{E\text{ MOY}} = U_{E\text{ MOY}} I_E = \beta U_S I_E = U_S I_{S\text{ MOY}} = P_{S\text{ MOY}}$$

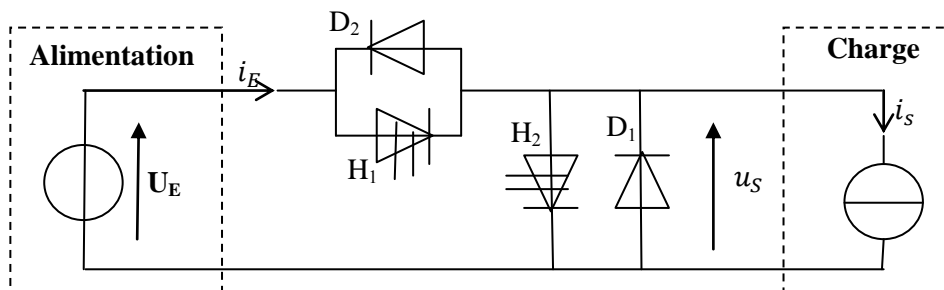
La tension continue de sortie est supérieure à la tension moyenne d'entrée : le hacheur parallèle est élévateur de tension, d'où le nom de *hacheur survolteur*. Par contre, le courant moyen de sortie est inférieur au courant continu d'entrée. [4]

Ce hacheur ne peut fonctionner que sur un quadrant lorsque le rapport cyclique  $\alpha$  varie (notation 1Q) puisque le transfert de la puissance ne peut être que positif ou nul. [7]

### III.2.3- Hacheur réversible en courant (*Hacheur deux quadrants ou en demi-Pont*)

Un hacheur deux quadrants associe un hacheur série et un hacheur parallèle. Il est réversible en courant mais pas en tension ; l'énergie est transférée de la source de tension continue vers la source de courant continu si  $I_S > 0$ , et réciproquement si

$I_S < 0$ . L'alimentation ( $U_E > 0$ ) doit être réversible en courant.

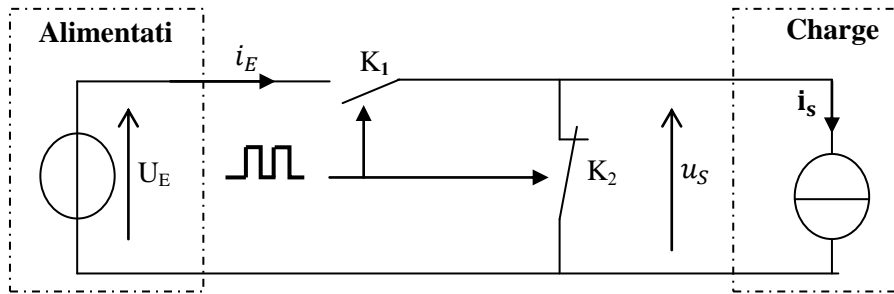


*Figure III-6 : Principe du hacheur deux quadrants*

On effectue une *commande complémentaire* des interrupteurs électroniques de telle manière que l'on ait :

- $H_1$  fermé ou  $D_2$  passante, et  $H_2$  ouvert et  $D_1$  bloquée, pendant  $\alpha T$ , puis
- $H_1$  ouvert et  $D_2$  bloquée, et  $H_2$  fermé ou  $D_1$  passante, pendant  $(1 - \alpha)T$ .

On obtient alors le schéma équivalent suivant (Figure III-7).



**Figure III-7 : Schéma équivalent au principe du hacheur deux quadrants**

– De  $t = 0$  à  $t = \alpha T$ ,  $K_1$  est fermé et  $K_2$  ouvert. On a :  $u_S = U_E$  et  $i_E = I_S$

De  $t = \alpha T$  à  $t = T$ ,  $K_1$  est ouvert et  $K_2$  fermé. On a :  $u_S = 0$  et  $i_E = 0$

D'où :

$$U_{S\text{ MOY}} = \alpha U_E \qquad I_{E\text{ MOY}} = \alpha I_S$$

$$P_{E\text{ MOY}} = U_E I_{E\text{ MOY}} = \alpha U_E I_S = U_{S\text{ MOY}} I_S = P_{S\text{ MOY}}$$

Deux quadrants ( $U_E > 0$ )	$I_S > 0$	$I_S < 0$
$0 < \alpha < 1 \Rightarrow U_{S\text{ MOY}} > 0$	$P_{E\text{ MOY}} = P_{S\text{ MOY}} > 0$	$P_{E\text{ MOY}} = P_{S\text{ MOY}} < 0$

Si  $P_{E\text{ MOY}} = P_{S\text{ MOY}} > 0$  alors la source de tension fournit de l'énergie à la source de courant, et réciproquement si  $P_{E\text{ MOY}} = P_{S\text{ MOY}} < 0$ . [4]

Ce hacheur peut fonctionner sur deux quadrants lorsque le rapport cyclique  $\alpha$  varie (notation 2Q) puisque le transfert de la puissance peut être positif ou négatif. [7]

➤ Application

Le hacheur réversible en courant permet:

- De faire varier la vitesse de la machine,
- Que celle-ci fonctionne en moteur ( $I_S > 0$ ) ou en générateur ( $I_S < 0$ ).

Pour une machine à courant continu à flux inducteur constant, la vitesse  $N$  est proportionnelle à la F-e-m, et le couple  $C$  au courant  $I_S$ .

La marche en génératrice correspond au freinage par récupération:

La machine prend alors l'énergie mécanique de la charge qu'elle freine et la transforme, en énergie électrique. La figure (III.8), donne l'allure des caractéristiques  $E' (I_S)$  ou  $N (C)$ . [2]

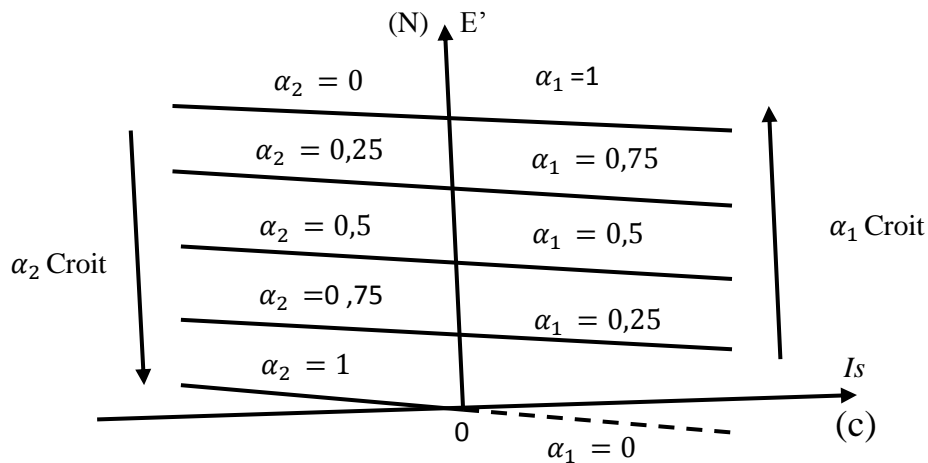


Figure III-8 : Allure des caractéristiques  $E' (I_S)$  ou  $N (C)$

III.2.4- Hacheur réversible en tension

La structure recherchée doit permettre une réversibilité de la puissance moyenne du dispositif liée à une réversibilité en tension de la source de courant qui reste unidirectionnelle en courant. La source de tension est une source de tension continue constante. La réversibilité de la puissance moyenne exige que cette source soit réversible en courant.

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

La structure générale du convertisseur doit donc faire appel à une structure en pont, représentée sur la figure (III.9).

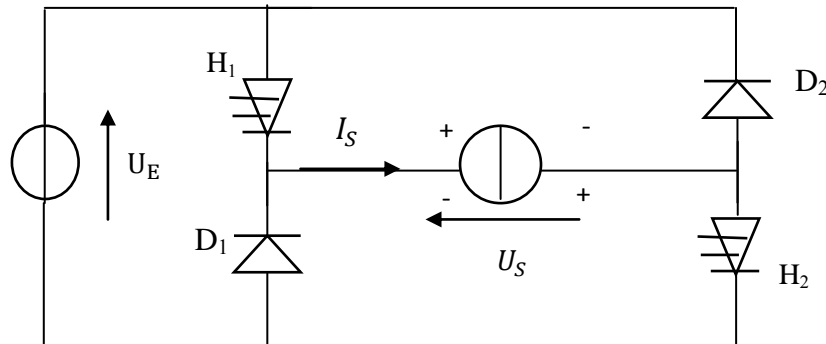


Figure III-9 : Principe de hacheur réversible en tension

➤ **Fonctionnement**

Lors de la première phase de fonctionnement, dans l'intervalle de temps  $[0, \alpha T]$  les deux interrupteurs commandés  $H_1$  et  $H_2$  sont fermés et les diodes  $D_1$  et  $D_2$  ouvertes. La charge est sous tension  $U_E$ .

Lors de la seconde phase de fonctionnement, sur l'intervalle de temps  $[\alpha T, T]$ , les interrupteurs commandés sont ouverts et les diodes passantes. La charge est sous tension  $(-U_E)$ .

➤ **Formes d'ondes**

La forme de la tension et de courant de sortie est donc la suivante :

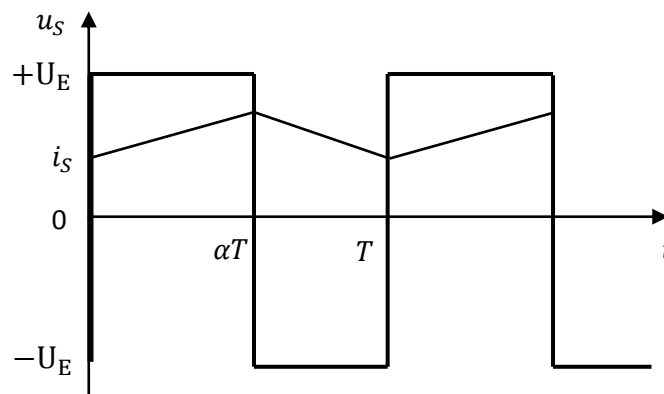


Figure III-10 : Forme de la tension et de courant

La tension moyenne de sortie  $U_{S moy}$  est alors donnée par :  $U_{S moy} = \alpha U_E + (1 - \alpha)(-U_E)$

Alors  $U_{S moy} = (2\alpha - 1)U_E$ .

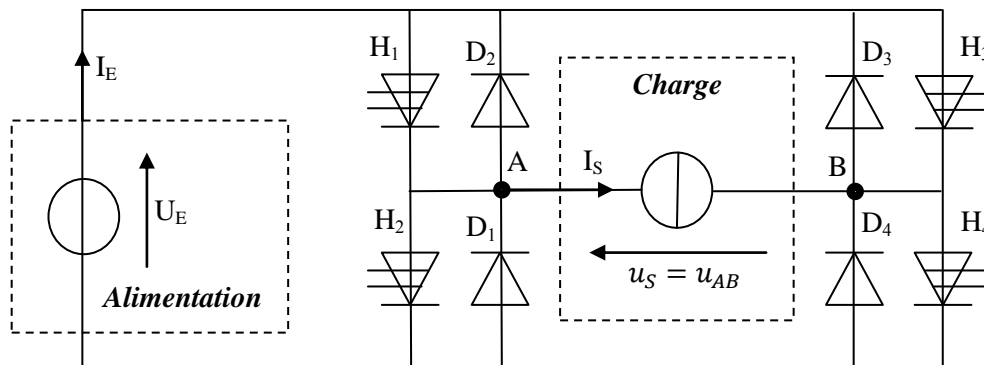
Si  $\alpha$  est supérieur à 0,5, alors, la tension moyenne de sortie est positive. En revanche, dans le cas où le rapport cyclique est inférieur à 0,5 la tension moyenne de sortie est négative [12].

➤ **Application**

L'application typique correspond à l'entraînement d'un treuil par une machine à courant continu qui est moteur à la montée, génératrice à la descente donc pour l'autre sens de rotation st de f.e.m et le même sens de courant.

**III.2.5- Hacheur réversible en tension et en courant (*hacheur quatre quadrants*)**

Un hacheur quatre quadrants associe deux hacheurs demi-pont. Il est réversible en courant et en tension ; l'énergie est transférée de la source de tension continue vers la source de courant continu si  $P_{S MOY} > 0$ , et réciproquement si  $P_{S MOY} < 0$ . L'alimentation ( $U_E > 0$ ) doit être réversible en courant.

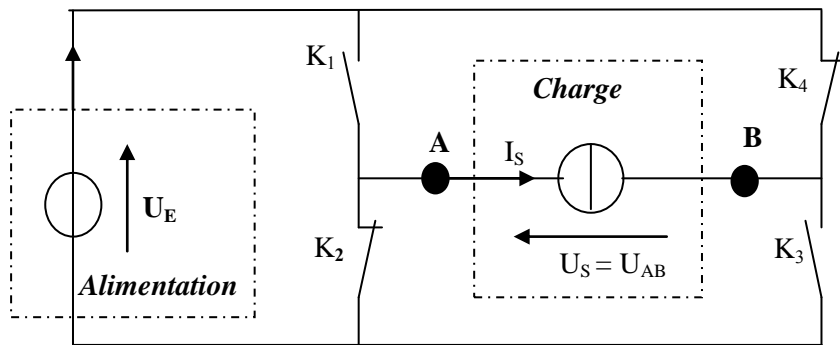


*Figure III-11 : Principe du hacheur quatre quadrants*

On effectue une *commande complémentaire* des interrupteurs électroniques de telle manière que l'on ait :

- $H_1$  fermé ou  $D_2$  passante,  $H_3$  fermé ou  $D_4$  passante,  $H_2$  ouvert et  $D_1$  bloquée, et  $H_4$  ouvert et  $D_3$  bloquée,  $\alpha T$ , puis
- $H_1$  ouvert et  $D_2$  bloquée,  $H_3$  ouvert et  $D_4$  bloquée,  $H_2$  fermé ou  $D_1$  passante, et  $H_4$  fermé ou  $D_3$  passante, pendant  $(1 - \alpha)T$ .

On obtient alors le schéma équivalent suivant (Fig. III-12).



**Figure III-12 : Schéma équivalent au principe du hacheur quatre quadrants**

– De  $t = 0$  à  $t = \alpha T$ ,  $K_1$  et  $K_3$  sont fermés,  $K_2$  et  $K_4$  ouverts. On a :

$$u_S = U_E \text{ et } i_E = I_S$$

– De  $t = \alpha T$  à  $t = T$ ,  $K_1$  et  $K_3$  sont ouverts,  $K_2$  et  $K_4$  fermés. On a :

$$u_S = -U_E \text{ et } i_E = -I_S$$

D'où: 
$$U_{S\text{ MOY}} = (2\alpha - 1)U_E \quad I_{E\text{ MOY}} = (2\alpha - 1)I_S$$

$$P_{E\text{ MOY}} = U_E I_{E\text{ MOY}} = (2\alpha - 1)U_E I_S = U_{S\text{ MOY}} I_S = P_{S\text{ MOY}}$$

Quatre quadrants ( $U_E > 0$ )	$I_S > 0$	$I_S < 0$
$0.5 < \alpha < 1 \Rightarrow U_{S\text{ MOY}} > 0$	$P_{E\text{ MOY}} = P_{S\text{ MOY}} > 0$	$P_{E\text{ MOY}} = P_{S\text{ MOY}} < 0$
$0 < \alpha < 0.5 \Rightarrow U_{S\text{ MOY}} < 0$	$P_{E\text{ MOY}} = P_{S\text{ MOY}} < 0$	$P_{E\text{ MOY}} = P_{S\text{ MOY}} > 0$

Si  $P_{E\text{ MOY}} = P_{S\text{ MOY}} > 0$  alors la source de tension fournit de l'énergie à la source de courant, et réciproquement si  $P_{E\text{ MOY}} = P_{S\text{ MOY}} < 0$ . [4]

Ce hacheur peut donc fonctionner sur quatre quadrants lorsque le rapport cyclique  $\alpha$  varie (notation 4Q) puisque le transfert de la puissance peut être positif ou négatif avec  $U'$  et  $I$  pouvant être tous deux positifs ou négatifs. [7]

➤ **Application**

Le hacheur en pont de la figure (III.10) permet, à partir d'une batterie d'accumulateurs, de faire fonctionner une machine à courant continu dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse.

On a encore : 
$$E' = U_{S moy} - RI_S$$

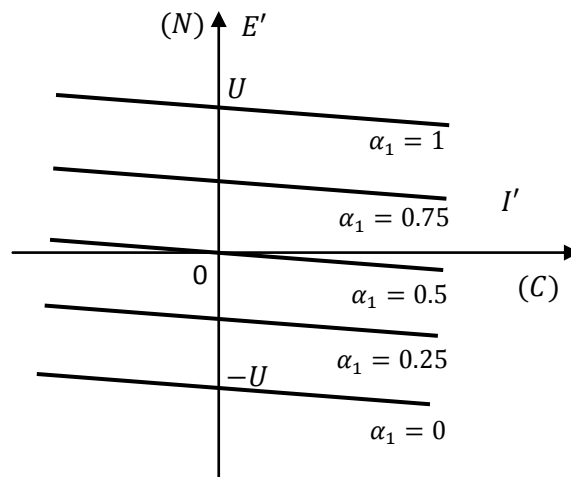
Avec :  $E'$  proportionnelle à la vitesse  $N$ ,

$I_S$  Proportionnel au couple  $C$ .

Lorsqu'on veut des inversions rapides du sens de rotation, on utilise la commande continue.

Figure (III.12) montre comment  $\alpha_1$  déplace les caractéristique  $E'(I_S)$  ou  $N(C)$ .

On a encore :



**Figure III-13: Allure des caractéristiques  $E'(I)$  ou  $N(C)$**

La machine fonctionne en moteur quand  $E'I'$  ou  $NC$  est positif.

Lorsque  $E'I_S$  ou  $NC$  est négatif, elle marche en génératrice, c'est-à-dire freine par récupération d'énergie. La marche en moteur et celle en génératrice sont possible, que la machine tourne à l'endroit ( $E'$  et  $N$  positives) ou à l'envers ( $E'$  et  $N$  négatives). [3]

### **III.3- LES HACHEURS A LIAISON INDIRECTE**

Si l'on veut pouvoir régler un transfert d'énergie entre deux sources de même nature, il faut utiliser un convertisseur indirect, c'est-à-dire un convertisseur comportant un étage intermédiaire. Celui-ci reçoit de l'énergie de l'une de source à travers une autre partie du convertisseur.

Nous nous limiterons au cas où cet étage intermédiaire est un élément de stockage d'énergie (inductance ou condensateur)

- Qu'on charge pendant une partie de la période en le reliant à l'entrée,
- Qu'en décharge pendant le reste de la période en le reliant à la sortie.

Lorsque les deux sources sont des sources de tension, l'élément de stockage est une inductance. Les sources qui s'opposent aux discontinuités de tension peuvent supporter les discontinuités du courant correspondant à l'ouverture ou à la fermeture de leur liaison avec cette inductance. Celle-ci joue le rôle de source intermédiaire de courant.

Lorsque le hacheur est monté entre deux sources de courant, l'élément de stockage auquel ces sources sont alternativement reliées doit être une capacité. Celle-ci joue le rôle de source intermédiaire de tension.

#### **➤ Alimentations à découpage**

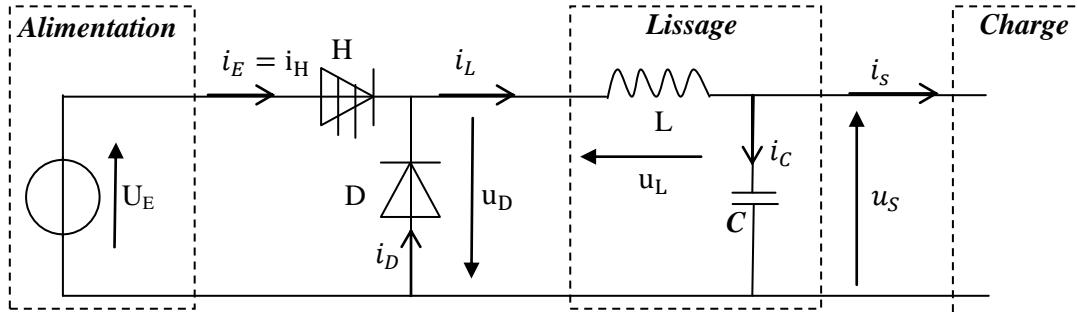
Les alimentations à découpage, ou convertisseurs tension continue / tension continue, sont utilisées chaque fois que l'on recherche un rendement élevé, un encombrement réduit ou un faible poids. Par contre, elles sont plus bruyantes que les alimentations linéaires, l'ondulation en sortie est plus grande et le temps de réponse plus long. Une alimentation à découpage permet d'obtenir une tension de sortie plus petite, plus grande, et/ou de signe opposé à la tension d'entrée.

#### **III.3.1- Hacheur série (ou dévolteur)**

La structure du convertisseur abaisseur de tension (*step-down, buck converter*) est celle d'un hacheur série avec lissage du courant et de la tension par un circuit LC.

Le convertisseur est à transfert direct (*forward*) d'énergie : l'énergie est transmise de l'alimentation à la charge sans élément intermédiaire d'accumulation. La tension

d'alimentation  $U_E$  est continue, et on suppose le courant dans la charge  $i_S$  continu en régime permanent établi.



*Figure III-14 : convertisseur abaisseur de tension*

**III.3.1a- Conduction continue du courant  $i_L$**

• **Fonctionnement** (Fig.III.13) : On considère ici que la tension  $u_S$  est continue et égale à  $U_{S\text{MOY}}$  et, en conséquence, que l'énergie stockée dans le condensateur ne varie pas, ce qui suppose une valeur suffisante de C.

- De  $t = 0$  à  $t = \alpha t$ , l'interrupteur électronique H est fermé et la diode D bloquée.

L'alimentation fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. On a :

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} = U_E - U_{S\text{MOY}} \text{ et } -u_D = U_E$$

D'où :

$$i_L = \frac{U_E - U_{S\text{MOY}}}{L} t + I_{L\text{MIN}}$$

- De  $t = \alpha T$  à  $t = T$ , l'interrupteur électronique H est ouvert et la diode D passante.

L'inductance délivre à la charge de l'énergie précédemment emmagasinée. On a :

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} = -U_{S\text{MOY}} \text{ et } -u_D = 0$$

D'où :

$$i_L = \frac{-U_{S\text{MOY}}}{L} (t - \alpha T) + I_{L\text{MAX}}$$

• **Valeurs moyennes**

$$\left. \begin{array}{l} -u_D = u_L + u_S \\ U_{L\text{MOY}} = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow U_{S\text{MOY}} = \alpha U_E$$

$$\left. \begin{array}{l} i_L = i_C + i_S \\ i_{C\text{ MOY}} = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow I_S = I_{L\text{ MOY}} = \frac{I_{L\text{ MAX}} + I_{L\text{ MIN}}}{2} = \frac{I_{E\text{ MOY}}}{\alpha}$$

• **Ondulation crête à crête – Choix de l'inductance.** Sachant que  $I_L(\alpha T) = I_{L\text{ MAX}}$

Et  $i_L(T) = I_{L\text{ MIN}}$ , on trouve :

$$\Delta I_L = I_{L\text{ MAX}} - I_{L\text{ MIN}} = \frac{I_E - U_{S\text{ MOY}}}{L} \alpha T = \frac{U_{S\text{ MOY}}}{L} (1 - \alpha) T$$

Soit : 
$$I_L = I_{L\text{ MAX}} - I_{L\text{ MIN}} = \frac{\alpha(1-\alpha)TU_E}{L} \Rightarrow L = \frac{\alpha(1-\alpha)TU_E}{\Delta I_L}$$

### III.3.1.b- Conduction discontinue du courant $i_L$

• **Fonctionnement (Fig. 34.3).** On considère ici que la tension  $u_S$  est continue et égale à  $U_{S\text{ MOY}}$ .

