

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :

N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies  
Département des Sciences et Technologies

**Projet de fin d'étude présenté en vue de l'obtention du diplôme de  
LICENCE**

**Domaine :** Sciences et Technologies  
**Filière :** Génie électrique  
**Spécialité :** maintenance en instrumentation industrielles

## Thème

# COMMANDE D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU PAR HACHEUR

**Par :**

HHANNI AHMED YACINE  
BBOUHALASSA MOHAMED  
AMINE

**Jury :**

M.DJELLOULI TAHAR	Maître Assistant A	Univ. Ghardaïa	<b>Encadreur</b>
M.	Maître Assistant A	Univ. Ghardaïa	<b>Co- Encadreur</b>
M.	Maître Assistant A	Univ. Ghardaïa	<b>Examineur</b>

**Année universitaire 2012/2013**

# RESUME

Ce travail est consacré aux structures, caractéristiques et à l'utilité des moteur à courant continu c'est-à-dire (avantages , facile à régler sa vitesse, ses équations électriques et mécaniques )

On a choisi un convertisseur électronique continu\_continu appellant HACHEUR réversible qui donne accès aux quatre quadrants, permettant de commander ce type de moteur(MCC)

On fera la simulation du moteur à courant continu après le calcul des régulateurs de courant et de vitesse, on procède à la simulation de l'ensemble à base des schémas blocs.

## الملخص:

هذا العمل يركز على مكونات , خصائص , و فوائد جهاز يغذى بتيار مستمر بمعنى ( الايجابيات , سهولة ضبط السرعة و معادلاته الكهربائية و الميكانيكية )

نختار مفرم قابل للانعكاس الذي يعطى على شكل اربعة تركيبات تسمح بالتحكم على نوع جهاز المغذى بالتيار المستمر

نستعمل محاكاة الجهاز المغذى بتيار مستمر بعد حساب ضوابط التيار و السرعة , نجري المحاكاة على مجموعهما بالاعتماد على شكلها التخطيطي

**Mot clés :** Moteur a courant continu ; convertisseur de courant continu\_cintinu (hacheur) ; simulation

# *Dédicaces*

Je dédie ce travail:

Mes parents qui ont sacrifiés leurs vies pour ma réussite.

*A ma famille et à mes amis*

*Pour la patience et les dévouements dont ils ont fait preuve.*

*Hanni Ahmed Yacine*

Je dédie ce travail:

Mes parents qui ont sacrifiés leurs vies *our Ca mienne.*

*.Mon frère et mes soeurs.*

*'Toute Ca famiffe sans exceptions.*

*Tous mes amis (es)*

**BOUHALASSA Mohamed Amine**



## REMERCIEMENTS

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

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Mr. DJELLOULI Tahar pour avoir d'abord proposée ce thème, pour suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessée de nous donner ses conseils.*

*Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé 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 à tous les membres du jury qui ont 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...*



## CHAPITRE I :MOTEUR A COURANT CONTINU PAR HACHEUR

<b>Généralités .....</b>	<b>17</b>
<b>I-2. Rappel sur les moteurs à courant continu .....</b>	<b>17</b>
I-2-1. Définition.....	17
I-2-2. Constitution.....	17
I-2-2-1. Description .....	17
I-2-3:principe de fonctionnement .....	17
I-2-3-1:Fonctionnement en moteur .....	18
I-2-3-2:Fonctionnement en génératrice.....	18
I-2-4:Moteur à courant continu à excitation indépendante .....	19
I-2-5. Expression de la force contre électromotrice (f.c.e.m) .....	19
I-2 6. Expression du couple mécanique .....	19
I-2-7. Caractéristique mécanique $C=f(\Omega)$ .....	20
I-2-8. Démarrage des moteurs à courant continu .....	20
I-2-9. Freinage par récupération .....	21
I-2-10. Réversibilité .....	21
I-2-11. Commande d'un moteur courant continu à flux constant .....	21
I-2-12. Les paramètres du moteur utilisé .....	22
<b>1-3: Le stator inducteu .....</b>	<b>22</b>
<b>1-4.Couple du moteur à courant continu .....</b>	<b>23</b>
<b>1-5. FEM de la génératrice à courant continu (ou fcem du moteur) .....</b>	<b>23</b>
<b>1-6. Commande de vitesse d'un moteur à courant continu .....</b>	<b>24</b>

<b>1-7.Réaction magnétique d'induit .....</b>	<b>24</b>
<b>1-8. Le moteur universel .....</b>	<b>25</b>
<b>1-9.Le principe physique fondamental .....</b>	<b>26</b>
<b>Etude du convertisseur .....</b>	<b>27</b>
<b>II-1 introduction .....</b>	<b>28</b>

## **CHAPITRE II : ETUDE DU CONVERTISSEUR DE COURANT CONTINU (HACHEUR)**

II-2. Les montages hacheurs .....	28
II-2-1. Définition .....	28
Hacheurs non réversibles .....	31
II-2-2-1. Hacheur dévolteur (série).....	31
II-2-2-2. . Hacheur survolteur (parallèle) :.....	32
II-2-3. Hacheurs réversibles .....	33
II-2-3-1. Hacheur réversible en tension .....	33
II-2-3-2. Hacheur réversible en courant .....	34
II-2-3-3. Hacheur réversible en tension et en courant .....	34
II-3- Hacheurs à transistors .....	34
II-4- Hacheur quatre quadrants .....	35
II -4-1-Deux stratégies de commande sont utilisées .....	36
II -4-1-1-Stratégie de commande.....	36
II -4-1-2-Caractéristique statique de commande .....	38
II -5-1-Cas du hacheur de type BUCK.....	39
II -5-1-1-Définition .....	39
II -6-1-Cas du hacheur de type BOOST .....	40
II -6-1-1-Définition .....	40