– De  $t = 0$  à  $t = \alpha T$ , l'interrupteur électronique H est fermé et la diode D bloquée. On a :

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} = U_E - U_{S\text{ MOY}} \quad \text{et} \quad -u_D = U_E$$

D'où :

$$i_L = \frac{U_E - U_{S\text{ MOY}}}{L} t \quad \text{Car} \quad I_{L\text{ MIN}} = 0$$

– De  $t = \alpha T$  à  $t = \gamma T$ , l'interrupteur électronique H est ouvert et la diode D passante. On a :

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} = -U_{S\text{ MOY}} \quad \text{et} \quad -u_D = 0$$

D'où :

$$i_L = \frac{-U_{S\text{ MOY}}}{L} (t - \alpha T) + I_{L\text{ MAX}}$$

– De  $t = \gamma T$  à  $t = T$ , l'interrupteur électronique H est ouvert et la diode D bloquée (absence d'énergie dans l'inductance). On a :

$$i_L = 0 \quad \text{et} \quad -u_D = U_{S\text{ MOY}}$$

### III.3.1.c-Formes d'ondes

Les formes d'ondes données maintenant supposent que les composants sont tous parfaits et que tension et courant de sortie,  $u_S$  et  $I_S$ , peuvent être assimilés à leur valeur moyenne (ondulations de sortie négligées).

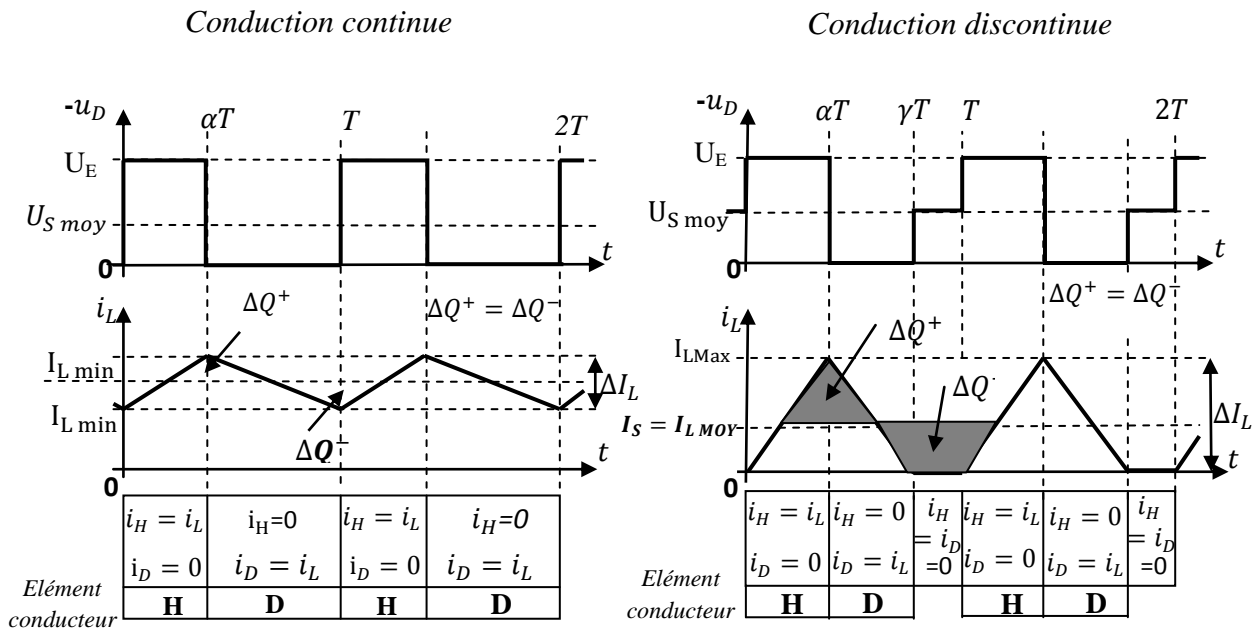


Figure III-15 : Formes d'ondes de la conduction continue et discontinue pour un hacheur série

Dans les deux types de fonctionnement, on voit que la valeur moyenne  $U_{S\ moy}$  de la tension disponible aux bornes de la charge est fonction du rapport cyclique  $\alpha$ . On réglera la valeur de  $U_{S\ moy}$  en modifiant le rapport cyclique  $\alpha$ :

- ✓ Soit en modifiant la durée de conduction de l'interrupteur I sans modifier la période T de commande (Modulation de Largeur d'Impulsion, MLI).
- ✓ Soit en modifiant la fréquence de commande ( $f = \frac{1}{T}$ ) sans modifier la durée de conduction de l'interrupteur.

### III.3.2- Hacheur parallèle (ou survolteur)

La structure du convertisseur élévateur de tension (*step-up, boost converter*) est celle d'un hacheur parallèle avec lissage de la tension de sortie par un condensateur. Le convertisseur est à transfert direct d'énergie.

Les applications principales du hacheur parallèle sont les alimentations de puissance régulées et le freinage par récupération des moteurs à courant continu. [4]

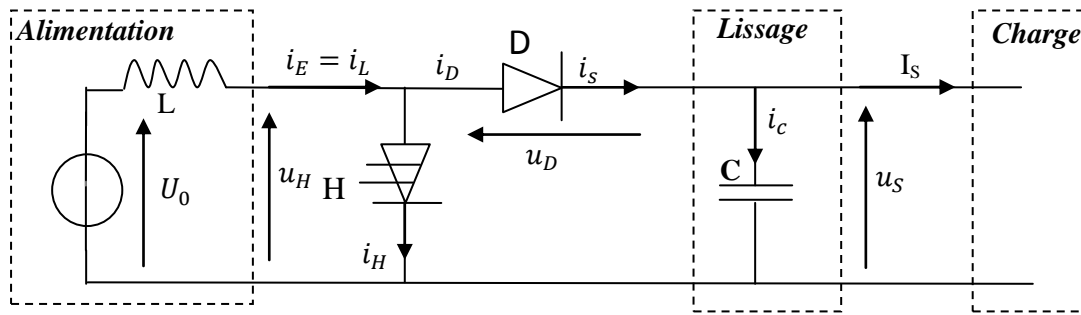


Figure III-16 : Convertisseur élévateur de tension

III.3.2-a : conduction continue

• **Fonctionnement** (Fig. III-17). On considère ici que la tension  $u_s$  est continue et égale à  $U_{S\text{ MOY}}$ .

– De  $t = 0$  à  $t = \beta T$ , l'interrupteur électronique H est ouvert et la diode D passante.

On a :  $U_0 = L \frac{di_L}{dt} + U_{S\text{ MOY}}$  et  $u_H = U_{S\text{ MOY}}$

D'où :  $i_L = \frac{U_0 - U_{S\text{ MOY}}}{L} t + I_{L\text{ MAX}}$

– De  $t = \beta T$  à  $t = T$ , l'interrupteur électronique H est fermé et la diode D bloquée.

On a :

$$U_0 = L \frac{di_L}{dt} \text{ et } u_H = 0$$

D'où :

$$i_L = \frac{U_0}{L} (t - \beta T) + I_{L\text{ MIN}}$$

• **Valeurs moyennes**

$$\left. \begin{array}{l} U_0 = u_L + u_H \\ U_{L\text{ MOY}} = 0 \\ U_{H\text{ MOY}} = \beta U_{S\text{ MOY}} \end{array} \right\} \Rightarrow U_{S\text{ MOY}} = \frac{U_0}{1-\alpha} \text{ en posant } \beta = 1 - \alpha$$

$$\left. \begin{array}{l} i_D = i_C + i_S \\ I_{C\text{ MOY}} = 0 \\ I_{D\text{ MOY}} = \beta \frac{I_{L\text{ MAX}} + I_{L\text{ MIN}}}{2} \end{array} \right\} \Rightarrow I_S = (1 - \alpha) \frac{I_{L\text{ MAX}} + I_{L\text{ MIN}}}{2} = (1 - \alpha) I_{L\text{ MOY}}$$

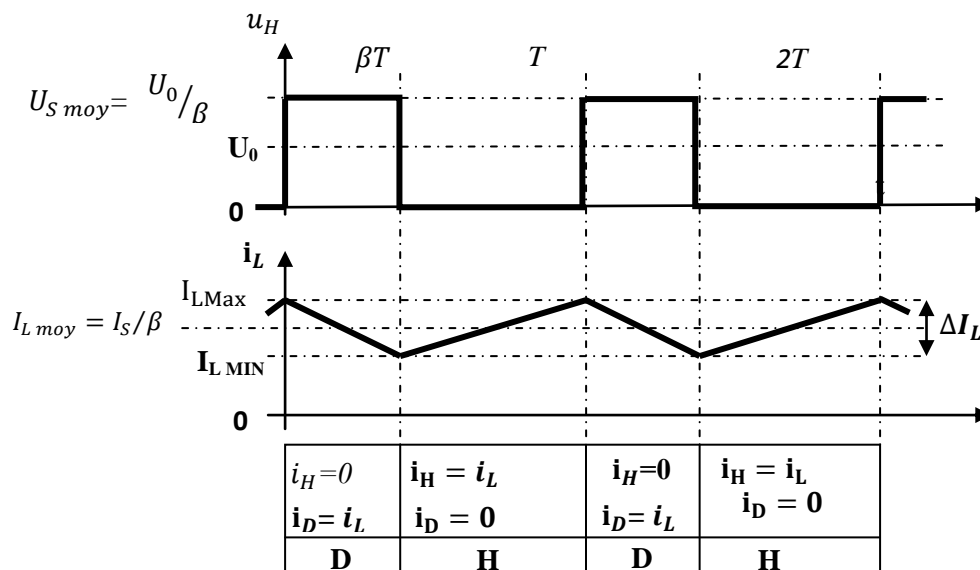
• **Ondulation crête à crête – Choix de l'inductance.**

Sachant que  $i_L(\beta T) = I_{L\ MIN}$  et  $i_L(T) = I_{L\ MAX}$ , on trouve :

$$\Delta I_L = I_{L\ MAX} - I_{L\ MIN} = \frac{\alpha U_0 T}{L} \Rightarrow L = \frac{\alpha U_0 T}{\Delta I_L}$$

**III.3.2.b- Formes d'ondes**

Les formes d'ondes sont de la forme suivante (en supposant la tension et le courant de sortie continu  $V_S$  et  $i_S$ ).



*Figure III-17: Formes d'ondes de la conduction continue pour un hacheur parallèle*

**III.3.3-Comparaison entre les hacheurs série et parallèle**

On peut profiter de la surtension due à l'ouverture du hacheur traversé par le courant d'un circuit inductif pour alimenter le récepteur sous une tension réglable supérieure à celle de la source. Il est alors intéressant de passer par dualité du hacheur série (figure III.14), au hacheur parallèle (figure III.16).

➤ **Hacheur série**

Il est abaisseur de la tension, donc éleveur de courant puisque la puissance se conserve. Le générateur d'entrée est un générateur de tension (source de faible impédance).

- Le hacheur H est en série avec la charge.

- Le lissage de courant est assuré par une inductance et par une diode de récupération.

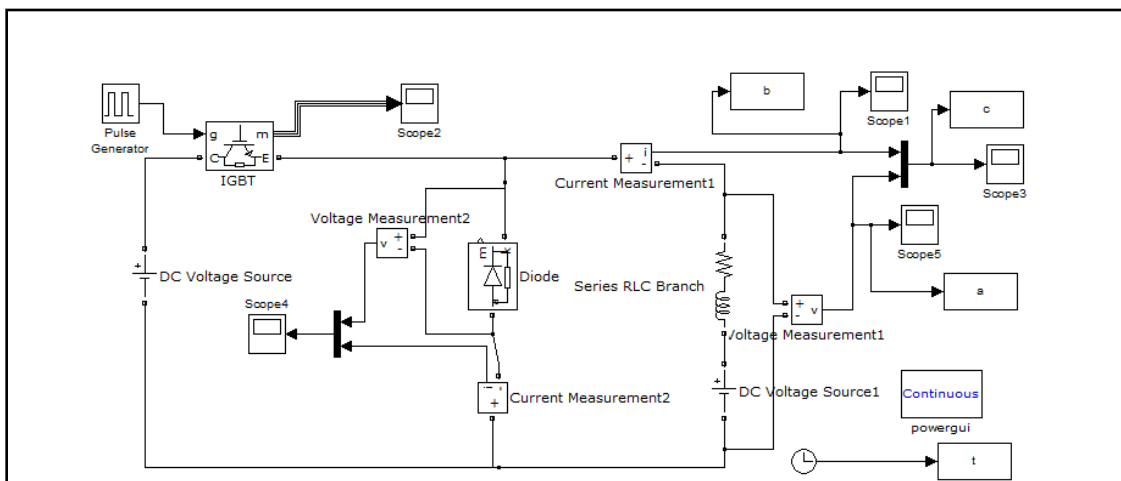
➤ **Hacheur parallèle**

Il est élévateur de tension, donc abaisseur de courant. Le générateur d'entrée est un générateur de courant (source de grande impédance).

Le hacheur H est en parallèle avec la charge. Le lissage du courant est assuré par une inductance et par une diode de blocage. [12]

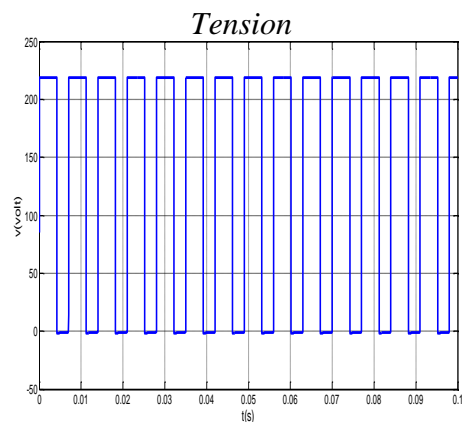
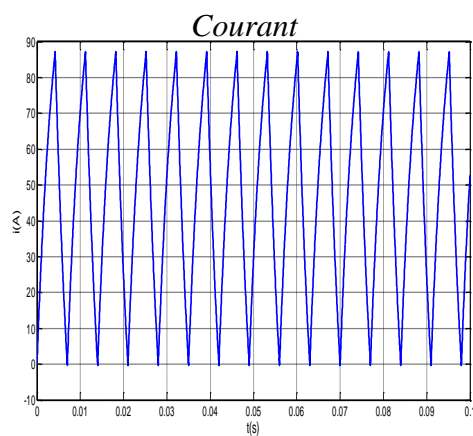
**III.4- RESULTAT DE SIMULATION :**

**III.4.1- Hacheur série :**



*Figure III-18 : Schéma de bloc d'un hacheur série*

**a) conduction continue**



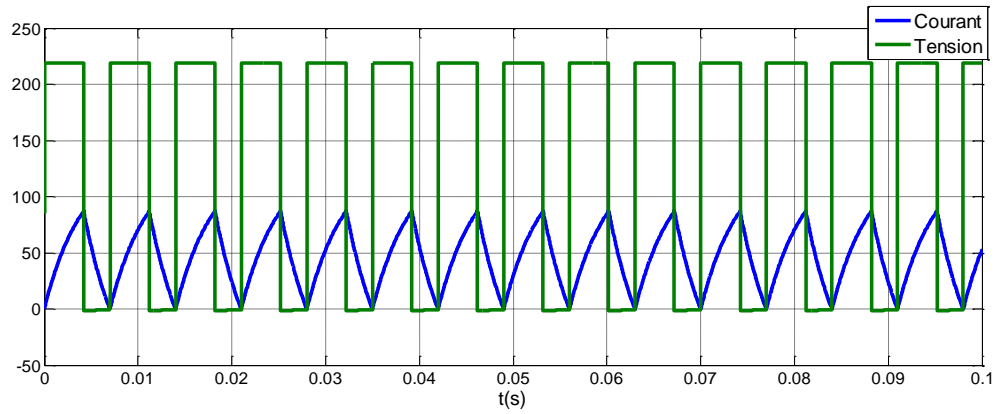


Figure III-19 : Courant et tension délivrée par un hacheur série (conduction continue)  
 $E = 220V$  ,  $R = 1\Omega$  ,  $L = 4e^{-3}H$  ,  $E' = 85V$  ,

b) conduction critique

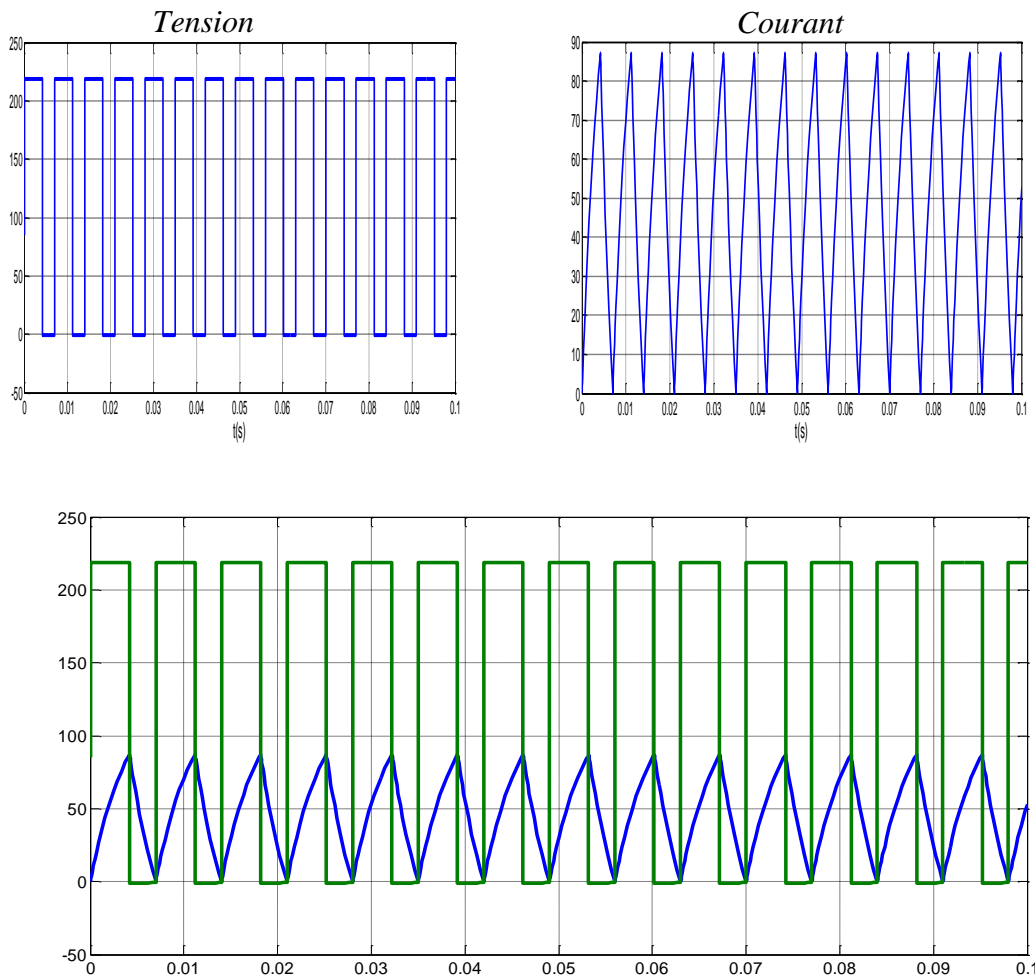


Figure III-20 : Tension et courant délivrée par un hacheur série (conduction critique)  
 $E = 220V$  ,  $R = 1\Omega$  ,  $L = 4e^{-3}H$  ,  $E' = 85V$

C) Conduction discontinue

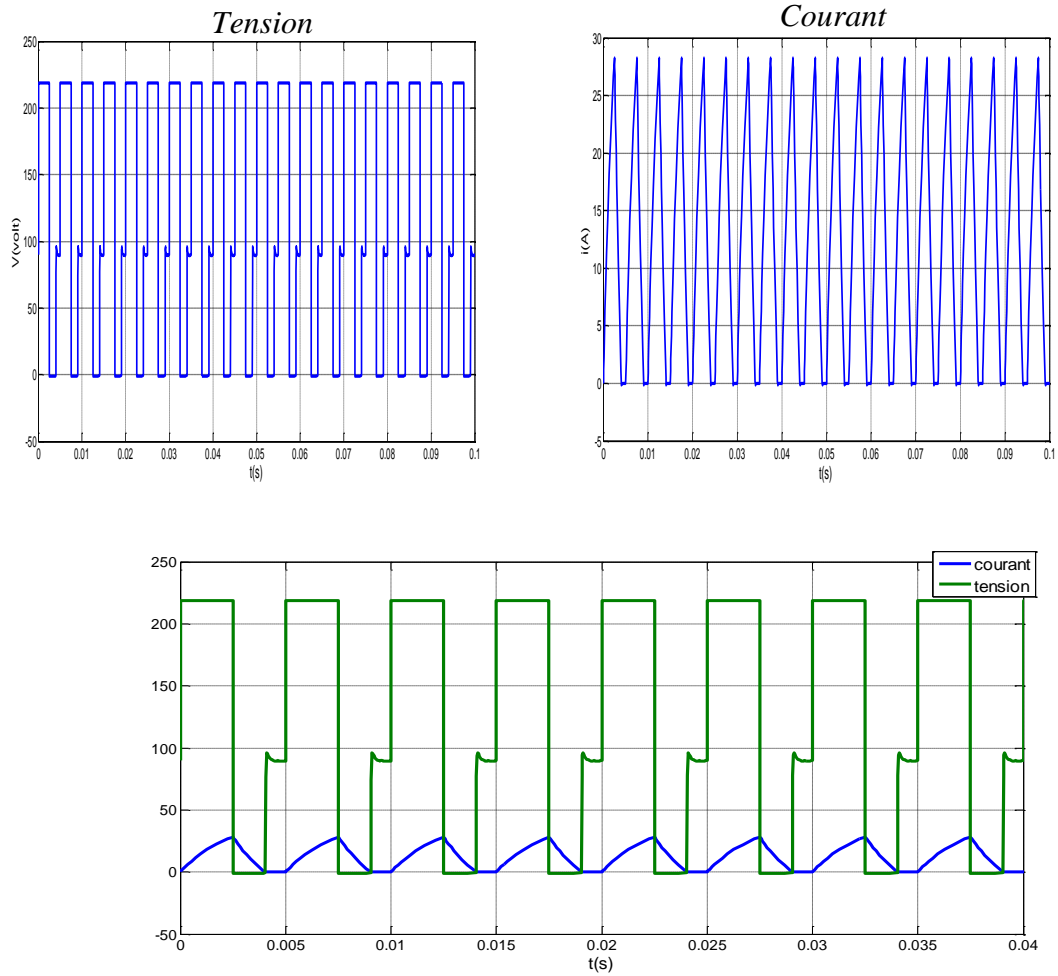


Figure III-21 : Courant et tension délivrée par un hacheur série (conduction discontinue)

$$E = 220V, R = 3\Omega, L = 70e^{-4}H, E' = 90V$$

III.4.2- Hacheur parallèle

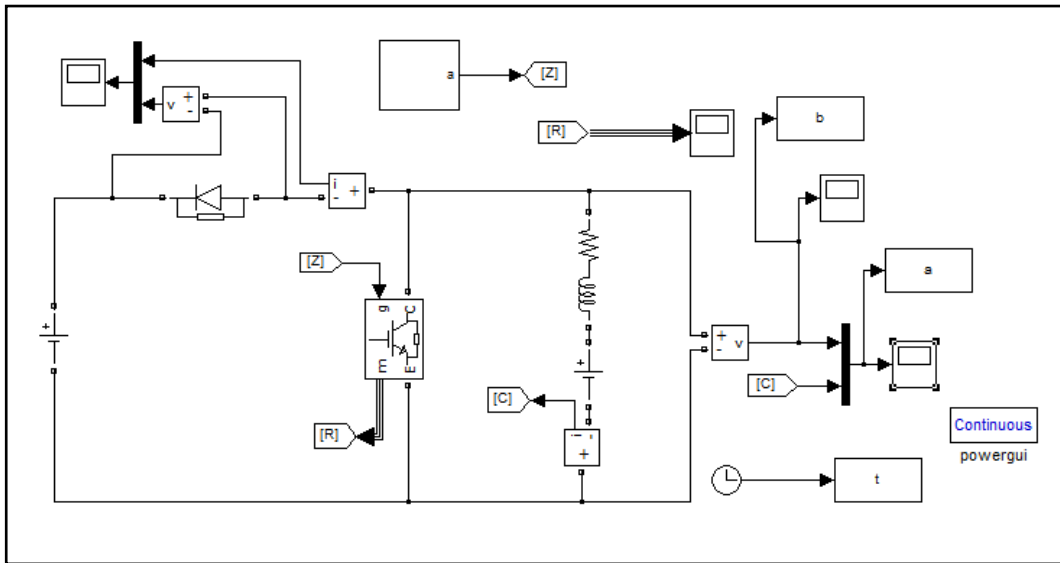


Figure III-22 : Schéma de bloc d'un hacheur parallèle

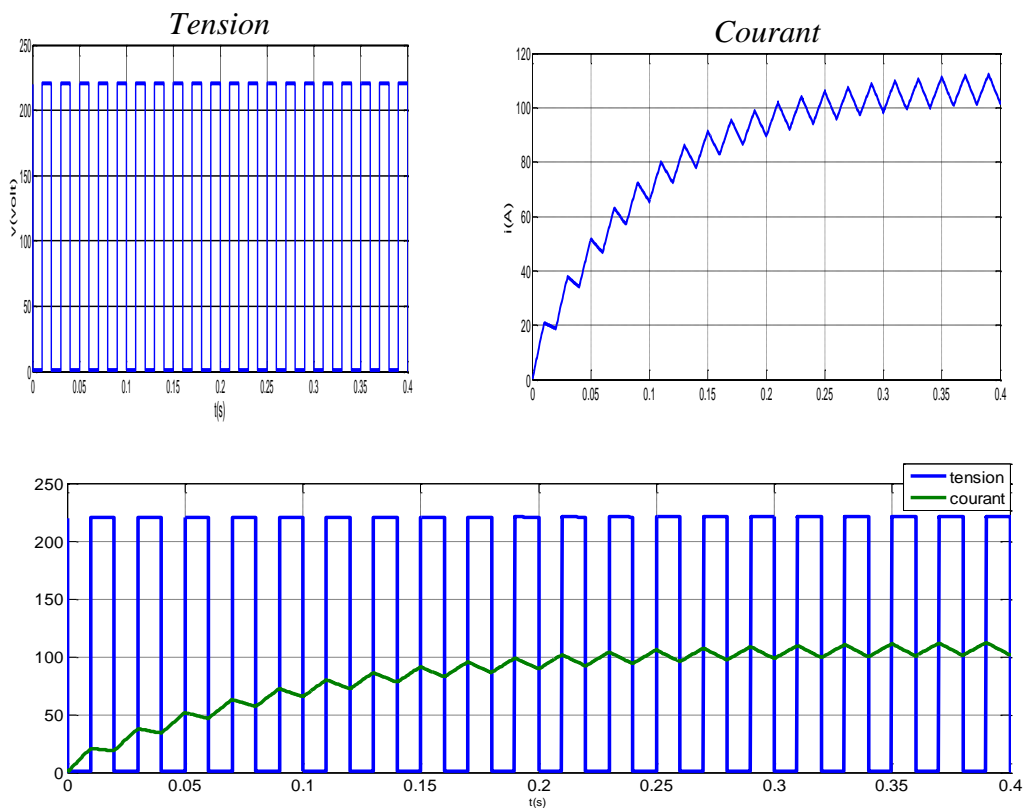


Figure III-23 : Tension et courant délivrée par un hacheur parallèle  
 $E = 220V$  ,  $R = 1\Omega$  ,  $L = 10e^{-2}H$  ,  $E' = 220V$

III.4.3- Hacheur réversible en courant (deux quadrant)

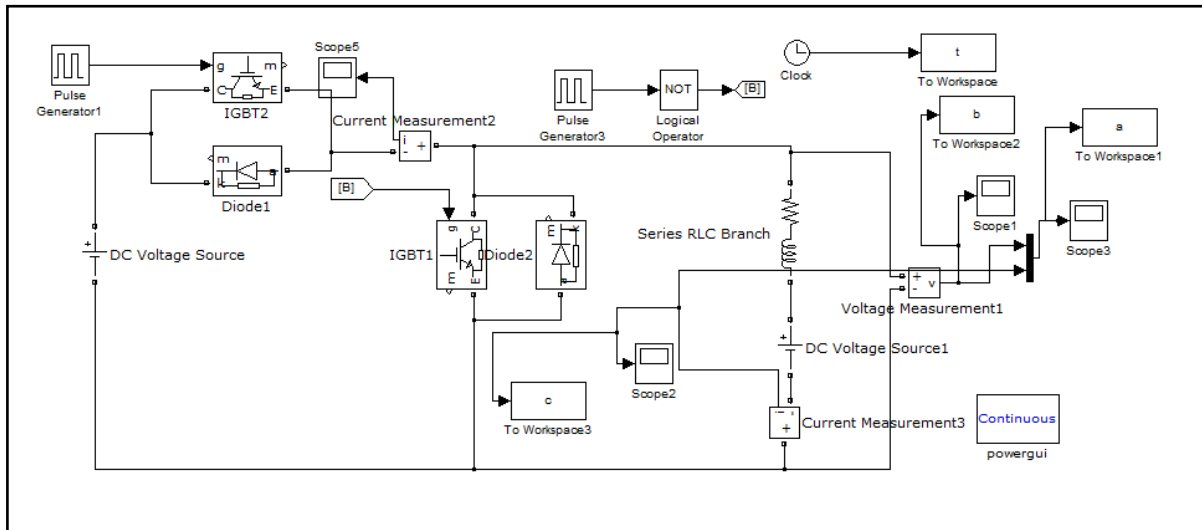


Figure III-24 : Schéma de bloc d'un hacheur réversible en courant (deux quadrant)

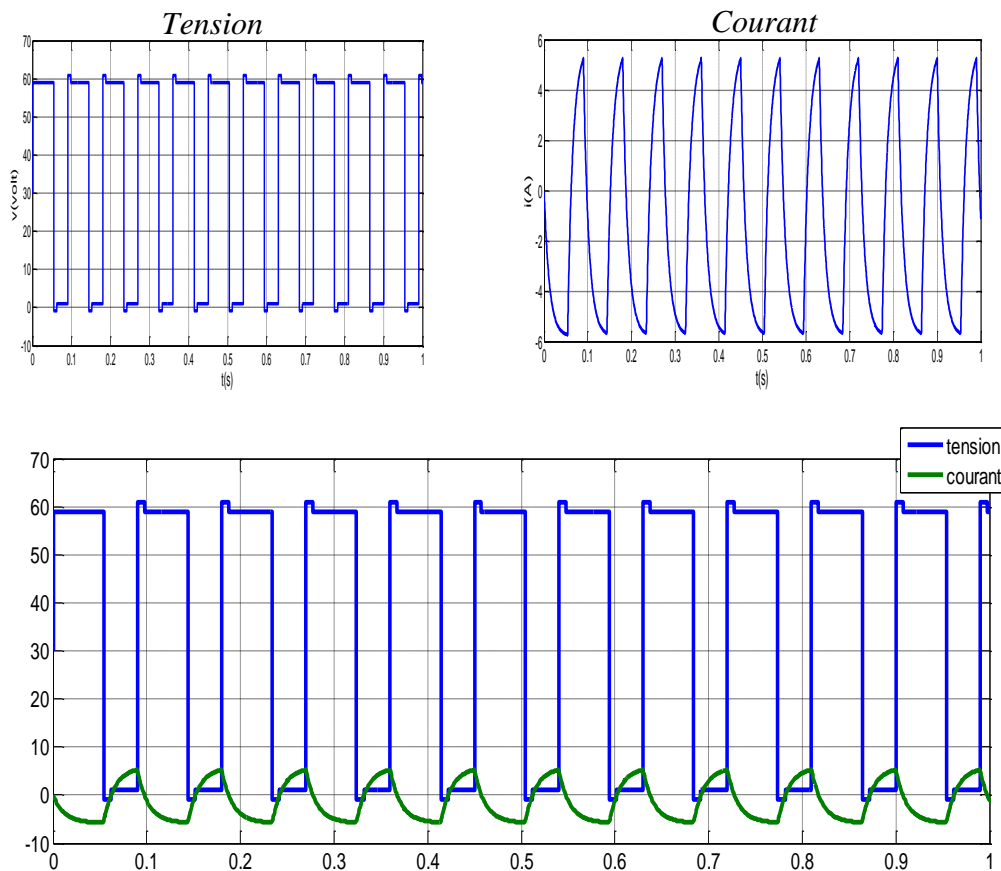


Figure III-25 : tension et courant délivrée par un hacheur réversible en courant  
 $E = 60V$  ,  $R = 5\Omega$  ,  $L = 600e^{-4}H$  ,  $E' = 30V$

III.4.4- Hacheur quatre quadrants

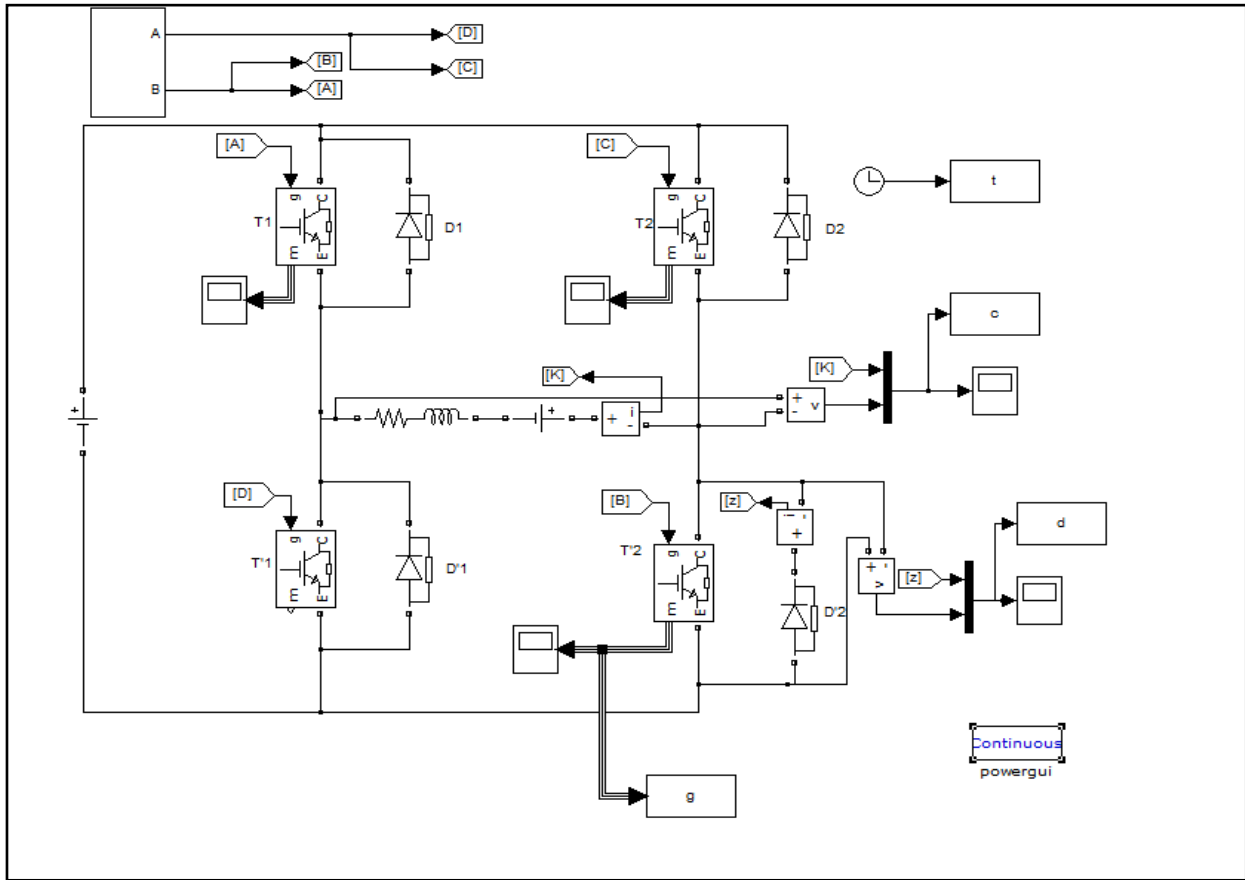
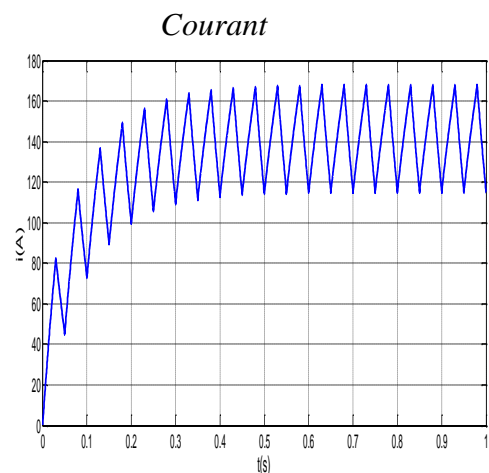
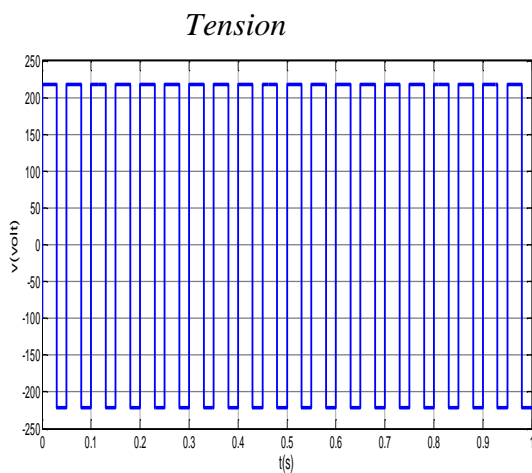


Figure III-26 : Schémas de bloc d'un hacheur quatre quadrants



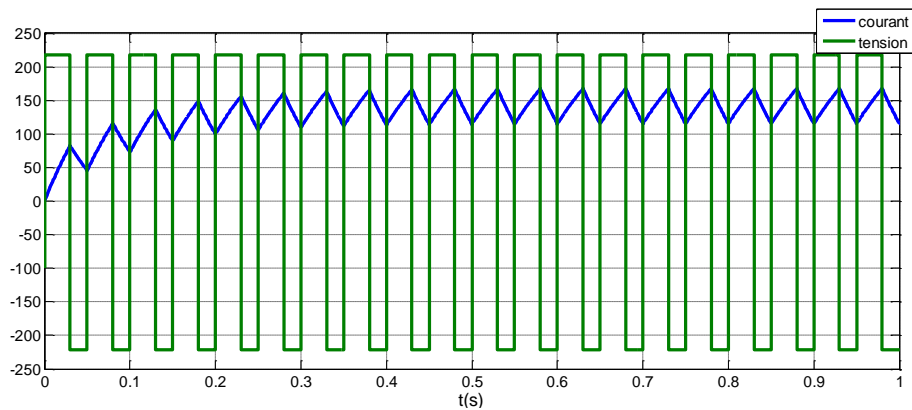


Figure III-27 : Tension et courant délivrée par un hacheur quatre quadrants  
 $E = 220V, E' = 100V, R = 1\Omega, L = 100e^{-3}H, f = 50Hz$

### III.5-CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents modèles des hacheurs, et l'utilisation dans le domaine de machine à courant continu, donc pour obtenir la tension continue variable on utilise un hacheur lorsque l'équipement est alimenté en courant continu, batterie d'accumulateurs par exemple.

On emploie :

- L'hacheur série lorsque le moteur ne doit travailler que dans le quadrant 1,
- L'hacheur à deux interrupteurs réversible en courant quand il doit travailler dans les quadrants 1 et 2,
- L'hacheur en pont réversible en courant et en tension du côté continu pour le fonctionnement dans les quatre quadrants. Ce hacheur est le préféré des industriels, par exemple dans la machine-outil, en commande numérique, pour faire la chasse aux temps morts, entre deux opérations d'usinage, par des accélérations et des freinages très importants.

The background features a decorative graphic consisting of three overlapping blue circles of varying sizes, arranged vertically. Two thin blue lines intersect at the top left and extend diagonally across the page, framing the central text.

# CHAPITRE IV

## LES CONVERTISSEURS CONTINU-CONTINU A INTERRUPTEURS RESONNANTS

## LES CONVERTISSEURS CONTINU-CONTINU À INTERRUPTEURS RÉSONNANTS

### IV.1- Introduction

L'augmentation de la fréquence de fonctionnement des hacheurs que nous avons étudiés est limitée par les pertes de commutation dans les interrupteurs qui fonctionnent en commutation dure.

Si on veut atteindre des fréquences de commutation plus élevées, il faut utiliser des montages dans lesquels tous les interrupteurs fonctionnent en commutation douce. C'est le cas des montages à interrupteurs résonnants.

En faisant travailler ces interrupteurs en commutation douce à la fermeture ou à l'ouverture, on peut augmenter sensiblement les valeurs maximales des fréquences de commutation.

### IV.2- Les interrupteurs résonnants

Un interrupteur résonnant peut être réalisé à partir:

- D'un seul interrupteur commandé, associé à un circuit résonnant d'ordre deux ou plus.
- Ou de deux interrupteurs commandés, permettant alors le fonctionnement en modulation de largeur d'impulsions à fréquence fixe, comme avec un interrupteur à commutations dures.

La fonction « interrupteur résonnant » correspond à un interrupteur dont l'une des commutations est douce, et l'autre dure mais adoucie. La commutation douce et l'adoucissement de la commutation dure sont obtenus à l'aide d'un circuit résonnant LC.

La commutation douce peut être :

- Soit la commutation à l'ouverture ; elle se fait alors au zéro de courant : mode ZCS (*Zero current switching*).
- Soit la commutation à la fermeture ; elle se fait alors à tension nulle : mode ZVS (*Zero voltage switching*).

Le fait qu'une commutation soit douce et l'autre dure nécessite le fonctionnement de l'interrupteur dans les deux quadrants à  $v/i$  positif du plan courant-tension de l'interrupteur (passage d'un quadrant à l'autre lors de la commutation douce, passage d'un segment à l'autre de même quadrant lors du la commutation commandée). La caractéristique de l'interrupteur doit être formée de trois segments.

Suivant que l'interrupteur est bidirectionnel en tension ou en courant est suivant que la commutation dure est celle de fermeture ou celle d'ouverture, en peut distinguer quatre types de fonctions « interrupteurs résonnant ».

**IV.2.1- Interrupteurs résonnants à commutation douce à l'ouverture (mode ZCS):**

La figure (IV-1) donne le schéma d'un interrupteur résonnant à ouverture au zéro de courant.

K : est commandé à la fermeture

L : adoucit la commutation à la fermeture

LC : provoque une oscillation conduisant à l'annulation de  $i$  donc à une ouverture spontanée.

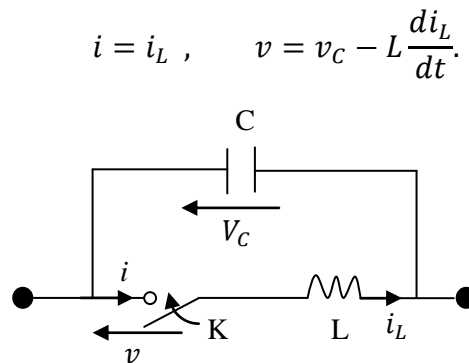


Figure IV-1 : Interrupteur résonnant à commutation douce à l'ouverture mode ZCS.

**IV.2.1.a- Fonction « Thyristor résonnant »**

La fonction « thyristor résonnant » est réalisée à partir d'un interrupteur bidirectionnel en tension commandé à la fermeture (figure IV-2), donc assurant la fonction "thyristor ", au quel on ajoute:

- Une inductance L en série pour adoucir la commutation à la fermeture.
- Un condensateur C monté en parallèle sur l'ensemble qui assure le retour au zéro du courant  $i$  en entrant en oscillation avec L.

Pour le thyristor, le retour du courant  $i$  à zéro est imposé par le circuit extérieur; pour le thyristor résonnant, se retour imposé par le circuit résonnant LC.

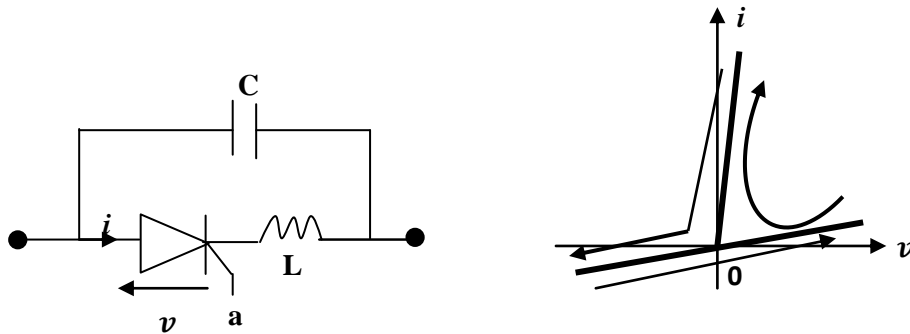


Figure IV-2 : Interrupteur à commutation douce à thyristor résonnant (Mode ZCS)

IV.2.1.b- Fonction " RCT résonnant ":

La fonction « RCT (*reverse conducting thyristor*) résonnant » s'obtient en remplaçant dans le schéma de la figure (IV-3), l'interrupteur K par un thyristor à conduction inverse, c'est-à-dire un interrupteur bidirectionnel en courant commandé à la fermeture (figure IV-3).