II -7-1-Cas du hacheur de type BUCK-BOOST .....	42
II -7-1-1-Définition .....	42
<b>conclusion .....</b>	<b>43</b>
 <b>CHAPITRE III : SIMULATION</b>	
<b>III.1- INTRODUCTION .....</b>	<b>45</b>
<b>III.2- MATLAB/Simulink .....</b>	<b>45</b>
<b>III.3-FONCTION DE TRANSFERT DU MOTEUR A COURANT CONTINU .....</b>	<b>46</b>
III.3.1-Fonction de transfert de la Partie électrique(équations électriques) .....	46
III.3.2- Fonction de transfert de la Partie mécanique (équations mécaniques) .....	46
III.3.3-Calcul des paramètres statiques du moteur .....	47
III.3.3.1-Coefficients de transfert du moteur.....	47
III.3.3.2- Constante de temps électrique du moteur .....	47
III.3.4-Schéma bloc du moteur.....	48
<b>III.4- MODELISATION DE CONVERTISSEUR .....</b>	<b>52</b>
III.4.1- Introduction.....	52
III.4.2-Fonction de transfert du convertisseur .....	53
III.4.3- Schéma bloc de l'ensemble convertisseur-moteur .....	55
<b>III.5- ETUDE DE BOUCLE DE COURANT .....</b>	<b>61</b>
III.5.1- Introduction.....	61
III.5.2- Capteur de courant d'induit .....	61
III.5.3- Calcul du facteur de transfert.....	61
III.5.4- Fonction de transfert du capteur de courant.....	62
III.5.5- Synthèse de la boucle de courant .....	62
III.5.6- Détermination des paramètres du régulateur de courant.....	62
<b>III.6- ETUDE DE LA BOUCLE DE VITESSE .....</b>	<b>64</b>

III.6.1- Introduction.....	64
III.6.2- Capteur de vitesse .....	64
III.6.3- Facteur de transfert du capteur de vitesse .....	64
III.6.4- Synthèse de la boucle de vitesse .....	65
<b>III.65- Détermination des paramètres de régulateur de vitesse .....</b>	<b>66</b>
<b>III.7- Schéma bloc de simulink .....</b>	<b>70</b>
<b>III.8- ETUDE DE STABILITE DU SYSTEME.....</b>	<b>74</b>
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>77</b>



## LISTE DES FIGURES

figure(i-1): charge mécanique.....	3
figure(i-2):charge électrique.....	4
i-2-3-1:fonctionnement en moteur .....	4
figure (i-3): shema presenter le fonctionnement en moteur champ magnétique inducteur b + ourant d'induit i .....	4
i-2-3-2:fonctionnement en génératrice.....	4
figure(i-4): schéma équivalent du moteur à courant continu à excitation dépendante.....	5
figure(i-5) :caractéristique mecanique.....	6
figure(i-6) : schéma de fonctionnement de la machine dans les deux quadrants.....	7
figure(i-7):schéma de commande d'un moteur à courant continu à flux constant .....	7
figure(i-8): réaction magnétique de l'induit ( moteur ,génératrice) .....	11
ii-2. les montages hacheurs .....	12
fig.ii-1: symbole d'un convertisseur continu —continu.....	12
Fig.II.5hacheur BUCKE).....	13
Fig.II.6 Fonctionnement.....	13
Fig.II.7avec un transistor MOS de puissance .....	13
Fig.II.8 avec un transistor IGBT .....	13
Fig .II.9 Un schéma de réalisation de hacheur.....	14
Fig. II-10 : Hacheurs série.....	14
fig. ii-2 : hacheurs série .....	15
fig. ii-3: formes d'ondes théoriques fournies par un hacheur série.....	16
fig. ii -4 : hacheur parallèle	16
fig. ii -5 : hacheur réversible en tension.....	17
fig. 11-6 : hacheur réversible en courant .....	18
fig. ii -7 hacheur réversible en tension et en courant .....	18

fig. ii-8 : hacheur à transistor .....	19
Fig. II.17 Hacheur quatre quadrants.....	19
Fig. II.19.1 : Stratégie de commande.....	21
Fig. II.20.2 : Stratégie de command.....	22
fig. 9.1. la fonction hacheur buck (dessins\h_serie1.drw).....	23
formes d'ondes du hacheur de type buck (dessns\h_serie1.drw) .....	24
Fig. II. 24 cas du hacheur de type boost .....	24
formes d'ondes du hacheur de type boost (dessins\boost7.drw) .....	25
la fonction hacheur inverseur (dessins\buckboo1.drw) .....	26
formes d'ondes du hacheur buck-boost (dessins\buckboo1.drw) .....	27
iii.3.1-fonction de transfert de la partie électrique(équations électriques) .....	29
iii.3.2- fonction de transfert de la partie mécanique (équations mécaniques).....	29
iii.3.4-schéma bloc du moteur.....	31
figure (iii-1) : schéma bloc du moteur à courant continu .....	31
figure (iii-2) : marche à vide / figure (iii-3) : marche en charge .....	31
figure(iii-4) :marche à vide,avec changement / figure(iii-5) : marche à vide,puis en .....	32

Figure (III-8) : Marche à vide ( $C_r=0, U_d=-220$ v) .....	3
Figure (III-9) : Marche en charge( $C_r= -2.127$ N.m, $U_d= -220$ v) .....	33
Figure (III-10): Marche à vide avec ( $U_d=-220$ v) Changement de sens de rotation à t= 5 s.....	33
Figure (III-11): Marche à vide( $U_d=-220$ v) puis en charge (t=3 s à t=7 s),avec changement de sens de rotation t=5 s.....	33
Figure (III -12): Marche à vide $U_d=-110$ v, puis à t =5 s , $U_d = - 220$ v.....	34
Figure (III-13): Marche à vide $U_d=-110$ v puis en charge ( $C_r=-2.127$ N.m , t=3 s à t=7 s) avec changement de vitesse (t=5 s, $U_d=-220$ v).....	34
Figure (III-14) : La caractéristique de réglage.....	36
Figure (III- 15) : schéma de bloc de l'ensemble moteur -convertisseur .....	36
Figure(III-18) :marche à vide,avec changement de sens de rotation (à t=5 s).....	37
Figure(III-19) : Marche à vide,puis en charge (t=3 s à t=7 s)avec changement de sens de rotation (t= 5 s ).....	37
Figure (III-20) : Marche à vide ( $U_{cm}=5$ v), Puis à t=5 s , $U_{cm} =10$ v.....	38
Figure (III-21) : Marche à vide $U_{cm}=5$ v, puis en charge ( $C_r=2.127$ N.m, t=3 s à t=7 s),et à t=5 s, $U_{cm} =10$ v.....	38
Figure (III-22) : Marche à vide ( $C_r=0, U_{cm}=-10$ v) .....	38
Figure (III-23) : Marche en charge ( $C_r= -2.127$ N.m, $U_{cm}= -10$ v).....	38
Figure (III-24): Marche à vide avec Changement de sens de rotation à t= 5 s.....	39
Figure (III-25): Marche à vide $U_{cm}=-10$ v puis en charge (t=3 s à t=7 s),avec changement de sens de rotation t=5 s.....	39
Figure (III -26): Marche à vide $U_{cm}=-5$ v,puis à t =5 s , $U_{cm} = - 10$ v.....	39
Figure (III-27): Marche à vide $U_{cm}=-5$ v puis en charge ( $C_r=-2.127$ N.m , t=3 s à t=7 s) avec changement de vitesse (t=5 s, $U_{cm}=-10$ v).....	39
Figure (III-28): Schéma bloc de régulation de courant.....	42