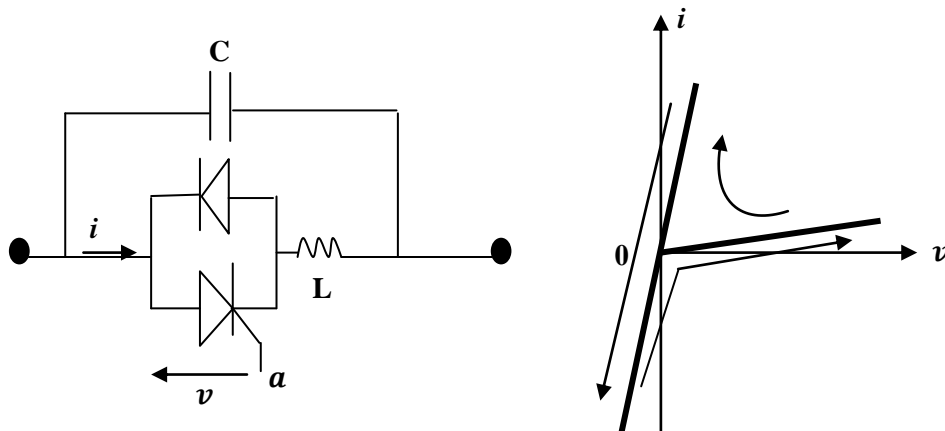


Figure IV-3 : Interrupteur à commutation douce à RCT Résonnant (MODE ZCS)

IV.2.2- Interrupteurs résonnants à commutation douce à la fermeture (MODE ZVS)

L'obtention d'un interrupteur résonnant à fermeture spontanée au zéro de tension  $v$  nécessite un interrupteur K commandé à l'ouverture, un condensateur C dérivé à ses bornes et une inductance en série avec cet ensemble (figure IV-4).

$$v = v_C ; i = i_L - c \frac{dv_C}{dt}$$

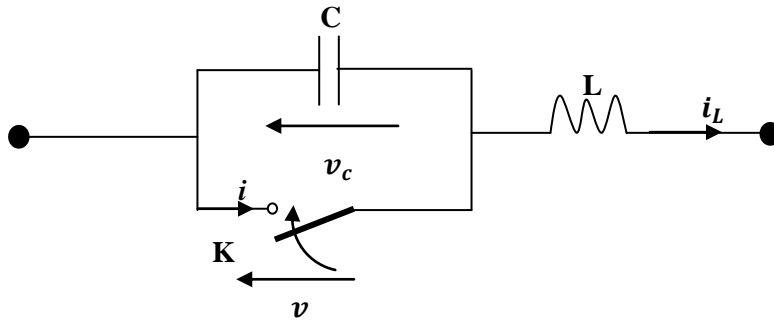


Figure IV-4 : Interrupteur résonnant à commutation douce à la fermeture (Mode ZVS)

IV.2.2.a- Fonction "Thyristor dual résonnant":

La fonction « thyristor dual résonnant » est réalisée à partir d'un interrupteur bidirectionnel en courant commander à l'ouverture (fonction thyristor dual). Avec un condensateur C branché en parallèle adoucit la commutation à l'ouverture et une inductance L en série avec l'ensemble, en entrant en oscillation avec C, assure le retour à zéro de la tension  $v$  entraînant l'amorçage spontané du composant figure (IV-5).

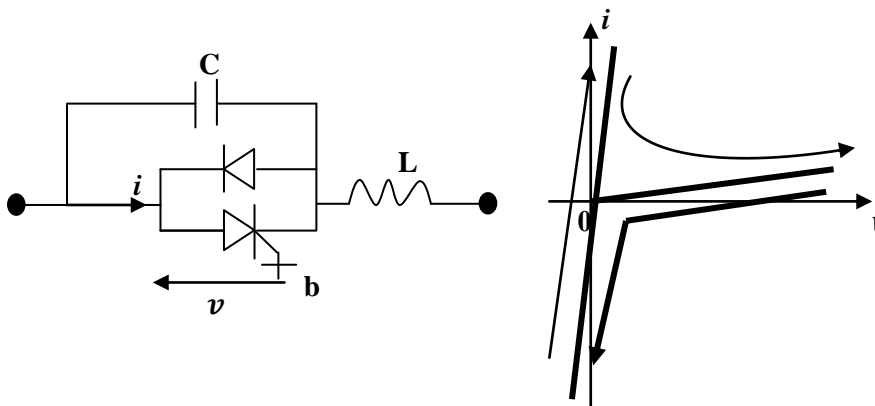


Figure IV-5 : Interrupteur résonnant à commutation douce à Thyristor dual résonnant (mode ZVS)

IV.2.2.b- Fonction "RCT dual résonnant":

La fonction « RCT dual résonnant » est obtenue en remplaçant dans le schéma de la figure (IV-6), l'interrupteur K par un interrupteur "RCT dual ", c'est-à-dire un interrupteur commandé à l'ouverture et bidirectionnel en tension figure (IV-6).

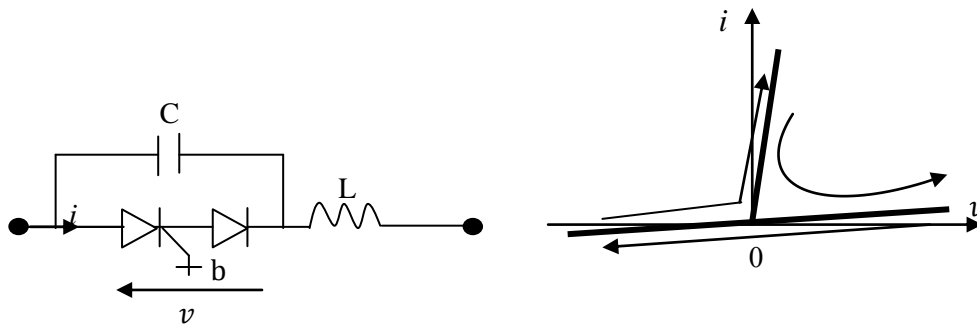


Figure IV-6 : Interrupteur résonnant à commutation Douce à RCT dual résonnant (mode ZVS)

### IV.3-Interrupteurs résonnants bicommandés

Les convertisseurs utilisant des structures d'interrupteur résonnant possédant une seule commutation commandée, ont généralement recours à une fréquence de commutation variable pour régler le transfert d'énergie entre le générateur et le récepteur.

Pour faire apparaître une seconde commutation commandée permettant de fonctionner à fréquence fixe en réglant le transfert d'énergie par le rapport cyclique, comme dans un convertisseur classique, tout en continuant à bénéficier de la réduction des pertes qu'apportent les commutations douces au zéro de courant ou de tension, il faut utiliser deux interrupteurs commandés qui possèdent chacun une commutation dure et une commutation douce. On obtient ainsi des structures d'interrupteurs résonnants bicommandés.

- Pour réaliser un interrupteur bicommandé on dispose un interrupteur commandée en série ou en parallèle avec chaque élément résonnant.
- Un interrupteur bicommandé résonnant en courant est formé d'un interrupteur commandé à la fermeture en série avec chaque élément L et C d'un circuit résonnant parallèle figure (IV-7-a). Par dualité, les interrupteurs bicommandés résonnants en tension sont obtenues en branchant un interrupteur commandée à l'ouverture en parallèle avec chaque élément L et C d'un circuit résonnant série figure (IV-7-b).

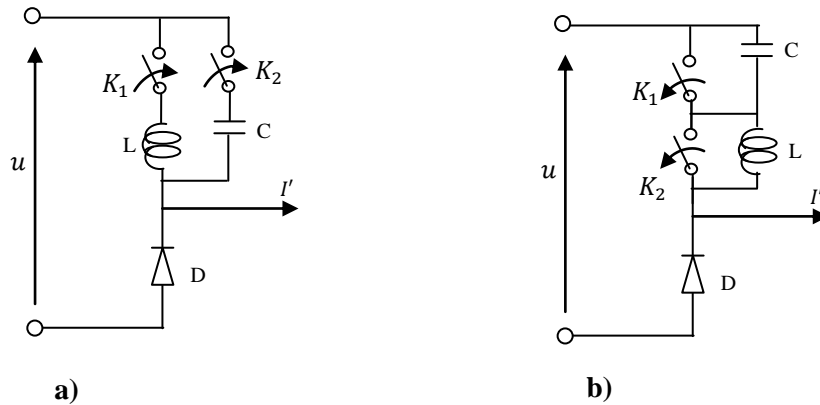


Figure IV-7 : les interrupteurs résonnants bicommandés  
(en courant et en tension)

Dans les deux cas, l'interrupteur  $K_1$  est l'interrupteur principal : c'est celui qui intervient dans les interrupteurs résonnants monocommandés. Il doit être à 3 segments et donc posséder une bidirectionnalité, en courant ou en tension.

L'interrupteur  $K_2$  est l'interrupteur auxiliaire qui apporte le degré de liberté supplémentaire permettant le fonctionnement en modulation de largeur d'impulsions. Il doit être lui aussi à 3 segments, mais nécessairement

- ✓ Bidirectionnel en courant pour la résonance en courant,
- ✓ Bidirectionnel en tension pour la résonance en tension.

Nous nous limiterons à l'étude du fonctionnement des interrupteur bicommandés résonnants en courant. Nous monterons, sur un exemple, comme les interrupteurs bicommandés résonnants en tension s'en déduisent par simple dualité.

### IV.3.1-Interrupteurs bicommandés résonnants en courant

#### IV.3.1.a-Interrupteur principal du type thyristor

Le montage d'interrupteur bicommandés résonnants en courant du type thyristor est présenté à la figure (IV-8). La différence apparait quand  $i_L$  repasse par  $I'$ , ce qui entraîne le blocage de la diode  $D_2$ ;  $T_1$  reste alors seul conducteur et écoule le courant  $I'$ . La durée de cet intervalle dépend de l'instant de fermeture de  $T_2$ , qui permet la poursuite de l'oscillation interrompue.

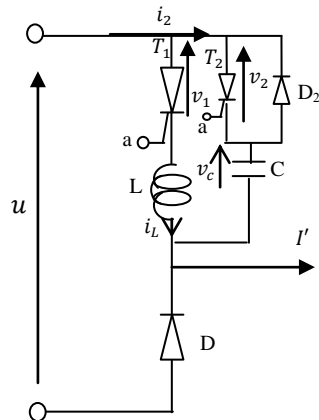


Figure IV-8: Montage d'Interrupteur principal du type thyristor

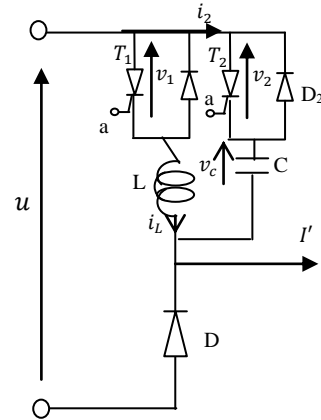


Figure IV-9 : Montage d'interrupteur principale du type RCT

On retrouve alors le fonctionnement de l'interrupteur monocommandé qui se bloque au passage de  $i_L$  par zéro.

On voit que l'interrupteur auxiliaire n'est parcouru par un courant que pendant le passage de l'état fermé de l'interrupteur principal et pendant le passage inverse.

#### IV.3.1.b- Interrupteur principale du type RCT

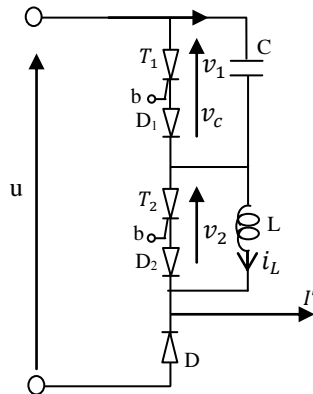
Le montage d'interrupteur bicommandés résonnants en courant du type RCT est présenté à la figure (IV-9). La diode  $D_1$  permet de prolonger la deuxième partie de l'oscillation et d'accélérer la remontée de la tension  $v_C$  vers  $U$ .

Dans un tel fonctionnement, l'effet de  $D_1$  est beaucoup moins important que dans un interrupteur monocommandé.

#### IV.3.2-Interrupteurs bicommandés résonnants en tension

Ces montages se déduisent des précédents par dualité. Par exemple, celui avec interrupteur principal du type RCT dual (figure IV-10) est le dual du montage à interrupteur principal du type RCT de la figure (IV-9).

Les fermetures de  $T_1$  et  $T_2$  se font au zéro de tension. Seules les ouvertures sont des commutations dures adoucies par C.



*Figure IV-10 : Interrupteurs bicommandés résonnants en tension avec interrupteur principal du type RCT dual*

#### **IV.4- Cellule de commutation à interrupteur résonnant**

Pour étudier les propriétés d'un interrupteur résonnant, il faut examiner son fonctionnement dans la cellule de commutation où il assure la commutation commandée qui provoque ensuite la commutation spontanée.

Pour simplifier cette étude nous supposerons que la diode à laquelle l'interrupteur résonnant prend ou cède le courant commuté  $i'$  durant les commutations et on les notera  $U$  et  $i'$ .

L'évaluation de la valeur moyenne de la tension  $v_c$  aux bornes du condensateur  $C$  du circuit oscillant permettra par la suite d'établir les relations liant grandeurs d'entrée et grandeurs de sortie pour les divers types de convertisseurs.

On désignera par  $\omega_0$  la pulsation de circuit oscillant, par  $f_0$  la fréquence correspondante, par  $f$  La fréquence du fonctionnement de montage :

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} .$$

##### **IV.4.1- Ouverture au passage par zéro du courant (ZCS)**

###### **IV.4.1.a-Cellule élémentaire de commutation à thyristor résonnant**

Le schéma est indiqué à la figure (IV-11). Le condensateur  $C$  est branché aux bornes de l'ensemble thyristor  $Th$ -inductance  $L$  ; mais il pourrait être placé en parallèle sur la diode  $D$ .

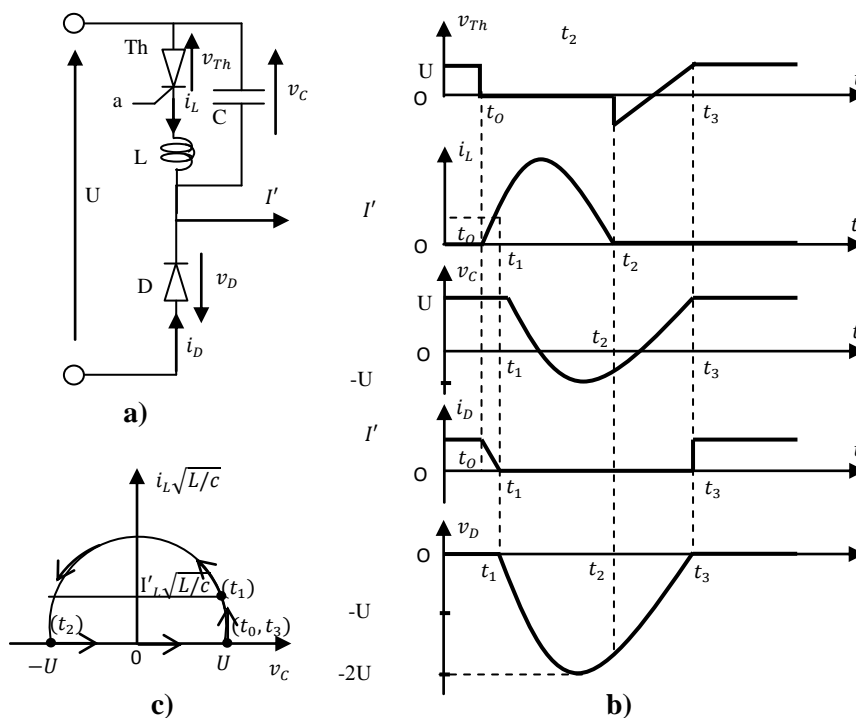


Figure IV-11 : cellule élémentaire de commutation à thyristor résonnant

IV.4.1.b-Cellule élémentaire de commutation à RCT résonnant

La figure (IV-12) a donne le schéma de la cellule.

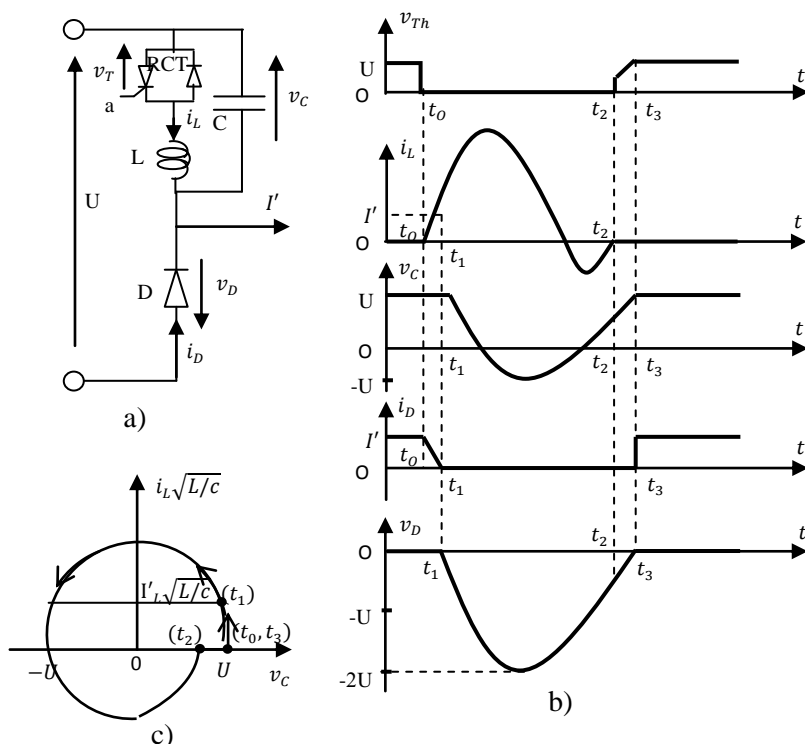


Figure IV-12 : Cellule élémentaire de commutation à RCT résonnant

IV.4.2- Fermeture au passage par zéro de la tension (ZVS)

IV.4.2.a-Cellule élémentaire de commutation à thyristor dual résonnant

La figure (IV-13) donne le schéma de la cellule, la forme d'onde des diverses variables et le trajet du point de fonctionnement dans le plan de phase. La cellule est la duale de celle à thyristor résonnant. Les équations et formes d'ondes établies pour celles-ci directement utilisables à condition de permuter.

$$U \text{ et } I' , i_L \text{ et } v_c , C \text{ et } L.$$

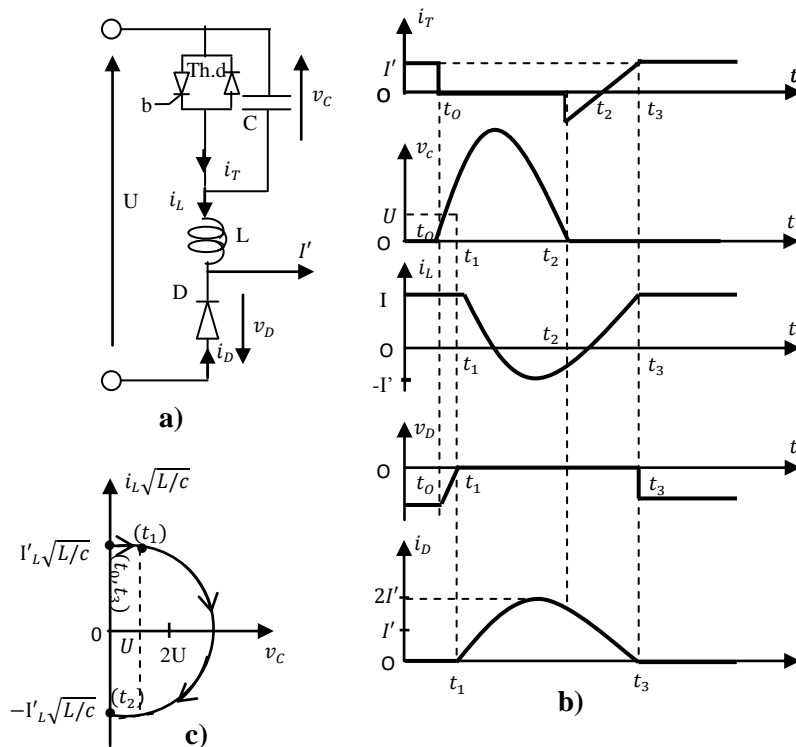


Figure IV-13 : Cellule élémentaire de commutation à thyristor dual résonnant

IV.4.2.b-Cellule élémentaire de commutation RCT dual résonnant

Cette cellule figure (IV-14-a) est la dual de celle à RCT résonnant.

La différence par rapport au montage précédent est l'allongement de la phase 2 qui correspond à l'état bloqué de l'interrupteur commandé. Celui-ci était réversible en tension à cause de la diode en série qu'il comporte; l'oscillation se poursuit après le premier passage de  $v_c$  par zéro pour ne cesse que lorsque  $v_c$  redevient nul figure (IV-14-b).

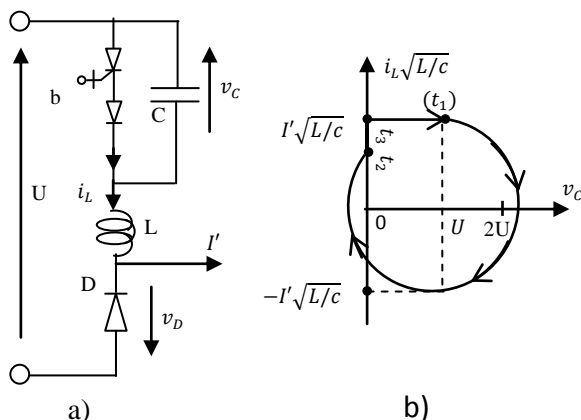


Figure IV-14 : Cellule élémentaire de commutation à RCT dual résonnant

### IV.5- Convertisseurs continu-continu quasi-résonnant en mode ZCS

Les convertisseurs utilisant des interrupteurs résonnants sont dits "quasi-résonnant", pour les différencier des convertisseurs résonnants ou à résonance dans lesquels les commutations douces sont assurées par la nature oscillante peu amortie de récepteur.

On appelle convertisseurs quasi-résonnants ceux qui utilisent ces interrupteurs pour les distinguer des convertisseurs à résonance, où le circuit résonnant n'est pas inséré dans l'interrupteur mais constitue le récepteur.

#### IV.5.1- Hacheur série quasi-résonnant en mode ZCS:

En appliquant directement au hacheur série :

$U$  : est la tension du générateur de tension d'entrée,

$U'$  : est la valeur moyenne de la tension de sortie  $u'$ .

$I'$  : le courant de récepteur de courant de sortie.

#### IV.5.1.a-Montage avec thyristor résonnant :

La figure (IV-15) donne le schéma d'une alimentation à découpage avec hacheur série dans lequel on a remplacé l'interrupteur à fermeture et ouverture commandées par un interrupteur à thyristor résonnant.

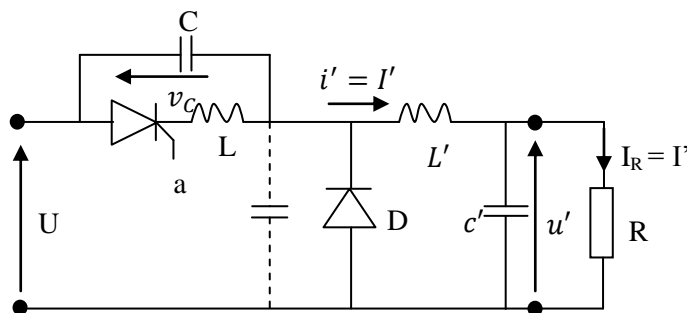


Figure IV-15 : Hacheur série quasi -résonnant à thyristor Résonnant en mode ZCS.

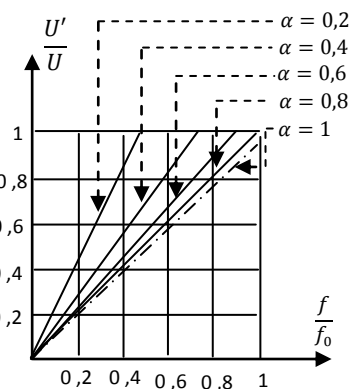


Figure IV-16 : Les variations de  $U'/U$  en fonction de  $f/f_0$

Si en néglige la chute de tension moyenne due à la résistance de l'inductance  $L'$ , la valeur moyenne  $U'$  de la tension de sortie  $u'$  est liée à la tension d'entrer par :

$$U' = U - v_{c\ moy}$$

$$U' = U[1 - F(Th)]$$

$F(Th)$  Étant donné par la relation :

$$F(Th) = \frac{v_{c\ moy}}{U} = 1 - \frac{1}{2\pi} \frac{f}{f_0} \left[ \pi + \text{Arc sin} \alpha + \frac{\alpha}{2} + \frac{1}{\alpha} \left( 1 + \sqrt{1 - \alpha^2} \right) \right]$$

La figure (IV-16) montre les variations de  $U'/U$  en fonction de  $f/f_0$  pour diverses valeurs de  $\alpha$ . On voit que la tension de sortie dépend beaucoup du courant  $I'$  absorbé par le récepteur.

#### IV.5.1.b-Montage avec RCT résonnant

Si on remplace le thyristor résonnant, qui est unidirectionnel en courant par un RCT résonnant bidirectionnel en courant, en obtient le montage schématisé à la figure (IV-17).

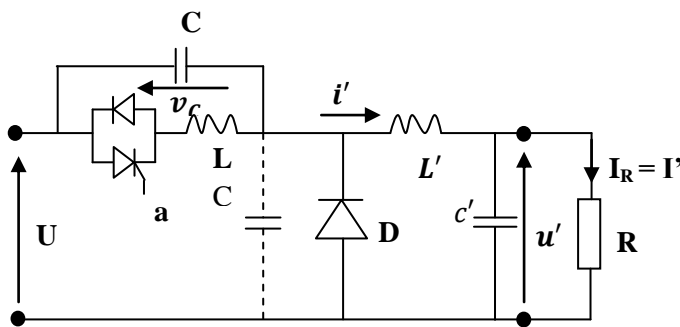


Figure IV-17 : Hacheur série quasi-résonnant en mode ZCS a' RCT Résonnant.

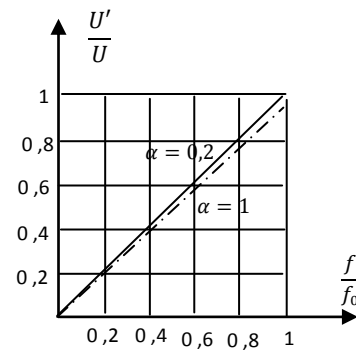


Figure IV-18 : Les variations de  $U'/U$  en fonction de  $f/f_0$

On a encore 
$$U' = U - v_{c\ moy}$$

Mais la valeur relative de  $v_{c\ moy}$  est maintenant donnée par la relation :

$$\text{Où } F(RCT) = \frac{v_{c\ moy}}{U} = 1 - \frac{1}{2\pi} \frac{f}{f_0} \left[ 2\pi + \text{Arc sin} \alpha + \frac{\alpha}{2} + \frac{1}{\alpha} \left( 1 + \sqrt{1 - \alpha^2} \right) \right]$$

$$U' = U[1 - F(RCT)]$$

La figure (IV-18) donne les variations de  $U'/U$  en fonction de  $f/f_0$ .

Contrairement au montage à thyristor résonnant, on voit que la tension de sortie est pratiquement indépendante de  $\alpha$ , c'est -à -dire du courant  $I'$  fourni au récepteur.

Pour ces deux montages, le condensateur du circuit oscillant LC peut être branché aux bornes de la diode D, comme indiqué, en traits interrompus, sur les figures (IV-15) et (IV-17).

**IV.5.2- Hacheur parallèle quasi-résonnant en (Mode ZCS)**

On peut appliquer au hacheur parallèle les résultats de l'étude des cellules de commutation, à condition de remarquer figure (IV-19) que :

- La tension aux bornes de la cellule est maintenant la tension  $U'$  du récepteur de tension monté à la sortie du hacheur.
- La tension d'entrée à la même valeur moyenne que la tension aux bornes du condensateur  $U = v_{c moy}$ .

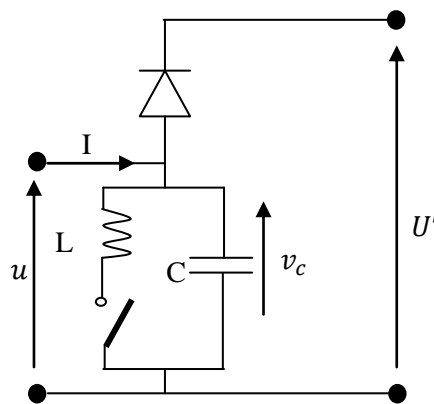


Figure IV-19 : Hacheur parallèle quasi-résonnants en Mode ZCS

**IV.5.2.a-Montage avec thyristor résonnant (unidirectionnel)**

La figure (IV-20) donne le schéma de principe avec le hacheur monté entre la source de courant « I » et le récepteur de tension « U' ».

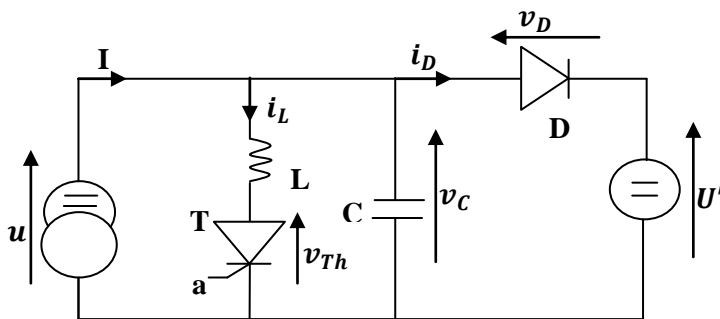


Figure IV-20 : Hacheur parallèle quasi .résonnant à Thyristor résonnant en mode ZCS

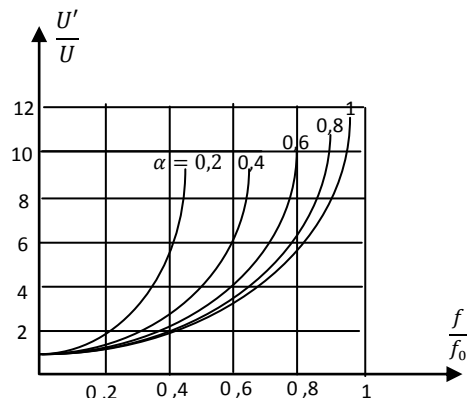


Figure IV-21 : Les variations de  $U'/U$  en fonction de  $f/f_0$

Puisque  $u$  égale  $v_c$ , donc la valeur moyenne  $U$  de  $u$  en fonction de  $U'$  et  $\alpha$  donne :

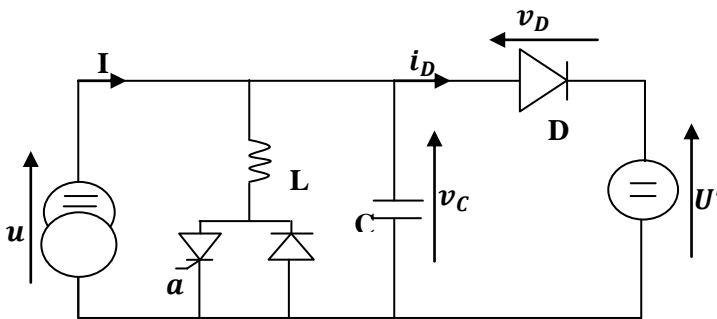
$$U = v_{c\ moy} = U'F(Th)$$

$$\frac{U'}{U} = \frac{1}{F(Th)}$$

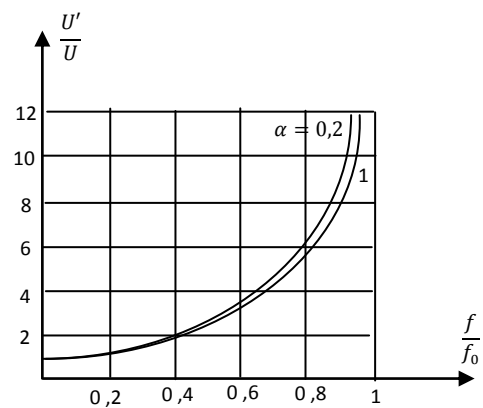
La figure (IV-21) montre les variations de  $U'/U$  en fonction de  $f/f_0$  pour diverses valeurs de  $\alpha$ .

**IV.5.2.b-Montage avec RCT résonnant (bidirectionnel)**

Pour le montage RCT résonnant figure (IV-22) en procédant aux mêmes substitutions que pour le montage précédent.



**Figure IV-22 :** Hacheur parallèle quasi-résonnant à RCT Résonnant en mode ZCS



**Figure IV-23 :** Les variations de  $U'/U$  en fonction de  $f/f_0$

$$U = u_{moy} = v_{c\ moy} = U'F(RCT)$$

$$\frac{U'}{U} = \frac{1}{F(RCT)}$$

Les caractéristique (figure IV-23) donnant  $U'/U$  en fonction de  $f/f_0$  sont pratiquement indépendantes de  $\alpha$ .

**IV.6- CONVERTISSEURS CONTINU-CONTINU QUASI-RESONNANTS  
EN MODE ZVS**

Ces montages sont les duaux des montages quasi-résonnants en courant. Leurs applications sont moins nombreuses à cause du surdimensionnement en tension et de l'impossibilité de conserver la commutation douce aux faibles charges ( $\alpha < 1$ ).

**IV.6.1- Hacheur série quasi-résonnant en mode ZVS:**

On appliquant directement :

- La tension d'entrée  $U$  et la ddp aux bornes de la cellule,
- La tension moyenne de sortie  $U'$  est égale à la tension d'entrée diminuée de la valeur moyenne de la tension aux bornes du condensateur.

$$U' = U - v_{c moy}$$

**IV.6.1.a-Montage à thyristor dual résonnant (unidirectionnel)**

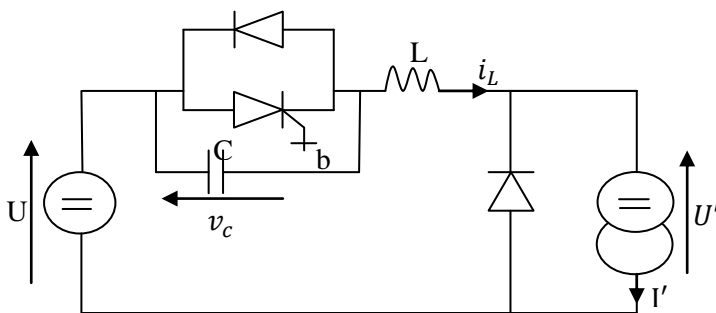
La figure (IV-24) donne le schéma du montage. Puisque la valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on a :

$$U' = U - v_{c moy}$$

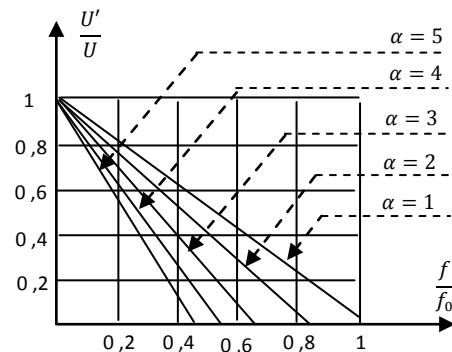
$$U' = U[1 - F(Th dual)]$$

Où :

$$F(Th dual) = \frac{v_{c moy}}{U} = \frac{1}{2\pi} \frac{f}{f_0} \left[ \pi + \frac{1}{2\alpha} + \text{Arc sin} \frac{1}{\alpha} + \alpha \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{1}{\alpha^2}} \right) \right]$$



**Figure IV-24 :** Hacheur quasi-résonnant à Thyristor dual résonnant en mode ZVS



**Figure IV-25** Les variations de  $U'/U$  en fonction de  $f/f_0$

La figure (IV-25) montre les variations les variations de  $U_{S MOY}/U$  en fonction de  $f/f_0$  pour diverses valeurs de  $\alpha$  supérieures à 1.

**IV.6.1.b-Montage à « RCT dual résonnant » :**

Le schéma du montage est indiqué à la figure (IV-26).  $U' = U[1 - F(RCT dual)]$

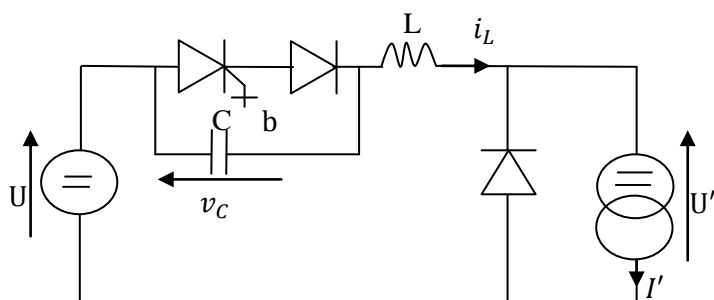


Figure IV -26 : Hacheur série quasi-résonnant en mode ZVS à RCT dual résonnant.

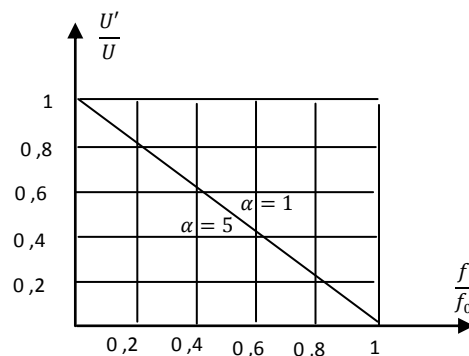


Figure IV-27 : Les variations de  $U_{S\text{ MOY}}/U$  en fonction de  $f/f_0$

La figure (IV-27) donne les variations de  $U'/U$  en fonction de  $f/f_0$  ; comme pour le montage à RCT résonnant, les caractéristique sont pratiquement indépendantes de  $\alpha$ .

#### IV.6.2- Hacheur parallèle quasi-résonnant en mode ZVS

Pour le hacheur parallèle :

- La ddp aux bornes de la cellule de commutation est la tension de sortie  $U'$  du hacheur,
- La tension moyenne  $u$  d'entrée a la valeur moyenne  $U$  égale à la tension moyenne aux bornes du condensateur. [1]

$$U = v_{c\text{ moy}} = U'F(\text{Th dual ou RCT dual}).$$

##### IV.6.2.a-Montage à thyristor dual résonnant

$$\frac{U'}{U} = \frac{1}{F(\text{Th dual})}$$

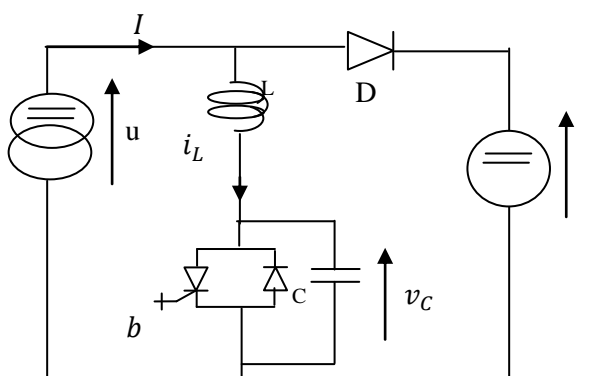


Figure IV-28 : Hacheur parallèle quasi-résonnant en mode ZVS à thyristor dual résonnant

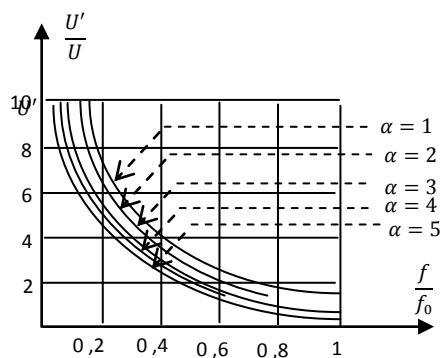


Figure IV-29 : Les variations de  $U_{S\text{ MOY}}/U$  en fonction de  $f/f_0$

IV.6.2.b-Montage à RCT dual résonnant

$$\frac{U'}{U} = \frac{1}{F(\text{RCT dual})}$$

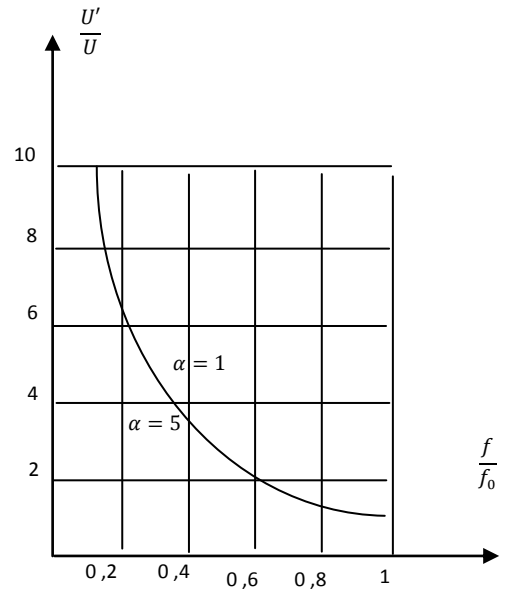
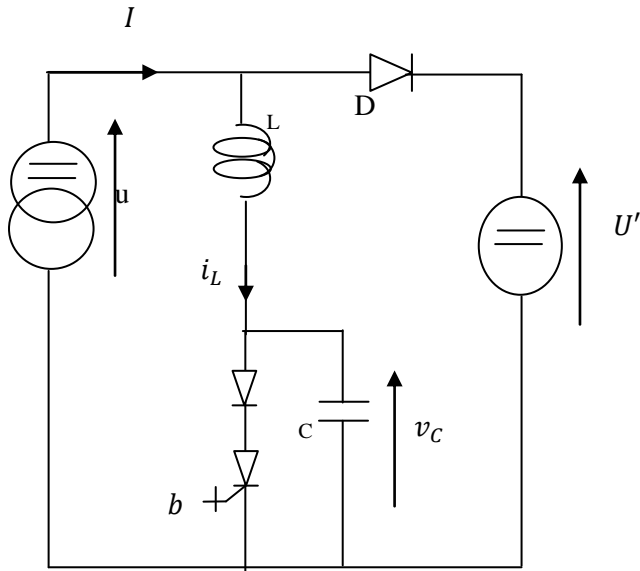


Figure IV-30 Hacheur parallèle quasi-résonnant en mode ZVS à RCT dual résonnant

Figure IV-31 : Les variations de  $U_{S Moy}/U$  en fonction de  $f/f_0$

IV.7 RESULTAT DE SIMULATION

IV.7.1 Hacheur série à RCT résonant

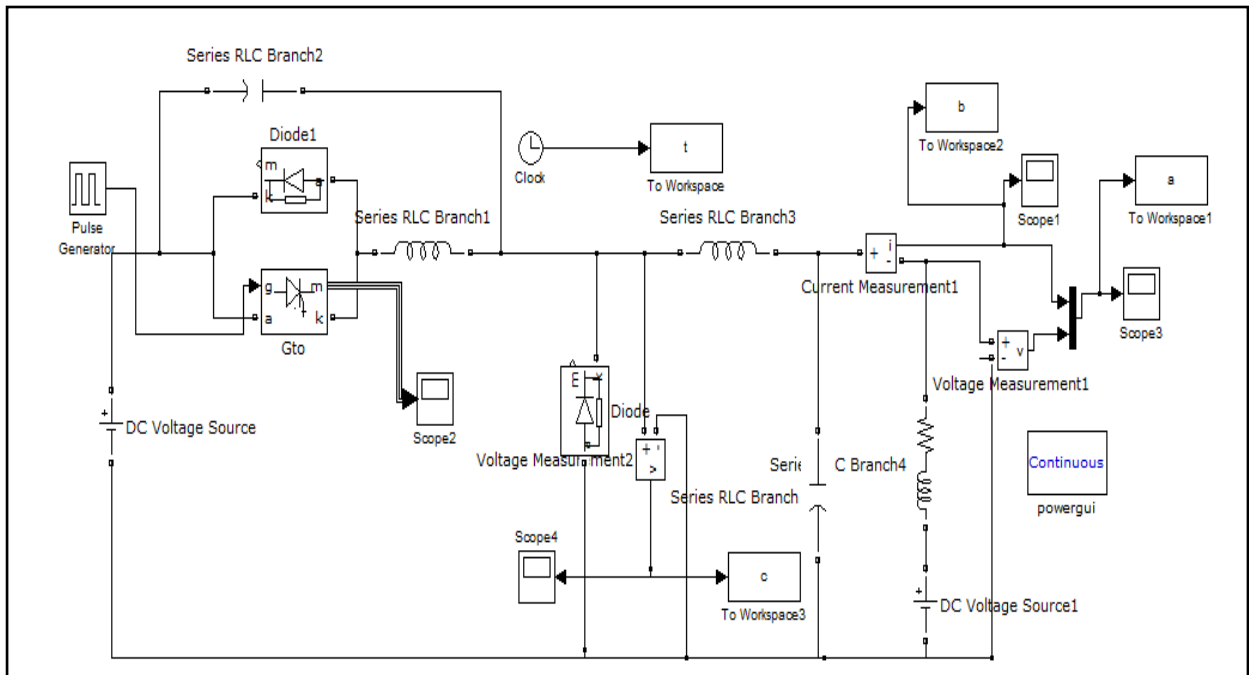
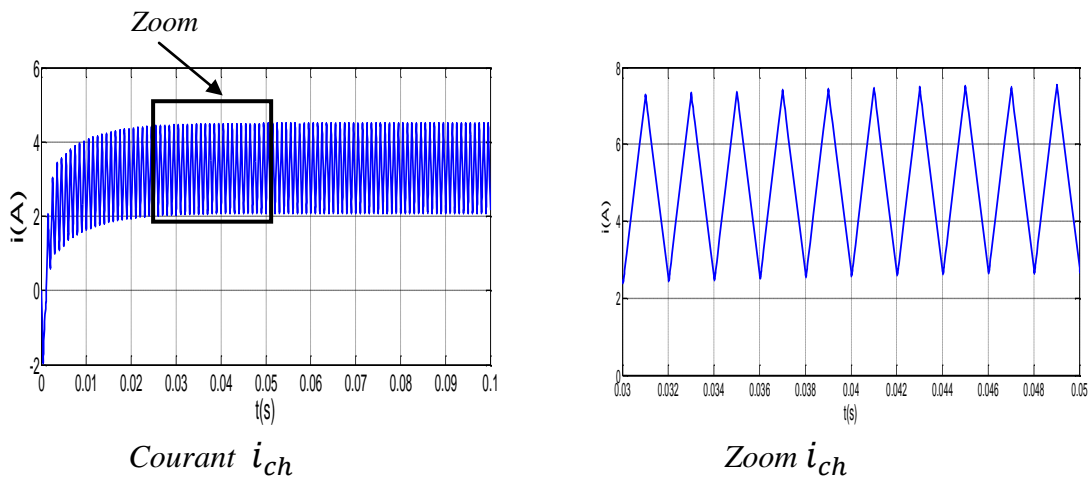
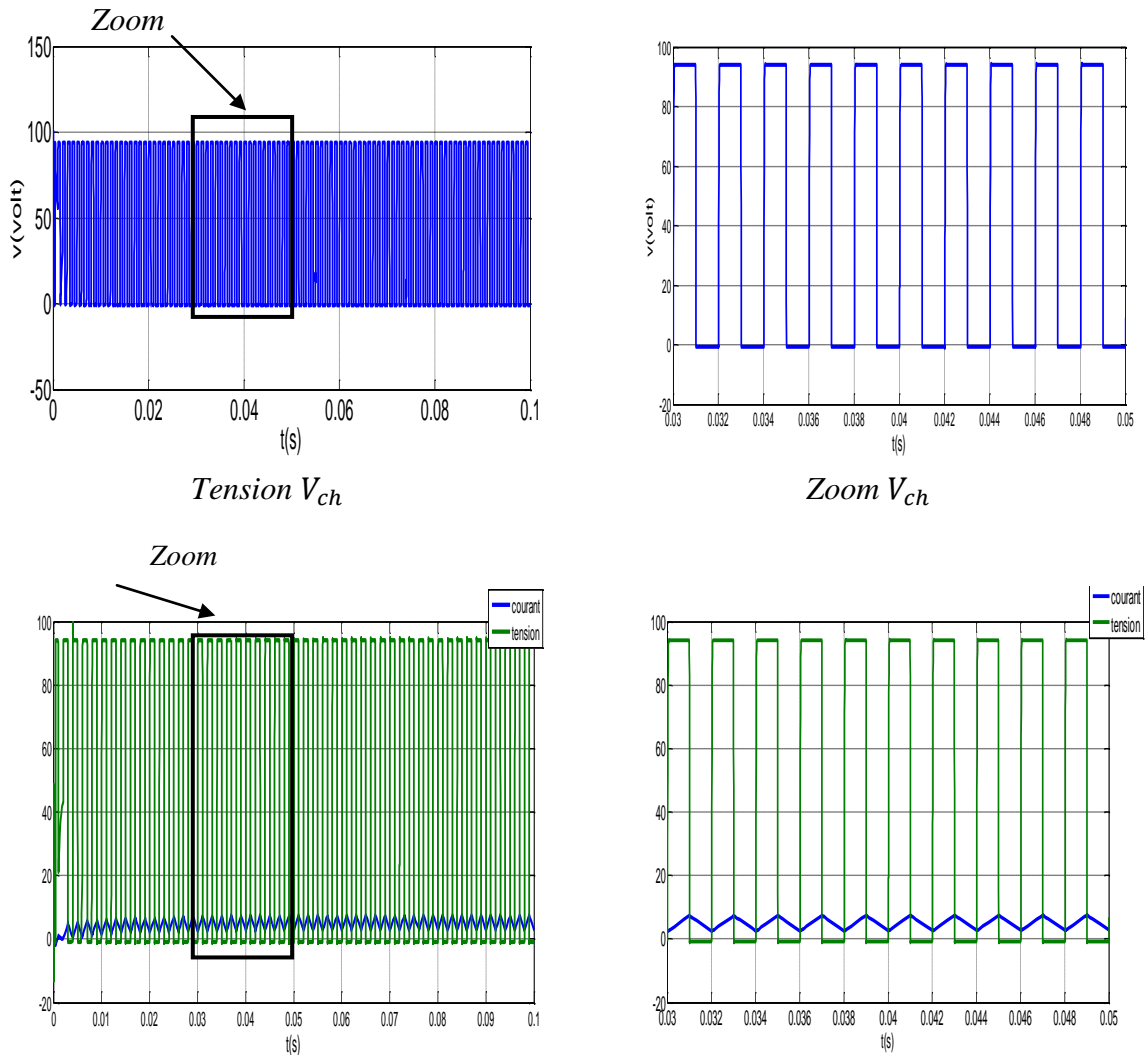