Figure (III-29) : Schéma bloc de la régulation en cascade de l'association convertisseur-moteur courant continu.....	44
Figure (III-30) : Marche à vide $U_{cm}=10v$ , puis en charge ( $C_r=2.127 N.m, t=3 s$ à $t= 7 s$ ).....	46
Figure (III-31) : Marche à vide $U_{cm}=10v$ , puis en charge ( $C_r=2.127 N.m, t=3 s$ à $t= 7s$ ), avec changement de sens de rotation ( $t=5 s, U_{cm}=-10 v$ ).....	46
Figure (III-32) : Marche à vide $U_{cm}=5v$ , puis en charge ( $C_r=2.127 N.m, t=3 s$ à $t= 7 s$ ), à $t=5 s$ changement de vitesse ( $U_{cm}=10 v$ ) .....	47
Figure (III-33) : Marche à vide $U_{cm}=-10v$ , puis en charge ( $C_r=-2.127 N.m, t=3 s$ à $t= 7 s$ ) .....	47
Figure (III-34) : Marche à vide $U_{cm}=-10v$ , puis en charge ( $C_r=-2.127 N.m, t=3 s$ à $t= 7s$ ) avec changement de sens de rotation ( $t=5 s, U_{cm}=10 v$ ).....	48
Figure (III-35) : Marche à vide $U_{cm}=-5v$ , puis en charge ( $C_r=-2.127 N.m, t=3 s$ à $t= 7 s$ ), à $t=5 s$ changement de vitesse ( $U_{cm}=-10 v$ ).....	48
Figure (III-36) : Schéma complet du modèle réel de l'association convertisseur de courant bidirectionnel-moteur à courant continu.....	49
Figure (III-38) : Marche à vide puis en charge (à $t=1 s, C_r=2.127N.m, U_d=220 v$ ).....	50
Figure (III-39) : Marche en charge ( $C_r=2.127 N.m, w=w_n/2, w=w_n$ ) .....	51
Figure (III-40) : Marche en charge ( $C_r= -2.127 N.m, U_d= -220 v$ ).....	51
Figure (III-41) : Marche à vide , puis en charge (à $t=1 s, C_r= -2.127 N.m, U_d= -220 v$ ).....	52
Figure (III-42) : Marche en charge ( $C_r= -2.127 N.m, w= -w_n/2, w= -w_n$ ).....	52



**INTRODUCTIN**

**GENERALE**

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le monde industriel a été dominé pendant longtemps par les machines à courant continu. Grâce à leurs avantages relatifs qu'elles présentent par rapport à d'autres types de machines (machines à courant alternatif), les machines à courant continu sont largement employées dans plusieurs domaines de l'industrie, elles sont les plus utilisées pour la réalisation d'entraînement réglé avec un niveau de performance très élevé et une normalisation quasi complète des circuits de réglage.

Les machines à courant continu sont des machines tournantes qui sont réversibles c'est-à-dire qu'elles peuvent fonctionner indifféremment soit comme réceptrice (moteur) soit comme génératrice (dynamo), on peut réaliser cette réversibilité à l'aide des deux techniques de commande, la plus ancienne c'est le groupe *Ward léonard* (convertisseur électrique), qui représente une grande performance et surcharge ; Et la nouvelle technique grâce à la découverte des semi-conducteurs (thyristors) éléments répondant parfaitement aux exigences industrielles. A partir de 1960 environ les semi-conducteurs furent introduits dans le domaine de l'électronique industrielle, et permettent de réaliser des dispositifs de plus en plus complexes destinés à l'automatisation de processus industriels.

De plus, la miniaturisation des éléments sous forme de circuits intégrés, introduit dans le domaine de l'électronique industrielle à partir de 1970 environ, permet de réduire l'encombrement et le coût de ces dispositifs, tout en augmentant leurs fiabilités et en réduisant la consommation d'énergie.

L'électronique de puissance met à la 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 circuits de réglage de haute qualité.

Les entraînements réglés utilisant des moteurs à courant continu ont atteint aujourd'hui un niveau de performance très élevé ainsi on constate une normalisation quasi complète des circuits de puissance et de réglage.

Le développement de ces entraînements a débuté aux environs de 1950, en utilisant d'abord des thyristors ou des redresseurs à vapeur de mercure, plus tard, on a fait appel à des thyristors. Actuellement, on utilise exclusivement ces derniers dans les installations nouvelles.

Notre modeste étude portera sur l'étude de l'association d'un convertisseur de courant de moteur à courant continu ; la représentation du mémoire est structurée en une introduction, trois chapitres et une conclusion, suivie d'annexe, et répartie comme suit :

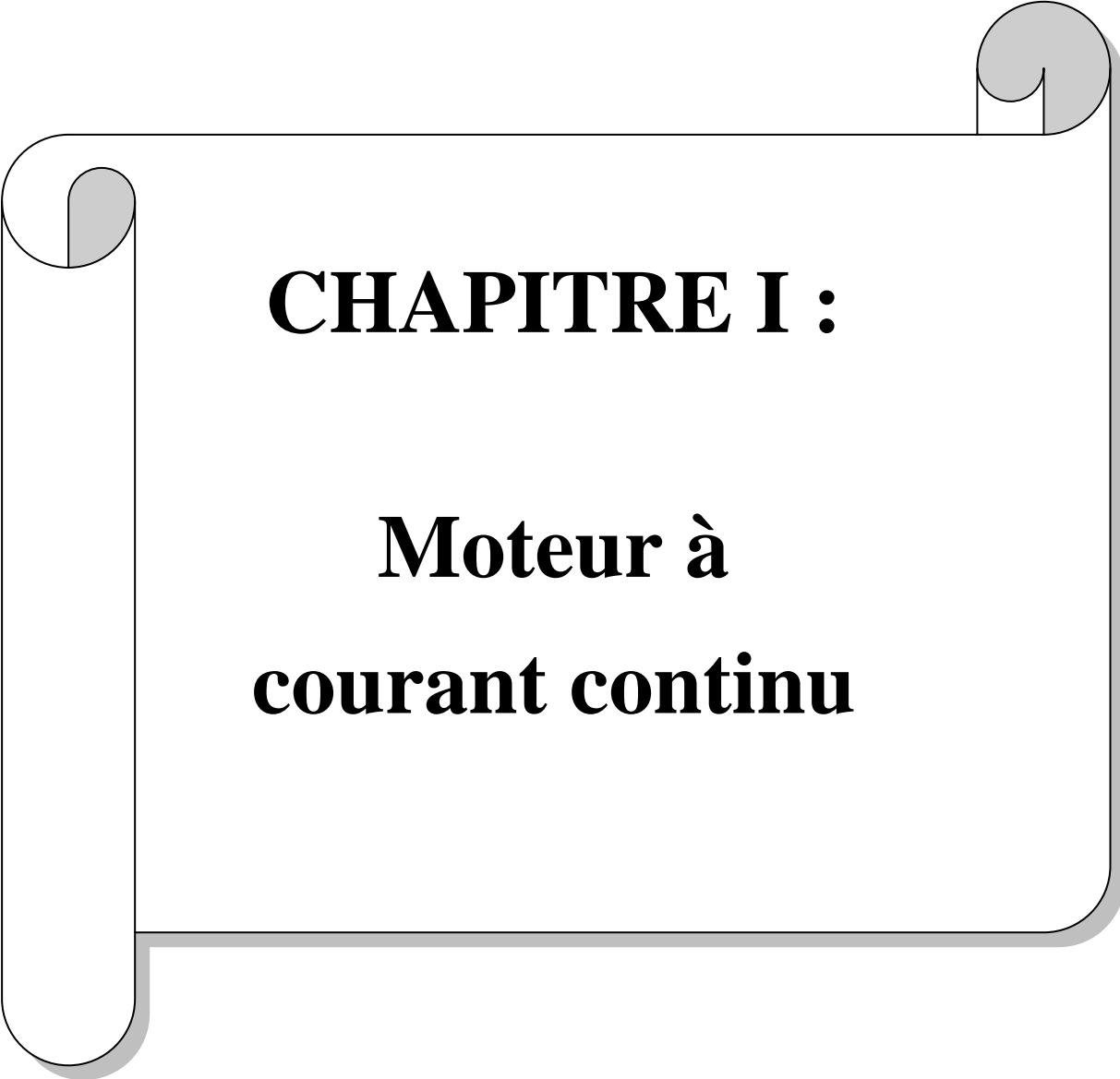
Dans le premier chapitre, on étudiera le rappel sur les moteurs à courant continu (constitution, Description, Principe de fonctionnement ), différents types de moteurs à CC ( excitation indépendante, série, shunt, ...), choix d'un MCC( avantages , facile à régler sa vitesse, ses équations électriques et mécaniques,..)

Dans le deuxième chapitre, on étudiera les convertisseurs continu –continu (hacheurs) en courant, une description du convertisseur statique, définition et principe de fonctionnement, Les montages hacheurs (série parallèle, ...) , Hacheur quatre quadrants et le type d'un hacheur .

Dans le dernier chapitre, on fera la simulation du moteur à courant continu après le calcul des régulateurs de courant et de vitesse, on procède à la simulation de l'ensemble à base des schémas blocs.

Voulons profiter des progrès qu'a connus le logiciel **MATLAB**, on fera l'étude et la simulation en utilisant les schémas réels de l'association précédente. Cette partie représente en quelque sorte un laboratoire virtuel.

On aurait bien voulu vérifier les résultats à partir d'une expérimentation réelle, mais ceci a été impossible par manque de moyens matériels.



**CHAPITRE I :**

**Moteur à  
courant continu**



## Généralités

Les entraînements à vitesse variable sont l'application la plus importante de l'électronique industrielle. On y fait appel non seulement à l'électronique de puissance mais aussi à l'électronique de réglage et de commande.

Aujourd'hui, les moteurs à courant continu, qui sont par nature des machines à vitesse variable, sont très utilisés. Aussi, les progrès extraordinaires accomplis durant ces dernières années dans le domaine des semi-conducteurs de puissance rendent leur commande de plus en plus performante.

### I-2. Rappel sur les moteurs à courant continu:

#### I-2-1. Définition:

Un moteur électrique est destiné à fournir de l'énergie mécanique. Son choix devient délicat lorsqu'il doit assurer des démarrages fréquents, des réglages de la vitesse est le plus souvent le freinage de la charge qu'il entraîne.

#### I-2-2. Constitution:

##### I-2-2-1. Description

\*Un moteur à courant continu est composé essentiellement de deux parties

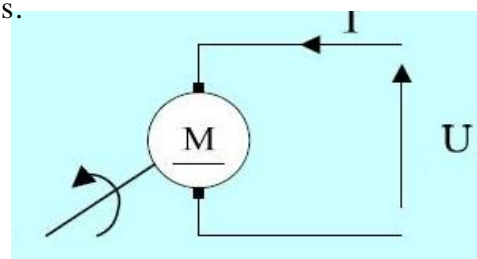
**a-un stator (fixe) :** Il comporte la source de champ magnétique; bobines. aimants permanents.