Figure IV-32: schéma de bloc d'un hacheur série quasi-résonnant en mode ZCS à RCT résonnant

a) conduction continue





**Figure IV-33:** Tension et courant délivrés par un hacheur série à RCT résonnant  
(conduction continue)

$$E = 100V, C_1 = 1e^{-8}F, C_2 = 0.1e^{-6}F, L_1 = 0.1e^{-2}H, L_2 = 1e^{-8}H, \\ R = 0.1\Omega, L = 0.0097H, E' = 45V, f = 1000Hz$$

b) Conduction discontinue

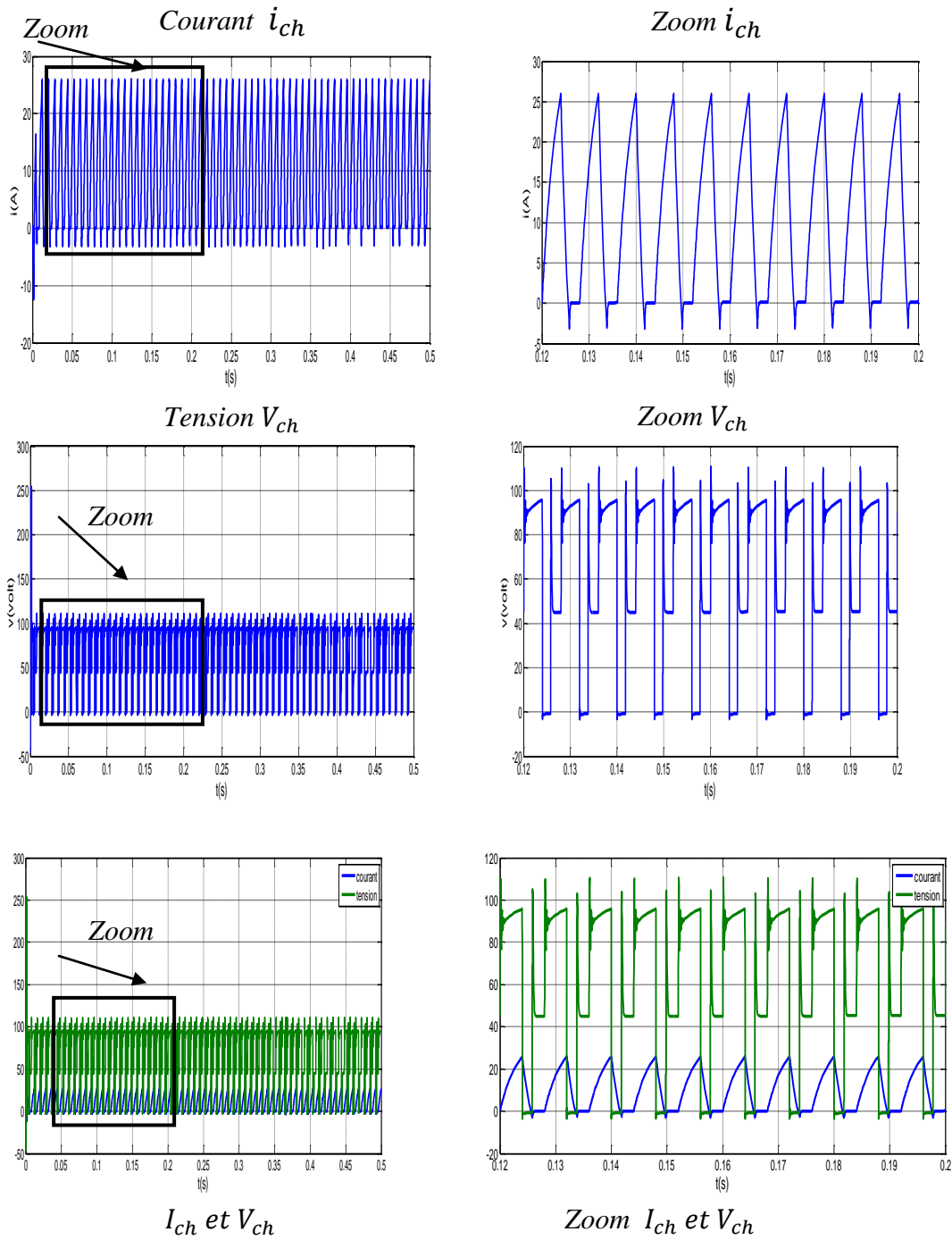


Figure IV-33: Tension et courant délivrés par un hacheur série à RCT résonnant (conduction discontinue)

$$E = 100V, C_1 = 1e^{-6}F, C_2 = 0.1e^{-5}F, L_1 = 0.1e^{-2}H, L_2 = 10e^{-8}H, \\ R = 1.5\Omega, L = 0.0037H, E' = 45V, f = 2000Hz$$

## **IV .8-CONCLUSION**

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents types des interrupteurs résonnants et leurs fonctionnements, ainsi la cellule élémentaire de ces interrupteurs. Nous avons vu aussi les structures des convertisseurs « quasi-résonnant » permette des commutations soit à courant nul (ZCS), soit à tension nul (ZVS).

Le principal intérêt des interrupteurs résonnants est de pouvoir fonctionner à des fréquences de commutation plus élevées que les interrupteurs classiques puisque les pertes de commutation sont notablement réduites.

Il convient de rappeler que les interrupteurs résonnant peuvent être utilisés non seulement dans les alimentations à découpage mais dans tous les convertisseurs, sans eux nécessiteraient des interrupteurs à fermeture et ouverture commandée (les onduleurs et les redresseurs à MLI).

The background features three large, overlapping blue circles of varying sizes, each with a gradient from dark blue to light blue. Two thin, light blue lines intersect at the top left, forming a V-shape that frames the central text.

# CHAPITRE V

## ETUDE DE SYSTEME EN BOUCLE FERMEE

## **ETUDE DE SYSTÈME EN BOUCLE FERMÉE**

### **V.1-INTRODUCTION**

Le moteur à courant continue est le moteur le plus utilisé pour la réalisation d'entraînements réglés, bien que sa construction soit plus complexe que celle d'un moteur asynchrone. Ceci provient du fait que l'on peut faire varier la vitesse d'un moteur à courant continue simplement au moyen d'une tension continue variable.

L'électronique de puissance met à disposition des convertisseurs de courant, qui sont des sources de tension variables par excellence. On peut faire varier très rapidement la tension continue tout en disposant d'une puissance de commande très faible. Ces propriétés sont très favorables pour la réalisation de circuit de réglage de haute qualité.

Les entraînements réglés utilisant des moteurs à courant continue ont atteint aujourd'hui un niveau de performances très élevé et on constate une normalisation quasi complète des circuits de puissance et de réglage, même pour des entraînements spéciaux.

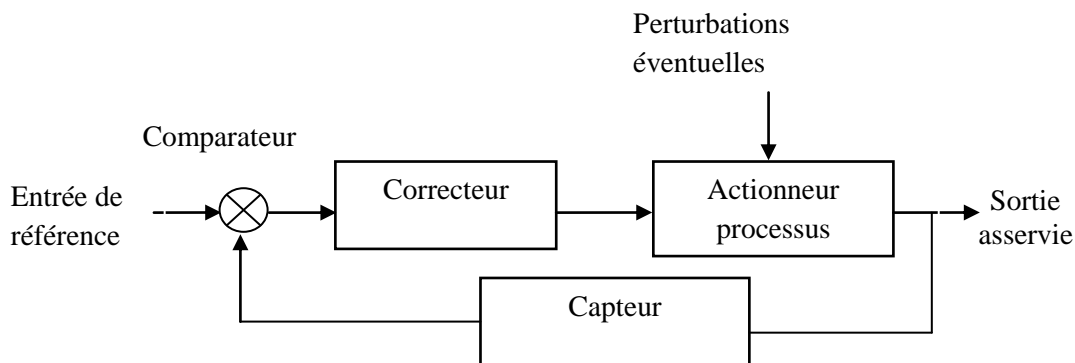
Ce chapitre aborde le cas du réglage de vitesse du moteur à courant continue alimenté par un convertisseur statique. L'induit du moteur à courant continue est alimenté par un convertisseur de courant unidirectionnel dans les applications simple.

Dans ce chapitre en développe une commande en cascade du MCC, deux grandeurs d'état régler, il s'agit de courant d'induit dans la boucle interne de la vitesse de rotation dans la boucle externe.

### **V.2- Caractéristique générale d'un système asservi**

L'étude et la conception d'un système asservi se basent sur les lois de la physique qui expriment l'évolution temporelle de ses grandeurs caractéristiques (sorties) sous l'influence d'autres grandeurs (entrées). Ces lois de la physique caractérisent généralement les dynamiques des systèmes puisqu'elles sont du type équations différentielles.

Un "système asservi" est un système bouclé c'est-à-dire possédant une rétroaction de la sortie La figure (V-1).



*Figure V-1 : Organisation fonctionnelle d'un système asservi*

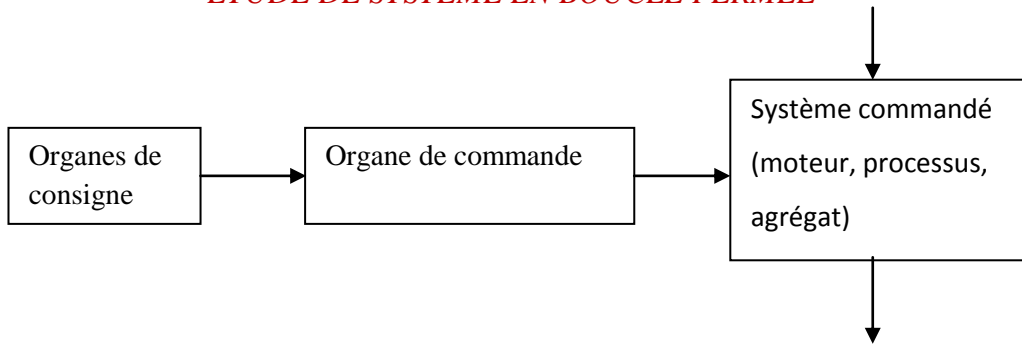
- ✓ **Le régulateur:** élabore un signal de commande à partir de l'écart entre l'entrée et la mesure, c'est l'organe " intelligent".
- ✓ **L'actionneur:** maîtrise la puissance à fournir au processus à partir du signal issu du régulateur, c'est le "muscle" du système.
- ✓ **Le capteur:** contrôle la grandeur asservie et en rend compte au régulateur, il doit en donner une image fidèle, sa sensibilité impose les limites de la précision de l'asservissement.

### **Systèmes**

#### **V.2.1-Système en boucle ouverte:**

Un système en boucle ouverte (ou réglage ou asservissement en boucle ouverte) est un système de réglage où la variable d'entrée (de commande) est indépendante de la grandeur de sortie la figure (V-2). Au contraire, la valeur de commande dépend de la grandeur commandée. Dans ce système, la mesure des valeurs des grandeurs réglées est comparée aux valeurs des consignes (de références) pour former l'action de commande en vue de corriger les différences (ou écarts) s'il y en a. Ces différences sont le résultat de l'action des perturbations externes et/ou internes agissant sur le système à commander.

Les systèmes de commande en boucle ouverte présentent l'inconvénient de compenser uniquement les perturbations mesurables. C'est pourquoi, ils ont des applications limitées.



*Figure V-2 : Schéma de principe d'un système de régulation en boucle ouverte*

### **V.2.2-Système en boucle fermée**

Le système en boucle fermée (ou réglage ou asservissement) comprend généralement les éléments suivants :

- ✓ L'organe de mesure (capteur plus transmetteur),
- ✓ Les organes de réglage, d'exécution, le régulateur (ou correcteur et amplificateur),
- ✓ L'objet à régler (système à régler ou à commander).

Les constituants de la boucle de régulation sont parcourus par un signal d'information dans le sens du capteur de mesure, organes de régulation et système commandé. Ce sens est irréversible. [12]

### **V.2.3-Performance d'un système asservi**

#### **➤ Stabilité**

Un système est stable si et à tout signal borné en entrée, correspond un signal borné en sortie. En automatique, on définira la stabilité par une des propositions suivantes : un système linéaire est stable

- Lorsque sa réponse à un échelon prend une valeur finie en régime permanent.
- Lorsque sa réponse à une impulsion tend vers 0.
- Lorsque sa réponse à une sinusoïdal est une sinusoïde d'amplitude finie.

#### **➤ Précision**

Un système asservis (donc en boucle fermée) sera d'autant plus précis que sa sortie  $s(t)$  est proche de la consigne (valeur désirée)  $s_d(t)$ .

On peut quantifier l'erreur entre la consigne et la sortie :

$$\varepsilon(t) = s_d(t) - s(t) \quad (\text{V.1})$$

Cette erreur sera significative de la précision de l'asservissement :

- pendant le régime transitoire. On parlera de précision dynamique ou bien
- une fois le régime permanent atteint. On parlera de précision statique.

➤ **Rapidité**

Elle traduit pratiquement la durée transitoire. Plus précisément, elle s'exprime par le temps de réponse  $T_r$  ou temps d'établissement, qui est le temps mis par la mesure pour atteindre sa valeur définitive à  $\pm 5\%$  de sa variation tout en se maintenant dans cette zone des  $\pm 5\%$ . [18]

Rapidité = temps de réponse  $T_r$

### **V.3-La régulation**

La régulation est la technique de l'ingénieur offrant les méthodes et les outils nécessaires à la prise de contrôle d'une ou plusieurs grandeurs physique d'un système en vue d'en imposer le comportement. Les grandeurs physiques, ou signaux (vitesse, courant, etc.), doivent être mesurées afin de vérifier leur état puis de déterminer à l'aide d'un traitement approprié l'action à entreprendre sur le système ou processus. [14]

#### **V.3.1- Régulateur**

Le régulateur est l'élément de l'équipement de régulation qui assure plusieurs fonctions de cet équipement, l'une d'entre elles devant nécessairement être la fonction de comparaison d'un signal de réaction et d'un signal de référence, les autres fonctions peuvent être des fonctions de correction, etc. [13]

#### **V.3.2-Les régulateurs classiques analogiques (P-I-PI)**

On peut classer les régulateurs analogiques classiques

##### **V.3.2.a-Régulation à action proportionnelle (P)**

L'action proportionnelle P corrige de manière instantanée, donc rapide, tout écart de la grandeur à régler. Elle permet de vaincre des grandes inerties du système. Afin de diminuer l'écart de réglage et rendre le système plus rapide. On augmente le gain (on diminue la bande proportionnelle) mais, on est limité par la stabilité du système. [15]

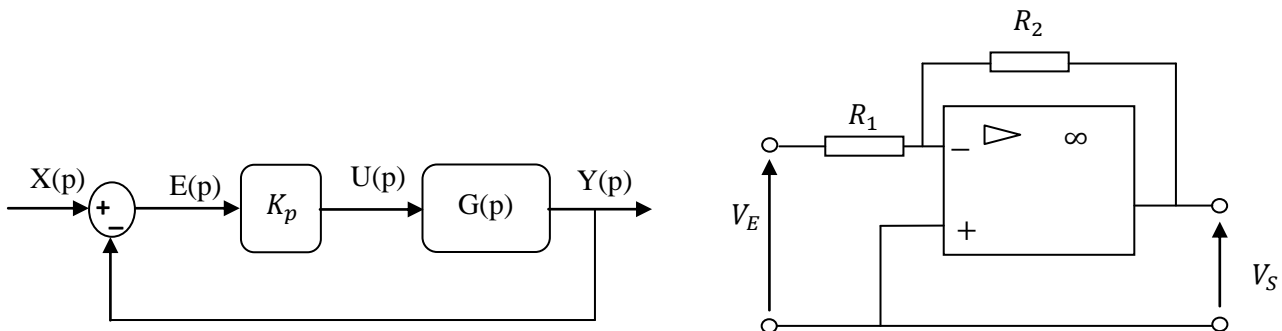
Le rôle de l'action proportionnelle est d'accélérer la réponse de la mesure, ce qui a pour conséquence de réduire l'écart entre la mesure et la consigne. Et permet d'améliorer les performances dynamiques (rapidité) et statiques (erreur statique).

Loi de commande du régulateur P :

$$U(t) = K_p \cdot E(t) \quad (V.2)$$

Fonction de transfert du régulateur P :

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P \quad (V.3)$$



*Figure V-3: schéma de bloc et électronique d'un régulateur P*

L'action proportionnelle assure une transmission instantanée du signal d'erreur; dans ce sens, son action est relativement dynamique : sa commande ne dépend pas du passé, ni d'une tendance, mais simplement de ce qui passe à l'instant présent. [14]

### V.3.2.b-Régulation à action intégrale (I)

L'action intégrale complète l'action proportionnelle, Le rôle de l'action intégrale est d'annuler l'écart entre la mesure et la consigne. Le signal de sortie du régulateur en intégrateur seul est proportionnel à l'intégrale de l'écart mesure-consigne.

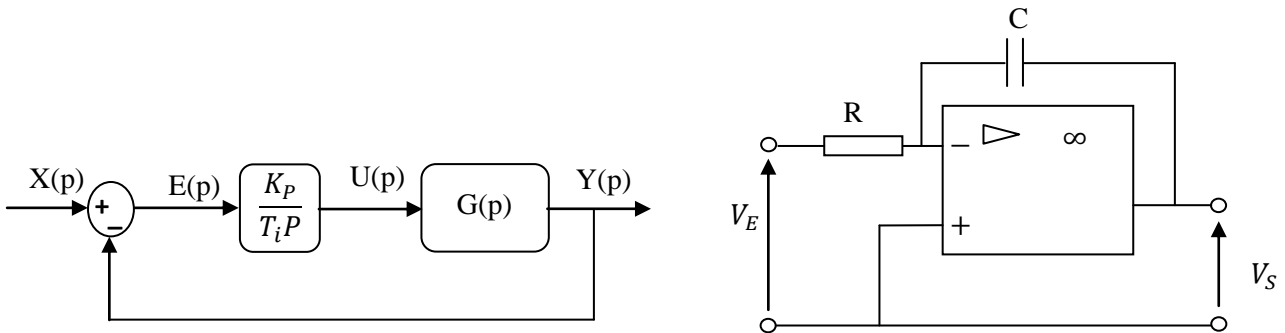
La loi de commande est donc :

$$U_i(t) = \frac{1}{T_i} \int_{-\infty}^t e(t) dt \quad (V.4)$$

Fonction de transfert du régulateur I:

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{1}{s T_i} \quad (V.5)$$

Où :  $T_i$  est appelée la constante du temps d'intégration.



*Figure V-4 : schéma de bloc et électrique d'un régulateur I*

L'action d'intégrale augmente le gain et diminue la phase aux faibles fréquences. Si  $T_i$  augmente, la contribution de l'intégration diminue. Le système rejette plus lentement les perturbations. Inversement si  $T_i$  diminue, le système réagit plus rapidement sans laisser au système le temps de démarrer progressivement, le dépassement sur la sortie s'amplifie mais revient à zéro en régime permanent. [15]

### V.3.2.c-Régulation à action (PI)

La commande proposée est formée des deux contributions  $U_p$  et  $U_i$ , contributions proportionnelle (P) et intégrale (I). Le régulateur est donc à actions proportionnelle et intégrale : c'est un régulateur PI. Il permet d'améliorer le régime permanent et le régime transitoire.

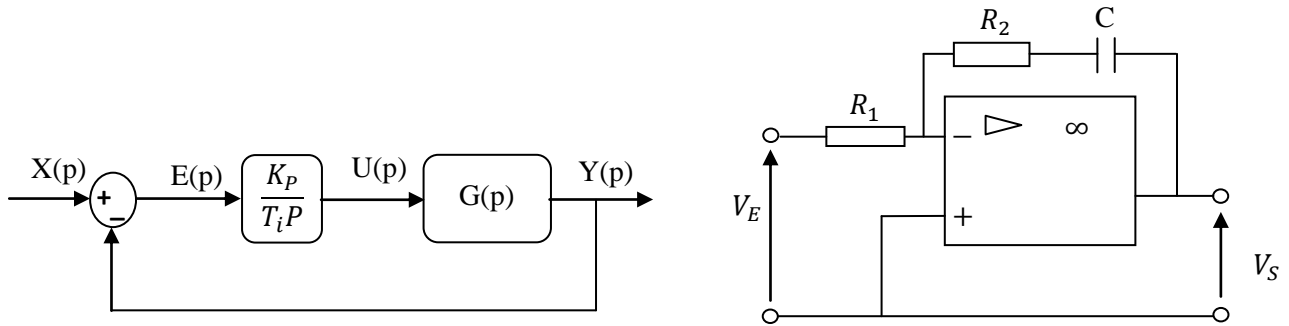
Le rôle principal de l'action intégrale est d'éliminer l'erreur statique. Toutefois l'augmentation de l'action intégrale produit une instabilité. Dans l'industrie, on utilisera l'action I chaque fois que nous avons besoins, pour des raisons technologiques, d'avoir une précision parfait.