**b-un rotor (mobile) :** Il est constitué de conducteurs électrique sièges des forces de Laplace et des f.e.m induites, ainsi qu'un collecteur formé de lames de cuivre auxquelles les conducteurs sont reliés et sur lesquelles viennent frotter des balais.

#### I-2-3: principe de fonctionnement :

##### -Fonctionnement en moteur

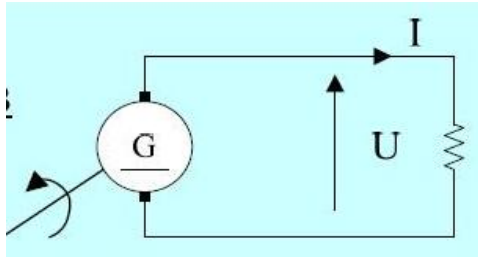
Conversion d'énergie électrique en énergie mécanique :



Figure(I-1): charge mécanique

## -Fonction en génératrice (dynamo)

Conversion d'énergie mécanique en énergie électrique



Figure(I-2):charge électrique

### I-2-3-1:Fonctionnement en moteur :

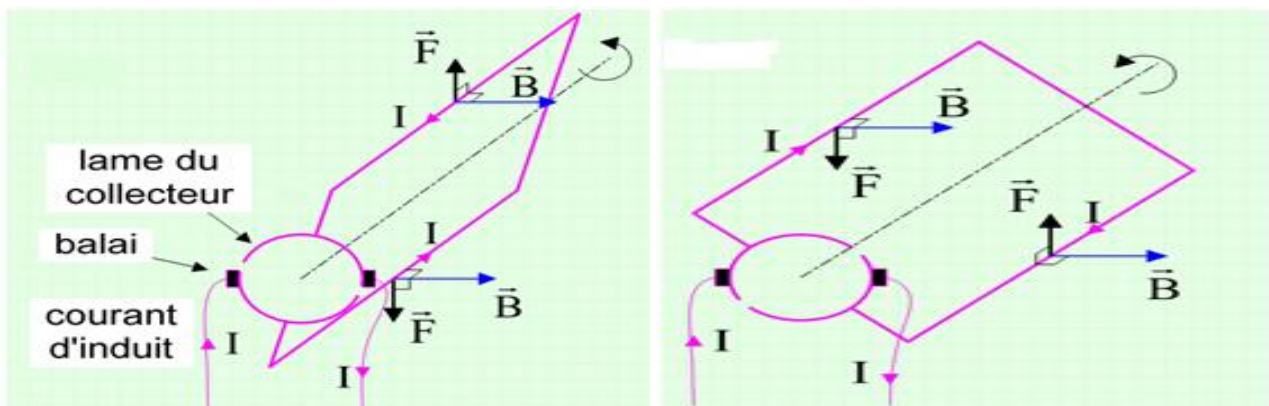


Figure (I-3): schéma présenter le fonctionnement en moteur Champ magnétique inducteur  $B$  + ourant d'induit  $I$

⇒ Force électromotrices (force de Laplace )

⇒ Couple électromagnétique

⇒ Rotation du rotor

### I-2-3-2:Fonctionnement en génératrice

Le principe physique utilisé est le phénomène d'induction électromagnétique (loi de Faraday):

$$e = -d\Phi/dt$$

## I-2-4: Moteur à courant continu à excitation indépendante :

Le moteur est excité par un courant  $i$  constant fourni par une source autre que celle qui alimente l'induit.

$U_a$ : tension d'induit

$I_a$ : courant dans l'induit.

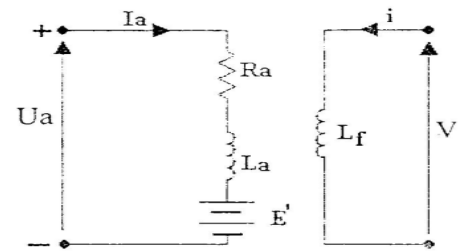
$R_a$  : résistance d'induit du moteur d'excitation ...

$E'$ : la f.c.e.m

$V$ : tension

$L_f$ : inductance de fuite de l'inductance.

$I$ : courant d'excitation.



Figure(I-4): Schéma équivalent du moteur à courant continu à excitation indépendante. [1]

## I-2-5. Expression de la force contre électromotrice (f.c.e.m) :

**La f.c.e.m est dûe aux variations du flux magnétique interne**

provoquées par la rotation de la machine .Elle s'exprime par la relation :

$$E' = k \cdot \Phi \cdot \Omega$$

$K = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{2\pi}$  : constant du couple et de la f.c.é.m.

$p$  : nombre de paires de pôles

$a$  : nombre de paires de voies.

$n$ : nombre de conducteurs actifs.

$\Omega$ : vitesse de rotation en (rd/s).

$\Phi$ : flux utile par pôle (weber).

## I-2 6. Expression du couple mécanique :

A vitesse constante et pertes négligeables, la puissance disponible sous forme électrique est donnée par :  $P_e = E' I_a$

On l'appelle puissance électromagnétique et elle donne naissance au couple électromagnétique ; soit:

$$C_e = \frac{P_e}{\Omega} = \frac{E' I_a}{\Omega} = \frac{K \Phi \Omega I_a}{\Omega} = K \Phi I_a \quad (I-1)$$

le couple d'un moteur à courant continu est proportionnel au flux et au courant absorbé par l'induit. [2]

### I-2-7. Caractéristique mécanique $C=f(\Omega)$ :

Nous avons pour un moteur à courant continu

$$U_a = R_a I_a + E' \quad (I-2)$$

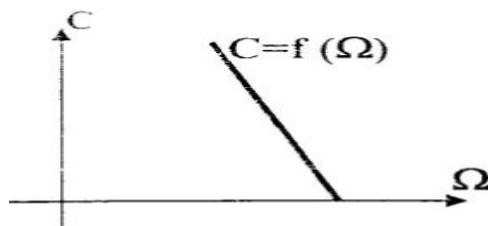
$$= R_a I_a + k \Omega \Phi \quad (I-3)$$

$$C = k \Phi I_a \quad (I-4)$$

En éliminant le courant entre les relations (1) et (2), on obtient l'équation donnant la caractéristique mécanique:

$$C = \frac{k \Phi}{R_a} U_a - \frac{(k \Phi)^2}{R_a} (\Omega) \quad (I-5)$$

pour un moteur à courant continu à flux constant (excitation indépendante). Le tracé correspondant est une droite de pente  $-(k \Phi)/R_a$  comme indiquée la figure [2]



Figure(I-5) : caractéristique mécanique

### I-2-8. Démarrage des moteurs à courant continu :

Le démarrage d'un moteur à courant continu peut être réalisé par trois méthodes :

- a) Si on dispose d'une tension continue réglable, démarrer sous tension réduite, et la faire croître ensuite progressivement.
- b) Utiliser un rhéostat de démarrage ; c'est-à-dire insérer en série dans le circuit des résistances qui seront en suite successivement court-circuitées manuellement lorsque le moteur prendra de la vitesse.
- c) Utiliser une boîte automatique qui réalise la même fonction qu'un rhéostat de démarrage mais automatiquement (avec des relais commandés). [3]

### I-2-9. Freinage par récupération :

Il correspond à un renvoi de l'énergie vers la source, le courant changeant, par conséquent, de sens. Il en est également, du couple qui devient résistant ta pour effet le freinage de la charge. Le moteur fonctionne durant cette comme génératrice. [4]

### I-2-10. Réversibilité :

La machine à courant continu est caractérisée par le phénomène de réversibilité. Elle fonctionne en moteur si la puissance électromagnétique convertie est positive. Si c'est le cas contraire, la machine fonctionne en Génératrice.

$$P_e = C \Omega = k \Phi I_a \Omega \quad (I-5)$$

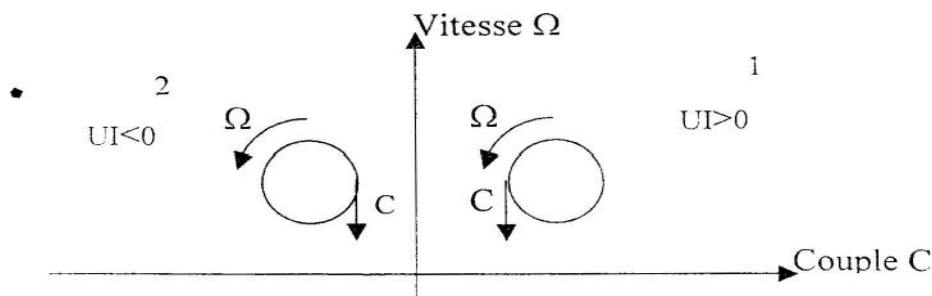
Si  $P_e > 0$  : moteur

$P_e < 0$  : génératrice (freinage)

La figure suivant définit les fonctionnements possibles de la machine dans les deux quadrants:

-quadrant1 : marche en moteur dans le sens positif  $N > 0$ ,  $UI > 0$ .

-quadrant2 : marche en récupération dans le sens direct  $N > 0$ ,  $UI < 0$ . [4]



Figure(I-6) : Schéma de fonctionnement de la machine dans les deux quadrants

On utilise un convertisseur continu-continu (hacheur) qui à partir du réseau continu fournit une tension continue  $U_c$  dont la valeur moyenne est variable. Les interrupteurs statiques (transistors de puissance dans notre cas) du montage hacheur sont enclenchés et déclenchés riodiquement par le signal de sortie du générateur de créneaux. Ce dernier utilise l'écart entre le courant circulant dans la machine mesuré par le shunt S et la référence de courant ( $T_{ref}$ ) à la sortie de la boucle de vitesse. [5]

### 1-3: Le stator inducteur:

Le stator comporte 2 pièces polaires diamétralement opposées qui enveloppent chacune le rotor sur un angle de  $\approx \pi/2$ . Au moyen d'aimants permanents (pour les petits moteurs) ou d'un circuit inducteur (alimenté par le courant d'excitation  $i$  continu), les pièces polaires deviennent des pôles N et S fixes :

les lignes d'induction ainsi engendrées se referment par la carcasse du stator et à travers le rotor. Elles ont le plus grand mal à traverser l'entrefer, c'est-à-dire les quelques millimètres d'air séparant le stator fixe du rotor tournant : prenant le chemin le plus court, elles sont orthogonales aux surfaces cylindriques, elles sont donc radiales dans l'entrefer.

L'induction  $B_s$  est maximum dans l'axe des pôles et pratiquement nulle dans l'espace interpolaire. Le plan où l'induction s'annule (appelé plan neutre) est le plan de symétrie des 2 pôles N et S. [6]