Loi de commande de régulateur PI :

$$U(t) = K_p(\delta(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t E(t)dt) \quad (V.6)$$

Fonction de transfert de régulateur PI :

$$G_R(s) = K_p + \frac{1}{sT_i} \quad (V.7)$$



*Figure V-5: schéma de bloc et électrique d'un régulateur PI*

Où  $K_p$  est la constante proportionnelle et  $T_i$  la constante de l'action intégrale, les constantes précédentes sont ajustables. La constante  $T_i$  ajuste l'action intégrale, tandis qu'un changement de  $K_p$  affecte l'action proportionnelle et l'action intégrale.

### V.3.3-Rôle du régulateur

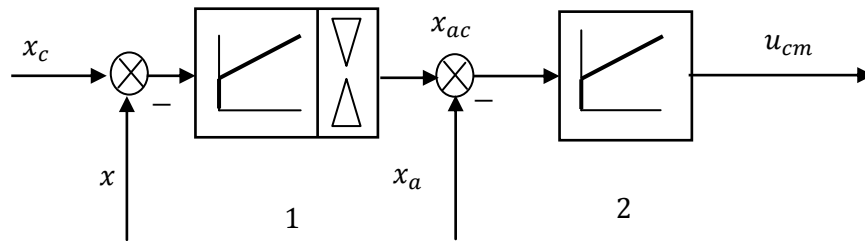
Le tout premier rôle d'un régulateur est d'assurer la stabilité du procédé contrôlé en chaîne fermée car cela concerne directement la sécurité de l'installation. Les autres rôles de régulateur, certes nécessaires, qui sont de garantir les précisions statique et dynamique et d'obtenir le temps de réponse désirée, ne peuvent être valides si le procédé régulé est instable. Un régulateur contrôlant un procédé intégrateur, donc naturellement instable en chaîne ouverte, doit rendre stable le procédé régulé. Bien entendu, un procédé, naturellement stable en chaîne ouverte, doit le rester une fois corrigé par le régulateur.

Il est donc primordial qu'un régulateur garantisse la stabilité du procédé qu'il contrôle et cela quels que soient les changements structurels intrinsèques du procédé modifiant sa fonction de transfert ou son coefficient. [11] :

### V.3.4-La régulation en cascade

Une régulation en cascade est composée de deux boucles imbriquées. Le système peut être décomposé en deux sous systèmes liés par une grandeur intermédiaire mesurable. Une première boucle, la boucle esclave, a pour grandeur réglée cette grandeur intermédiaire. La deuxième boucle, la boucle maître, a pour grandeur réglée la grandeur réglée de la régulation cascade et commande la consigne de la régulation esclave. [16]

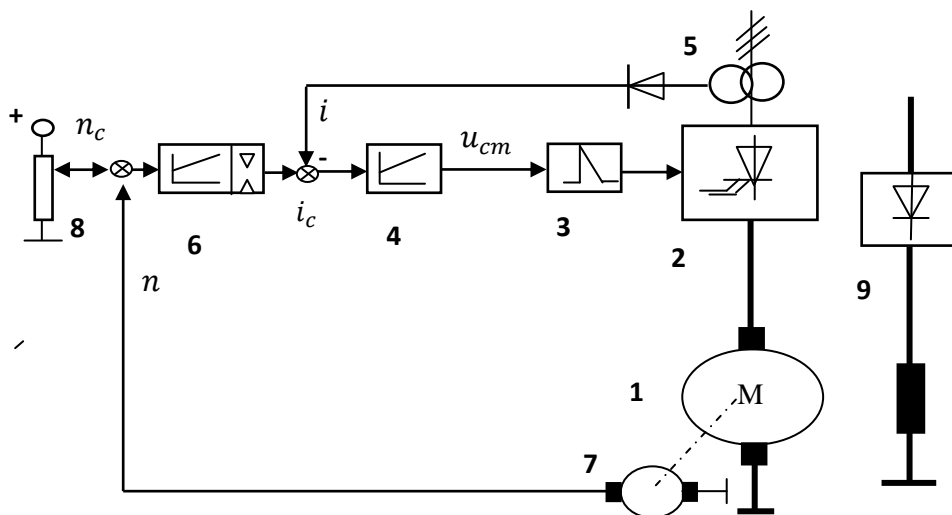
Dans le domaine de l'électronique industrielle, l'application des circuits de réglage en cascade (figure V-6) est très répandue. On peut même mettre en cascade plus de deux régulateurs.



**Figure V-6: réglage en cascade**

Dans la pratique, les réglages en cascade sont faciles à mettre en service. On boucle fermée D'abord le circuit de réglage le plus proche de système à régler. On ajuste ce régulateur (le régulateur 2), de sorte que ce circuit de réglage soit stable et bien amorti. Ensuite, on boucle le circuit de réglage superposé et ainsi de suite. On procède aussi de la même manière pour le dimensionnement des régulateurs. [12]

La (figure V-7) donne la structure globale de l'application de la régulation en cascade d'un entraînement à courant continu, il s'agit de l'association d'un moteur à courant continu à un convertisseur statique.



**Figure V-7: Structure globale d'une régulation en cascade d'un entraînement à courant continu**

Le circuit de réglage du courant d'induit est composé du dispositif de commande de gâchettes 3, du régulateur 4 et de la mesure du courant d'induit 5. Le circuit de réglage de vitesse contient le régulateur 6, la mesure de vitesse à l'aide d'une dynamo tachymétrie 7, ainsi que l'organe de consigne 8 (potentiomètre, par exemple). [16]

**V.3.4.a-Fonction de transfert du moteur :**

✓ *Equation électrique :*

$$U_d = E + R_a I_d + L_a \frac{dI_d}{dt} \quad (\text{V.8})$$

✓ *Equation mécanique :*

$$C_m - C_r = j \frac{dw}{dt} \quad (\text{V.9})$$

✓ *Equation électromécanique :*

$$E = K' \Phi \omega_n = K \omega_n \quad (\text{V.10})$$

Avec :  $K = K' \Phi$

En utilisant la transformation de Laplace, on aura:

$$U_d(P) = E(P) + (R_a + L_a P)I(P) \quad (\text{V.11})$$

$$E(P) = K \Phi \omega_n(p) \quad (\text{V.12})$$

$$C_m(P) - C_r(P) = J P \omega_n(P) \quad (\text{V.13})$$

$$C_m(p) = K_m I(p) \quad C_m(P) = K I_d(P) \quad (\text{V.14})$$

D'après l'équation (IV.14) on tire le courant

$$I_d(P) = \frac{U_d(P) - E(P)}{R_a + L_a P} \quad (\text{V.15})$$

$$I_d(P) = [U_d(P) - E(P)] \frac{1/R}{1 + T_e P} \quad (\text{V.16})$$

La fonction de transfert de la partie électrique :

$$G_{1M}(P) = \frac{I_d(P)}{U_d(P) - E(P)} = \frac{1/R_a}{1 + \frac{L_a}{R_a} P}$$

$$G_{1M}(P) = \frac{1/R_a}{1 + T_e P} \quad (V.17)$$

Avec:

$$T_e = \frac{L_a}{R_a} : \text{Constante de temps électromagnétique du moteur}$$

$$E(P) = K\Phi w_n(p) \quad (V.18)$$

$$C_m(P) - C_r(P) = JPw_n(P) \quad (V.19)$$

$$C_m(p) = K_m I(p) \quad C_m(P) = KI_d(P) \quad (V.20)$$

D'après l'équation (IV.16) on tire la vitesse:

$$w_1(P) = [C_m(P) - C_r(P)] \frac{1}{JP} \quad (V.21)$$

Avec :  $T_m = \frac{R_a J}{K^2}$  constante de temps électromécanique.

La fonction de transfert de la partie mécanique est écrite comme suite :

$$G_{2M}(P) = \frac{W_{1M}(P)}{C_m(P) - C_r(P)} = \frac{1}{JP} \quad (V.22)$$

A partir de ces équations on représente le schéma fonctionnel du moteur à courant continu par la figure (V-8).

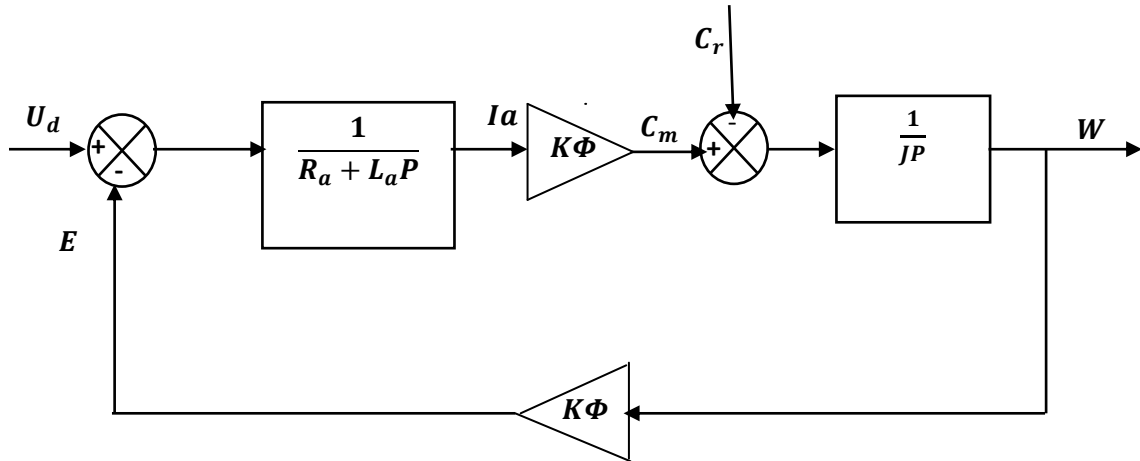


Figure V-8 : schéma bloc du système (Moteur à courant continu)

### V.3.4.b-Calcul des paramètres statiques du moteur

✓ Coefficients de transfert du moteur :

En régime permanent l'équation (V-8), devienne :

$$U_d = E + R_a \cdot I_d \quad (V.23)$$

On remplace l'équation (V-10) dans l'équation (V-15), alors :

$$U_d = K w_n + R_a I_d \Rightarrow K = \frac{U_d - R_a I_d}{w_n}$$

Où : La vitesse de rotation  $w_n$  :

$$w_n = \frac{2\pi n}{60} = 209.33 \text{ rad/s}$$

$$K = \frac{220 - 17.6}{209.33} = 0.9668 \text{ Vs/rad}$$

✓ La constante de temps électromécanique est donc :

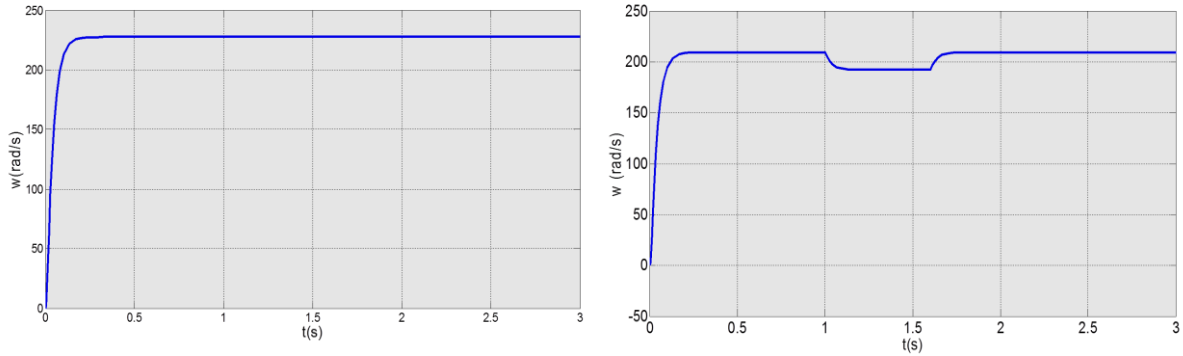
$$T_m = \frac{R_a j}{K^2} = \frac{8 * 0.005}{(0.9668)^2} = 0.042 \text{ s}$$

$$D'où : G_1(p) = \frac{1/R_a}{1+T_e P}$$

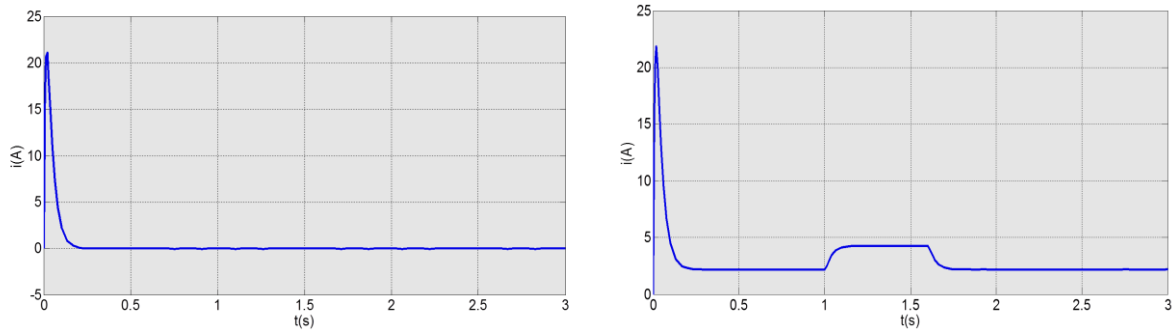
✓ La constante de temps électrique veut donc :  $T_e = \frac{59.7 * 10^{-3}}{8} = 0.007 \text{ s}$ .

**V.3.4.c-RESULTAT DE SIMULATION**

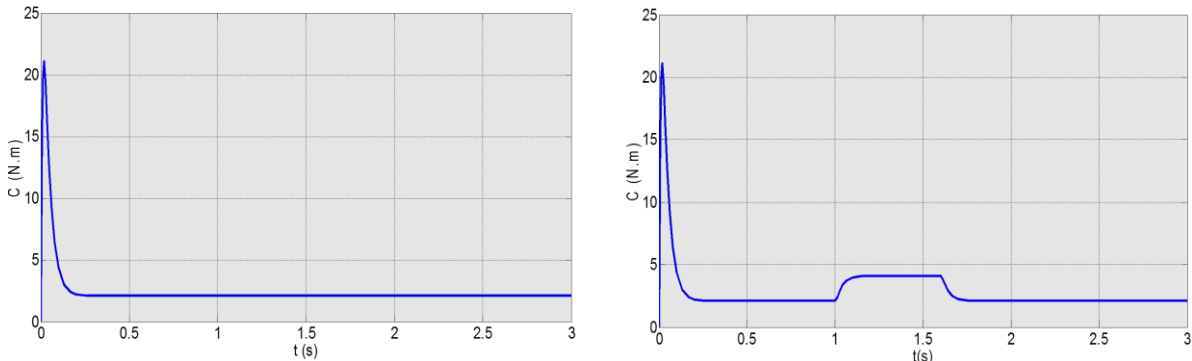
*La vitesse*



*Le courant*



*Le couple*



**Figure V-9 :** Démarrage à vide du MCC pour ( $U_d = 220V, C_r = 0$ )

**Figure V-10:** Démarrage en charge avec perturbation du MCC pour ( $U_d = 220V, C_r = 2,127N.m$ )

**Interprétation**

**Le Couple nul ( $C_r = 0 N.m$ ) :**

Les courbes de la figure (V-9) montrent qu'il y a un fort appel du courant pendant le démarrage atteint jusqu'à valeur maximale  $I_{max}$  puis il revient à zéro (courant à vide).

La forme du couple ( $C_m$ ) qui dépend du courant pendant le démarrage, sa valeur atteinte jusqu'à valeur maximal  $C_{max}$  puis elle revient à zéro (couple à vide).

La vitesse angulaire augmente d'une façon presque linéaire puis se stabilise à  $\omega_0$  qui correspond à la vitesse de marche à vide idéal.

**Couple non nul ( $C_r = 2.127 \text{ N.m}$ ) :**

La figure (V-10) met en évidence les conséquences d'un comportement d'un moteur entraînant une charge avec perturbation.

On peut remarquer sur la caractéristique que le courant de démarrage à peu près est le même que celui à vide, par contre la vitesse change de valeur en régime permanent.

Pour les courbes (couple - courant) on remarque qu'il y a une augmentation très longue puis ils retournent au régime permanent.

On remarque que la vitesse du moteur fonctionnant en charge et avec perturbation diminue, dans un temps très long, puis elle retourne au régime permanent, ce qui nécessite un réglage de la vitesse et du courant, en faisant appel à des circuits de réglage appropriés.

#### **V.4-LE CONVERTISSEUR UTILISE :**

En électronique de puissance, un convertisseur fonctionne toujours en association avec d'autres systèmes électriques et mécanique appelés sous-système, en milieu industriel.

Pour la commande des moteurs on utilise surtout des hacheurs série ou des hacheurs à quatre quadrants. On admet ici que la source de tension et la source de courant sont à courant continu de valeur constante.

Pour un sens donné de la rotation, il doit être néanmoins au minimum à 2 quadrants. En effet, l'action imposée par le hacheur (par variation du rapport cyclique) à la machine à courant continu lors d'un ralentissement (quadrant 2 dans le cas d'une vitesse positive) doit être équivalente à celle imposée lors d'une accélération (quadrant 1 dans le cas d'une vitesse positive), ce qui ne serait pas le cas avec un hacheur série, où le ralentissement du moteur n'est provoqué que par l'action du couple résistant.

Pour obtenir un asservissement dans les deux sens de rotation, il est donc nécessaire d'utiliser un hacheur à 4 quadrants. [7]

**V.4.1-La Fonction de transfert de convertisseur**

La fonction de transfert du hacheur est :

$$\frac{K_{con}}{1 + T_{con}P}$$

$K_{con}$  : Coefficient du convertisseur statique. Il est déterminé d'après la caractéristique de réglage par le rapport :  $\frac{U_{con}}{U_{cm}}$

Avec  $U_{cm}$  : la tension de commande égale à 10 v.

**Calcul de  $K_{con}$  :**

$T_{con}$  : Temps de retard à l'amorçage.

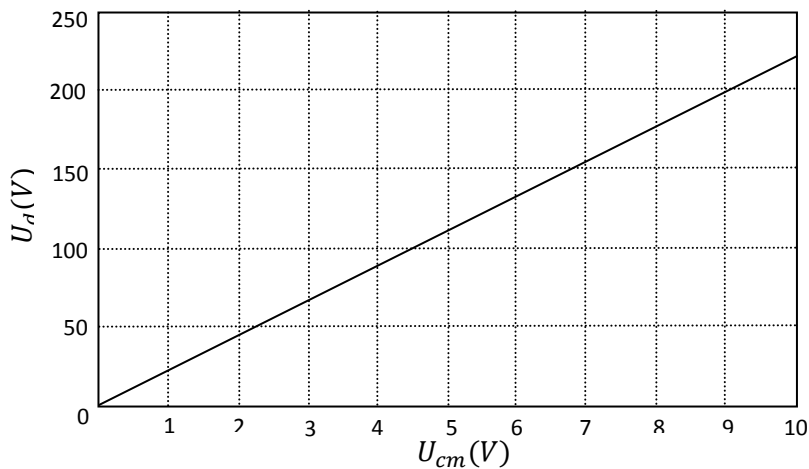
Le rapport cyclique  $\alpha$  du hacheur est le rapport de la durée de conduction à la période de hachage.  $\alpha = \frac{T_{off}}{T}$ ,  $U_{moy} = \alpha U_a$  ;  $\alpha \in [0,1] \Rightarrow U_{moy} \leq U_a$

$U_d$	220	198	176	154	132	110	88	66	44	22	00
$U_{com}$	10	09	08	07	06	05	04	03	02	01	00
$\alpha$	01	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	00

$$\Delta U_{cm} = U_2 - U_1 = 132 - 88 = 44$$

$$\Delta U_{con} = U_{con2} - U_{con1} = 6 - 4 = 2$$

Donc:  $K_{con} = \frac{\Delta U_{cm}}{\Delta U_{con}} = \frac{44}{2} = 22$



**Figure V-11 : Détermination du coefficient du convertisseur statique "  $K_{con}$  "**

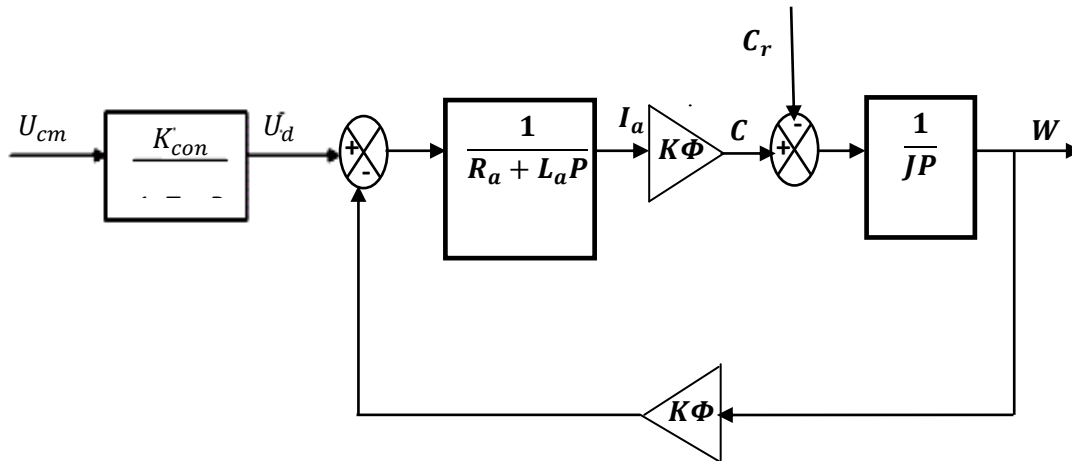
Avec :

$$T_{con} = \frac{1}{2}T = \frac{1}{2f}$$

A.N :  $T_{con} = \frac{1}{2 \cdot 1000} = 0.0005 \text{ s}$

Donc la fonction de transfert du hacheur est :  $\frac{22}{1+0.0005P}$

**V.4.2-Schéma bloc de l'ensemble Convertisseur-Moteur à courant continu**



*Figure V-12 : Schéma fonctionnel de l'association (Hacheur-Moteur)*

**V.5-ETUDE DE LA BOUCLE DE COURANT :**

Les commande de machine exigent des mesures donc des capteurs sauf dans certains cas particuliers ou l'on accepte des performances limitées et ou l'on économise des composants. La variation brutale de la valeur de consigne provoque une augmentation de la tension d'induit qui conduit à une surintensité dans d'induit qui ne sont pas admissibles. Aussi, pour contrôler le courant d'induit, on introduit dans la boucle de courant :

Un capteur de courant qui délivrera une tension proportionnelle au courant d'induit du moteur, et un régulateur de courant pour le contrôle et la correction.

**V.5.1-Capteur de courant d'induit**

La mesure de courant est effectuée à l'aide d'un transformateur de courant continu basé sur le principe des amplificateurs. Il est constitué des éléments suivants :

- Transformateur de courant.
- Pont à diodes pour avoir une tension redressée fixe.
- Une résistance fixe et une autre variable le réglage.

- Potentiomètre pour ajuster la tension.

Pour des puissances ou des tensions de fonctionnement plus élevées, les capteurs de courant sont isolés galvaniquement. On utilise l'effet magnétique agissant sur un composant et si un champ d'induction  $B$  est appliqué perpendiculairement au courant, une tension électrique  $V$  proportionnelle à  $B$  à  $i$  apparaît sur les faces latérales du composant, perpendiculairement) la fois au champ et à la direction du courant. L'avantage des capteurs de courant à effet hall :

Possibilité de mesure, avec isolement galvanique des courants continus, alternatifs de forme d'onde complexe, jusqu'à des fréquences assez élevées (de l'ordre de 100KHz).

Très bonne précision selon le choix de la résistance.

✓ **Calcul du facteur de transfert :**

Il est déterminé d'après la formule suivante :  $K_{CC} = \frac{U_{cm\ max}}{I_{max}}$

$K_{CC}$  : Gain de capteur du courant.

$U_{cm\ max}$  : Tension d'alimentation de commande.

$I_{Max}$  : Courant admissible d'induit.

$$K_{CC} = \frac{10}{2.5 * 2.2} = 1.818$$

✓ **Constante de temps  $T_{CC}$  :**

Cette constante est égale à celle du temps du filtre placé à la sortie du transformateur de compensation et sa valeur égale à  $T_{CC} = 0.005$

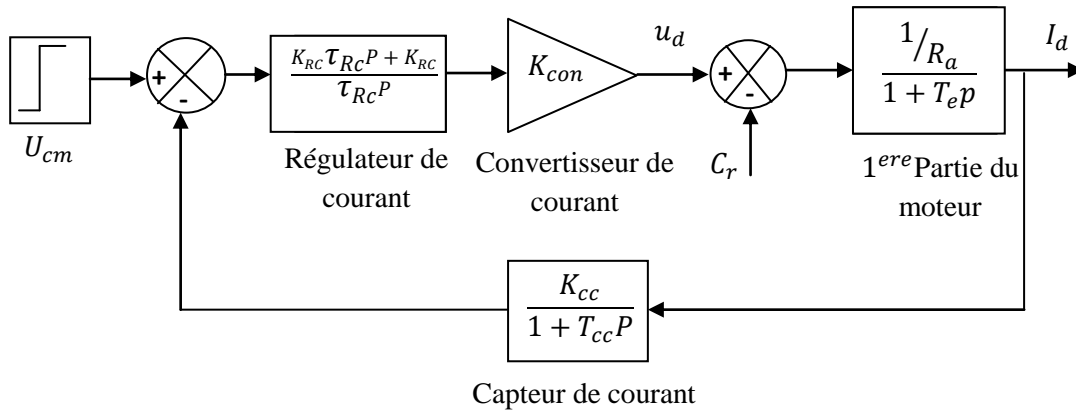
✓ **Fonction de transfert du capteur de courant :**

La fonction de transfert du capteur de courant est :

$$G_{CC}(p) = \frac{K_{CC}}{1 + T_{CC}P} = \frac{1.818}{1 + 0.005P}$$

**V.5.2-Synthèse de la boucle de courant :**

Selon la méthode de l'optimum symétrique (méthode de kessler), on peut schématiser la boucle de courant comme suit :



*Figure V-13: schéma bloc de régulation de courant*

**V.5.3-Détermination des paramètres du régulateur de courant :**

Avec la méthode de kessler, la fonction de transfert standard en boucle ouverte du système linéaire second ordre est de la forme suivante :

$$G_3(P) = \frac{1}{\tau_a P (1 + \tau_b P)}$$

Et que l'on règle avec un régulateur proportionnel intégral, de fonction de transfert général :

$$G_{Rc}(P) = k \frac{1 + \tau P}{\tau P}$$

Pour déterminer cet optimum, kessler introduit un coefficient d'avance de phase (a), tel que :

$$a = \tau / \tau_b \quad ; \quad k = \frac{\tau_a}{\tau_b \sqrt{a}}$$

*a* : Coefficient d'avance de phase.

$\tau, \tau_a, \tau_b$  : Les constantes de temps de la méthode de l'optimum symétrique.

*k* : Coefficient d'amplification de régulateur de courant.

✓ La fonction de transfert en boucle ouverte de courant est :

$$G_4(P) = \frac{k K_{con} K_{cc} (1/R_a)}{\tau P} \frac{1 + \tau P}{(1 + T_{cc} P)(1 + T_e P)}$$

Après l'approximation, on approche  $G_4(P)$  par la forme :

$$G_5(P) = \frac{kK_{cc}K_{con}}{R_a\tau} \frac{1 + \tau P}{[1 + T_{cc}P]T_e P^2}$$

L'approximation est conforme au modèle standard et on peut appliquer les résultats de la méthode l'optimum symétrique .on choisit d'avance de phase ( $a_i$ ) et obtient :

$$K_{RC} = \frac{1}{\sqrt{a_i}} \frac{RT_e}{K_{con}K_{cc}} \frac{1}{T_{con} + T_{cc}}$$

$$\tau_{RC} = a_i(T_{con} + T_{cc})$$

$$w_{coi} = \frac{1}{a_i(T_{con} + T_{cc})}$$

$$K_{RC} = \frac{1}{\sqrt{4}} \frac{8 * 0.007}{22 * 1.818} \frac{1}{0.0005 + 0.005} = 0.127$$

$$\tau_{RC} = 4(0.0005 + 0.005) = 0.022$$

$$w_{coi} = \frac{1}{\sqrt{4}(0.005)} = 100$$

Où :  $a_i$  le coefficient d'avance de phase de courant.

$w_{coi}$  : La pulsation de coupure.

La boucle fermée :

$$H_i(P) = \frac{G_4(P)}{1 + K_{cc}G_4(P)}$$

Alors :

$$H_i(P) = \frac{1}{K_{cc}} \frac{1}{1 + (\frac{P}{w_{coi}})}$$

#### **V.6- ETUDE DE LA BOUCLE DE VITESSE :**

Les exigences de l'évolution du besoin industriel des variateurs de vitesse ne cesse de devenir de plus en plus contraignantes.

Ces contraintes requièrent, généralement une habilité à suivre les changements du point de fonctionnement et une aptitude à régler les perturbations de charge et les variations paramétriques.

Le régulateur conventionnel proportionnel intégral (PI) utilisés pour ces variations sont conçus sur la base d'une linéarisation autour d'un point de fonctionnement [15].

**V.6.1-Capteur de vitesse**

On utilise deux familles de capteurs

- ✓ Le plus représentatif des capteurs analogique est la génératrice tachimétrique, petite machines à courant continue délivrant une tension de sortie proportionnelle à la vitesse ; on notera  $K_{cv}$  le gain de ce capteur.
- ✓ Les capteurs incrémentaux sont en fait des capteurs de position ; on déduit la vitesse par comptage des impulsions pendant un temps donné ou par mesure du temps séparant deux impulsions. [15]
- ✓ *Facteur de transfert du capteur de vitesse :*

On obtient ce facteur d'après la condition suivante :

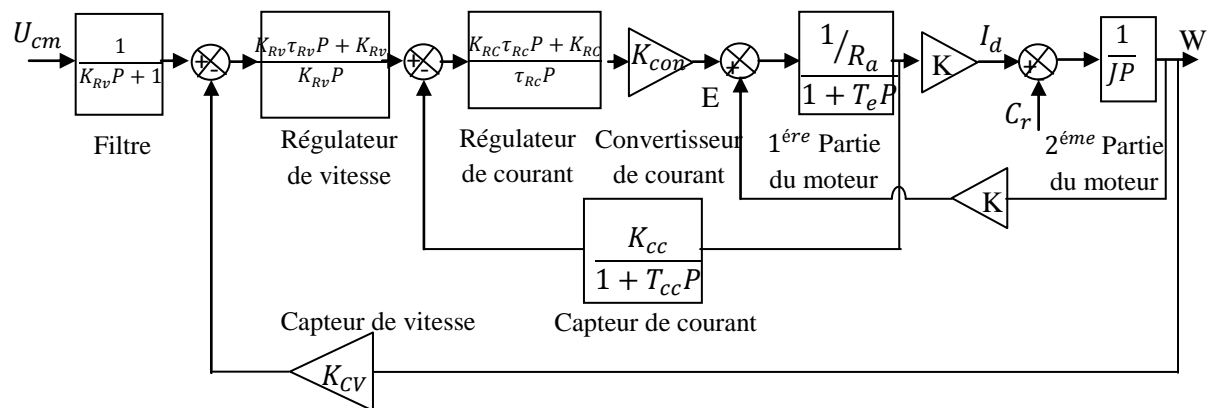
- La tension de sortie du capteur de vitesse doit être égale à 10V quand la vitesse est maximale et on aura :

$$K_{cv} = \frac{U_{cm \max}}{w_{\max}} = \frac{10}{209.33} = 0.0477$$

- ✓ *La fonction de transfert du capteur de vitesse est :*

$$G_{cv}(P) = K_{cv}$$

**V.6.2-Synthèse de la boucle de vitesse: Le schéma bloc final du moteur**



*Figure V-14: schéma de bloc final de l'association convertisseur - MCC*

**V.6.3-Détermination des paramètres de régulateur de vitesse :**

Pour pouvoir déterminer le régulateur de vitesse, il faut connaître la fonction de transfert du courant en boucle fermée .Pour simplifier l'étude de la boucle de vitesse, on peut simplifier la boucle de courant dans la forme suivante :

$$G_6(P) = \frac{1}{K_{cc}(1 + \frac{P}{w_{cbi}})}$$

Tel que :  $w_{cbi} = \frac{1}{T_{cc}\sqrt{a}}$

$w_{cbi}$  : La fréquence de coupure de la boucle de courant.

✓ La fonction de transfert de régulateur de vitesse est de la forme suivante :

$$G_{Rv}(P) = K_{Rv} \frac{1 + \tau_{Rv}P}{\tau_{Rv}P}$$

Selon la méthode de « kessler » la fonction de transfert de la boucle de vitesse ouverte :

$$G_7(P) = \frac{K_{Rv} \cdot K \cdot K_{cv}}{\tau_{Rv} \cdot K_{cc}j} \frac{1 + \tau_{Rv}P}{P^2(1 + \frac{P}{w_{cbi}})}$$

Comme le calcul des paramètres du régulateur de courant. On fait le même travail pour déterminer les paramètres du régulateur de vitesse.

On trouve :

$$\tau_1 = \frac{j \cdot K_{cc}}{K \cdot K_{cv}} \quad , \quad \tau_2 = \frac{1}{w_{cbi}}$$

$$\tau_{Rv} = a_v \cdot T_2 \quad , \quad K_{Rv} = \frac{1}{\sqrt{a}} \frac{T_1}{T_2}$$

$a_v = 4$  : Le coefficient d'avance de phase de vitesse.

$\tau_{Rv}$ : Constante de temps de régulateur de vitesse

$K_{Rv}$ : Coefficient d'amplification de régulateur de vitesse

A.N :

$$\tau_{Rv} = \frac{4}{100} = 0.04$$

$$K_{Rv} = \frac{1}{\sqrt{4}} \frac{0.005 * 1.818}{0.9668 * 0.047} 100 = 10$$

V.7-RESULTAT DE SIMULATION

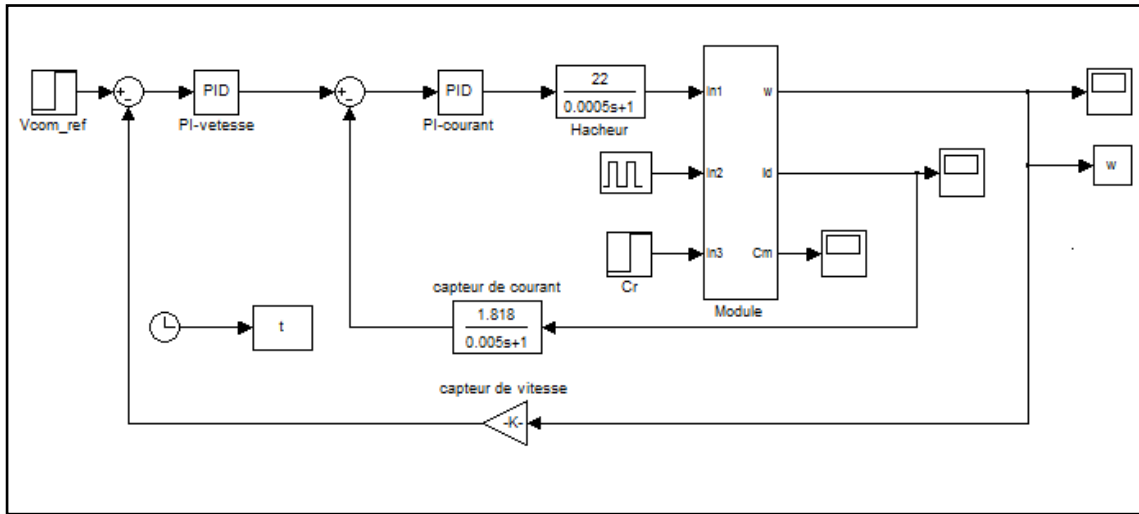
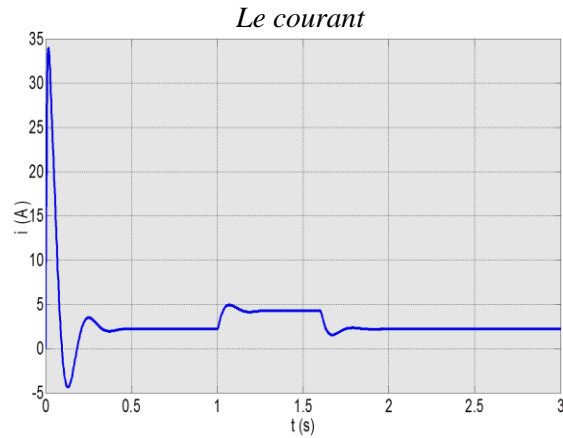
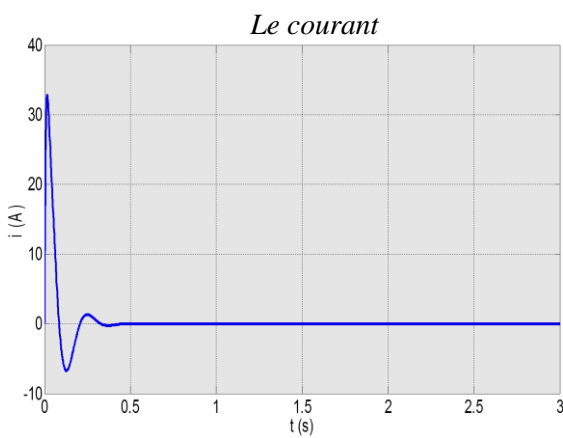
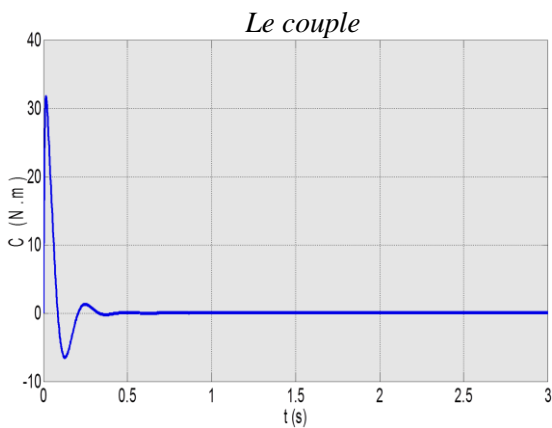
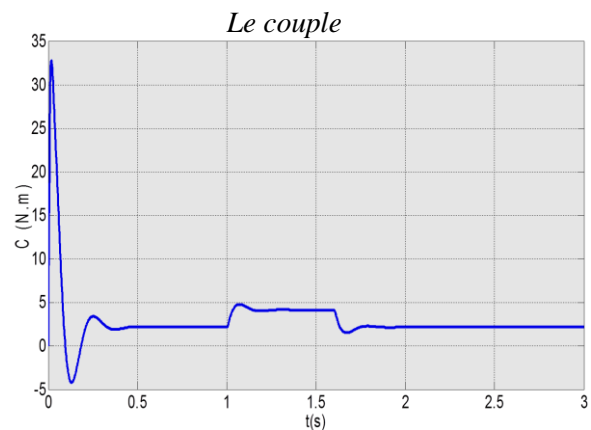


Figure V-15 : schéma bloc du régulateur en cascade





**Figure V-16 :** démarrage à vide de l'ensemble  
(Régulateur PI – Hacheur - MCC  
( $U_d = 220V$  ,  $C_r = 2,127N.m$ )



**Figure V-17 :** démarrage en charge avec  
perturbation de l'ensemble  
(Régulateur PI – Hacheur – MCC)  
( $U_d = 220V$  ,  $C_r = 2,127N.m$ )

### Interprétation

En premier temps quand on observe les formes des caractéristiques (courant, couple, vitesse), on remarque que la vitesse diminue dans un temps très court à une valeur très proche de la valeur de régime permanent puis elle retourne au régime permanent. Quelque soit la variation du charge ou le changement de la tension que nous appliquons. Celle-ci justifie le rôle du régulateur de vitesse qui maintient la vitesse de sortie à un niveau constant.

Pour les courbes (couple - courant) on remarque qu'il y a une augmentation très rapide puis ils retournent au régime permanent.

D'après les résultats de simulation, les courbes montrent la robustesse du système (régulateur – hacheur - MCC) vis-à-vis la régulation, la variation de la charge (couple résistant  $C_r$ ) et l'efficacité du régulateur de vitesse et courant, ajusté et optimale.

### V.8-CONCLUSION

Le fonctionnement des moteurs à courant continu sans régulation présente un certain nombre d'inconvénients tels que un courant important au démarrage, une diminution de vitesse de rotation en cas de charge, de ce fait pour effectuer un certain travail avec des performances données, le système doit être réglé. Le premier rôle d'un système de régulation est d'obliger la ou les grandeurs asservies (sortie du système) à conserver des valeurs aussi proche que possible de celle que l'on considère comme idéale. Généralement les systèmes de commande sont à boucle fermée qui consiste en une commande à rétroaction, puisque c'est le moyen le plus commode pour réaliser des relations désirées entre l'entrée (commandable) et la sortie (observable) des systèmes ce qui permet une compensation interne des imprécisions et les dérivées des caractéristiques du système.



## CONCLUSION GÉNÉRALE

Les entraînements réglés c'est-à-dire les entraînements électromécaniques à vitesse variable, constituent l'application la plus importante et la plus vaste de l'électronique industrielle.

Ces entraînements réglés utilisant des moteurs à courant continu, on atteint aujourd'hui un niveau de performances très élevé et on constate une normalisation quasi complète des circuits de puissance et de réglage même pour les entraînements spéciaux.

La première partie de ce travail est consacrée aux structures caractéristiques et à l'utilité des convertisseurs statiques et en particulier la conversion continue-continue.

On étudie aussi par simulation les structures série, parallèle, et réversible en tension et en courant.

Ces convertisseurs, n'ont cessé d'être développés et ceux à interrupteurs résonnant représentant l'actuelle génération. Ils trouvent leur principale utilisation quand ils s'agissent de travailler à des fréquences élevées. Ils sont caractérisés aussi par des faibles pertes de commutations.

La deuxième partie est consacrée à l'association : convertisseur -moteur à courant continu avec deux boucles imbriquées de réglages, l'une du courant et l'autre de la vitesse.

Après avoir calculé les paramètres des régulateurs est afin de vérifier les comportements dynamiques et statique du système on procède à la simulation numérique pour avoir l'aptitude de système d'absorbé les perturbation durant le fonctionnement .

Finalement on espère que les personnes s'intéressent à ce problème trouvant en ce modeste travail une inspiration, leur permettant de développer d'autres idées.

**ANNEXE**



➤ **PARAMAITRE DE LA MACHINE A COURANT CONTINU :**

<b>Puissance nominale :</b>	$P_n = 0,3 \text{ KW}$
<b>Tension nominale :</b>	$U_d = 220 \text{ V}$
<b>Vitesse de rotation nominale :</b>	$N = 2000 \text{ tr/min}$
<b>Couple nominale :</b>	$C_n = 2.127 \text{ N. m}$
<b>Courant nominale :</b>	$I_d = 2.2 \text{ A}$
<b>Résistance d'induit :</b>	$R_a = 8 \Omega$
<b>Inductance d'induit :</b>	$L_a = 0.0597 \text{ H}$
<b>Moment d'inertie :</b>	$J = 0.005 \text{ Kg. m}^2$



**BIBLIOGRAPHIE**

[1] **Guy SEGUIER, Francis LABRIQUE, Robert BAUSIERE** « Les convertisseurs de L'électronique de puissance, la conversion continu-continu », 2<sup>ém</sup> édition [LAVOISIER 1997].

[2] **Guy SEGUIER, Francis LABRIQUE, Robert BAUSIERE** « Électronique de puissance, structure, fonction de bases, principales applications) », 7<sup>ém</sup> édition [DUNOD, 1999].

[3] **Guy SEGUIER, Francis LABRIQUE, Robert BAUSIERE** « Électronique de puissance, structure, fonction de bases, principales applications » , 8<sup>ém</sup> édition [DUNOD, 2004].

[4] **Gay Chateigner, Michel BOES, Daniel BOUIX, Jacques VAILLANT, Daniel VERDINKER** « Manuel de génie électrique » [DUNOD, Paris, 2006].

[5] **ADNANI Boubekour** « Modélisation et contrôle des convertisseurs à résonance (Application au chauffage par induction) », [mémoire de Magister en électrotechnique, [université de Bejaia, 2010].

[6] **Tahar NEFFATI** « L'électronique » des exemples d'application de schéma de synthèse, des conseils pour réviser, [DUNOD, Paris 2006].

[7] **Michel PINARD** « Convertisseurs et électronique de puissance » édition [DUNOD, PARIS, 2007].

[8] **Pierre MAYE** « Aide- mémoire, composant électronique » , 3<sup>ém</sup> édition [DUNOD, paris, 2005].

[9] **Bogdan GRABOWSKI, Christian RIPPOL et COLL** « Aide-mémoire, Electronique » 5<sup>ém</sup> édition [DUNOD, Paris, 2008].

[10] **Jeans -louis COSQUERELLE, Christophe PASQUIER** « Rayonnement électromagnétique des convertisseurs à découpage, approche simplifié Par le concept des lots rayonnant » [EDP2002].

[11] **Patrick PROUVOST** « AUTOMATIQUE, contrôle et régulation, cours et exercices corrigés » [B.U. le havre-section].

[12] **GASMI Abdelmalek, SID AHMED Zine Elabidine** « Etude et réalisation pratique d'une carte de commande d'un GTO destinée a un entraînement électrique », [ mémoire fin d'étude [université m'sila 2005].

[13] J.Baillou, J.P.Cemla, B.Gasnier, M.Lethiecq « Cours de systèmes asservis » [Polytech'tour].

[14] **Prof. Michel ETIQUE** « Régulation automatique (REG)» Yverdon-les-Bains (2009).

[15] **ROUABHI Riyad, NAGUEZ Saïd** « Commande d'un moteur à courant continu à l'aide d'un hacheur à IGBT », [mémoire d'ingénieur en génie électrique [université m'sila, 2009].

[16] **HANSRUEDI Buhler** « Electronique de réglage et de commande » 3<sup>ème</sup> édition [presses polytechniques et universitaire romandes, Lausanne, suisse, 1990].