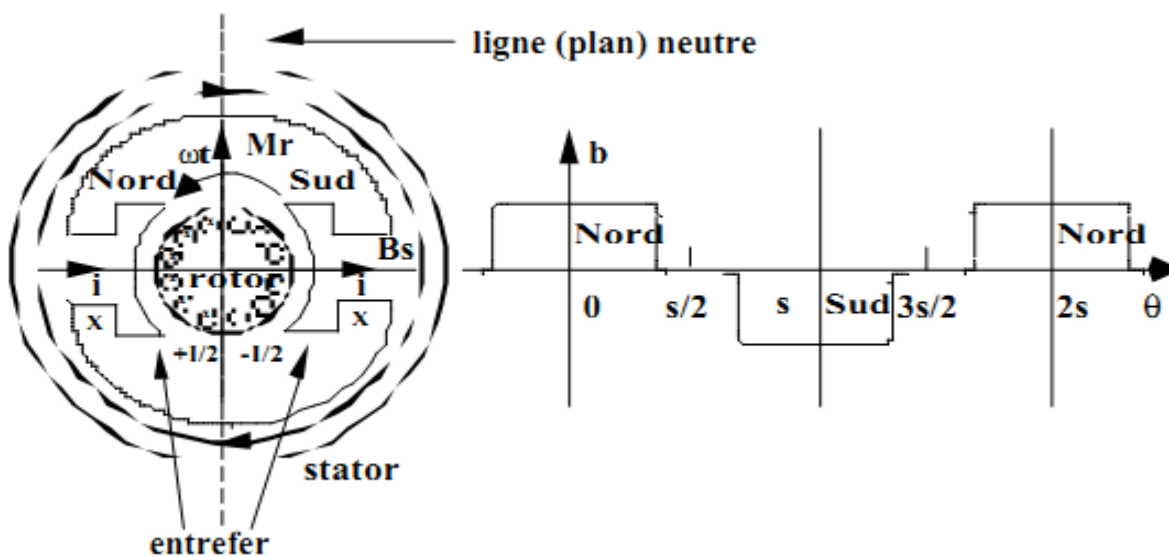


Figure (1-7) : shemas presenter le plan de symétrie des 2 pôles N et S

## 1-4. Couple du moteur à courant continu:

Soit  $B_s$  l'induction statorique régnant dans l'entrefer au niveau des pôles. Soit  $\Phi$  le flux de  $B_s$  à travers l'entrefer sous une pièce polaire. On alimente le circuit rotorique par un courant  $I$  continu traversant  $n$  conducteurs logés dans les encoches rotoriques.

Par le truchement du système charbons/collecteur, le courant  $I$  circule en faisant le tour du rotor :  $I$  va d'avant en arrière sous le pôle N statorique et d'arrière en avant sous le pôle S statorique. Cette circulation de  $I$  transforme le rotor en dipôle magnétique  $M_r$  orthogonal à  $B_s$ ,  $M_r$  restant fixe par rapport au stator malgré la rotation du rotor. Sur le rotor s'exerce alors le couple  $\Gamma = M_r \times B_s$  qui le fait tourner. C'est un moteur.

Pour la démonstration on peut considérer les couples des forces de Laplace élémentaires qui s'exercent sur les conducteurs rotoriques. Sous un pôle N statorique ces forces contribuent à un couple de même sens que celles s'exerçant sur les conducteurs rotoriques placés sous le pôle S.

Le couple théorique global est donné par:  $\Gamma = n\Phi I / 2\pi$ . (I-6)

Il faut en retrancher le couple de pertes pour obtenir le couple utile, c'est-à-dire utilisable pour entraîner une charge en rotation.

Le rotor qui voit  $B_s$  changer de direction à chaque demi-tour doit être en tôles feuilletées pour minimiser les pertes fer par courants de Foucault : sinon il ne pourrait pas tourner.

Critiques du moteur à courant continu :

- couple limité par  $I$  maximum
- espace perdu entre les pôles : pas de couple là où l'induction est nulle
- fragilité et coût élevé du système charbons/collecteur. [6]

## 1-5. FEM de la génératrice à courant continu (ou $f_{cem}$ du moteur):

Le stator est toujours inducteur (pôles N et S statoriques, flux  $\Phi$  de  $B_s$  sous les pôles) mais on fait tourner (par un apport mécanique extérieur) le rotor de la machine :

chacun des  $n$  conducteurs rotoriques passe successivement sous un pôle N puis sous un pôle S. Il est donc le siège d'une fem alternative (loi de Lenz). Par le truchement du système charbons/collecteur (fonctionnant en redresseur mécanique), ces fem peuvent être redressées et mises en série pour donner une fem résultante continue  $E = n.N.\Phi$

$N$  est la vitesse de rotation en tr/sec : c'est la traduction de l'opérateur  $d/dt$  de la loi de Lenz.

Les 2 formules du couple et de la fem expriment la conservation de la puissance au niveau de l'entrefer. En effet  $EI = n.N.\Phi.I = n.\Omega.\Phi.I / 2\pi = \Gamma \Omega$ .

$E I$  est la puissance électrique et  $\Gamma \Omega$  la puissance mécanique. [6]

### 1-6. Commande de vitesse d'un moteur à courant continu:

La loi d'Ohm pour le circuit rotorique est  $U = E + RI + eB$ . Si le moteur est à vide, le courant  $I$  absorbé est négligeable et  $U \approx E = n N \Phi$ .

La vitesse  $N$  est proportionnelle à la tension  $U$  d'alimentation; c'est le grand intérêt du moteur à courant continu. En inversant  $U$ , on peut même le faire tourner en marche arrière. Si  $R$  est relativement faible, le moteur en charge absorbe le courant  $I$  pour développer le couple

$n \Phi I / 2\pi$ , tourne pratiquement à la même vitesse qu'à vide puisque  $R I$  et  $eB$  restent petits devant  $U \approx E$ .

Ainsi, développant un couple uniquement fonction du courant absorbé (et de  $\Phi$ ), le moteur à courant continu est l'idéal pour la traction électrique (pas d'embrayage, pas de boîte de vitesses) : tramway, métro, trolleybus, SNCF... Il lui faut par contre une alimentation en tension continue  $U$  variable. [6]

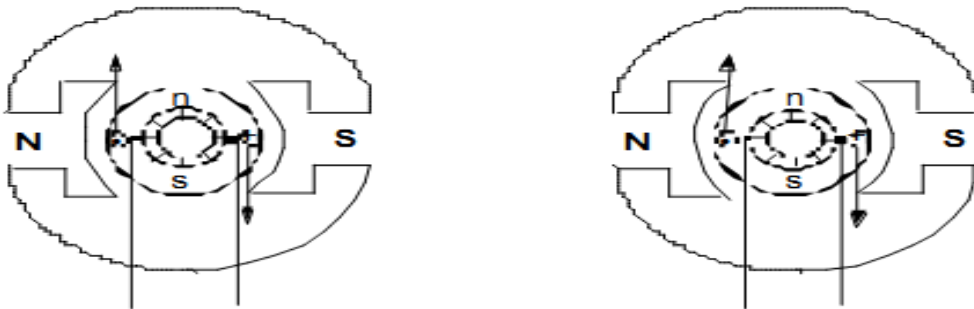
### 1-7. Réaction magnétique d'induit:

Lorsque la génératrice est en charge, par définition elle débite un courant  $I \neq 0$ ; lorsque le moteur est en charge, il absorbe un courant  $I \neq 0$ . Ce courant  $I$  qui traverse l'enroulement rotorique crée un champ magnétique moyen  $B_r$  (parallèle à  $M_r$  et orthogonal à  $B_s$ ). Dans l'entrefer règne une induction résultante  $B = B_r + B_s$  qui dis symétrise l'induction  $B(\theta)$  par rapport à l'axe des pôles. Cela a 2 conséquences :



la ligne neutre (où  $B(\theta)=0$ ) n'est plus le plan de symétrie mécanique des 2 pôles), elle tourne d'un certain angle puisque  $B$  total n'est plus parallèle à l'axe des pôles : il faut faire tourner les charbons pour retrouver toute la fem.

si le fer est proche de la saturation, des parties des pièces polaires, soumises à l'induction  $B$  la plus intense, peuvent saturer. Le flux  $\Phi$  par pôle, proportionnel à la valeur moyenne de  $B$  sous un pôle, s'en trouvera affaibli. Ainsi la fem et le couple s'en trouvent diminués. [6]



Figure(I-7): réaction magnétique de l'induit ( moteur ,génératrice)

### 1-8. Le moteur universel:

Prenons un moteur continu série (par exemple le démarreur d'une voiture) : c'est le même courant  $I$  qui alimente le rotor et le circuit statorique créant l'induction  $B_s$  donc  $\Phi$ . Le couple instantané est donc  $n \Phi(I) I / 2\pi$ .

Lorsque  $I$  est alternatif,  $\Phi(I)$  et  $I$  changent de signe en même temps et la valeur moyenne de  $\Gamma$  sur une période est non nulle. Le moteur série peut donc fonctionner en alternatif. Même si son stator est constitué de tôles feuilletées, il a beaucoup de pertes qui lui donnent un assez mauvais rendement.

C'est le moteur typique du petit électro-ménager, des perceuses, ponceuses...etc.

## 1-9.Le principe physique fondamental:

Tous les moteurs électriques sont basés sur le principe physique du couplage magnétique entre deux champs magnétiques. La transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique s'opère à travers ce couplage magnétique ou interaction magnétique. De ce principe il découle que tout moteur comporte deux circuits magnétiques, appelé stator (partie fixe) et rotor (partie mobile).

Dans le cas du moteur à courant continu le stator, aussi appelé inducteur, crée un champ magnétique  $B_s$ . Le rotor, aussi appelé induit, est alimenté par courant continu. Les conducteurs du rotor traversés par le courant sont immergés dans le champ  $B_s$ , or le physicien Laplace a découvert que le conducteur est soumis à une force  $F = B_s \wedge I$  ( $\wedge$  = produit vectoriel entre les deux vecteurs). C'est cette force qui va faire tourner le rotor et créer le couple moteur.

La constitution technologique du moteur matérialise ce principe de fonctionnement. [6]

A decorative scroll frame with a grey shadow, containing the chapter title. The frame has rounded corners and a vertical strip on the left side, with a scroll-like end at the top right.

# **CHAPITRE II :**

## **Etude du convertisseur de courant continu (hacheur)**

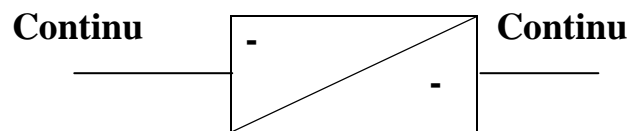
## II-1 introduction :

Le réglage de la vitesse des moteurs à courant continu par action sur la tension d'induit fait appel à des convertisseurs électroniques. On y distingue le convertisseur continu-continu. Ce dernier utilise donc comme source de départ une source continue.

## II-2. Les montages hacheurs :

### II-2-1. Définition :

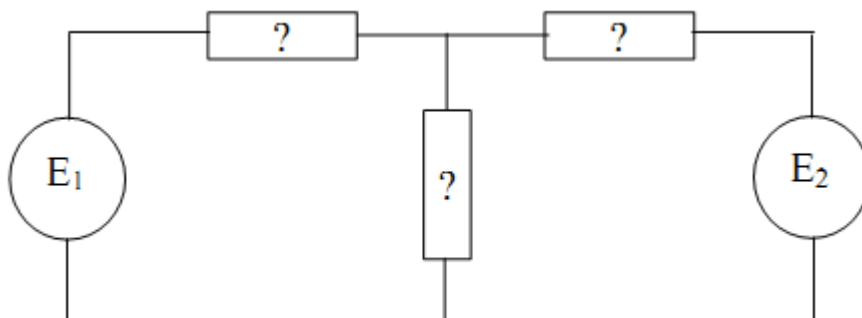
Un hacheur, ou convertisseur continu-continu (le symbole est donné ci- après) est un système électronique capable de modifier la valeur moyenne d'un courant continu et d'une tension continue avec un bon rendement. Il permet la commande d'un moteur à courant – continu



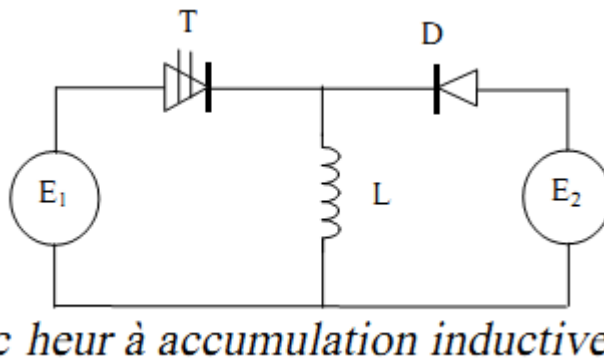
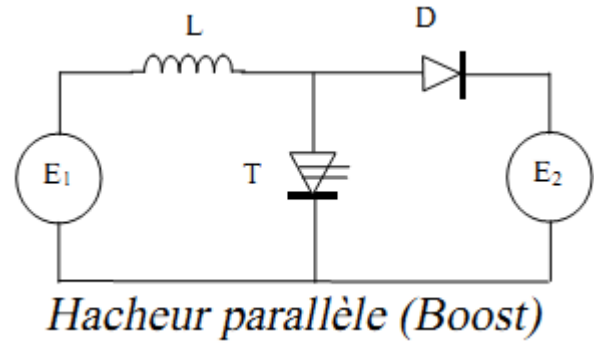
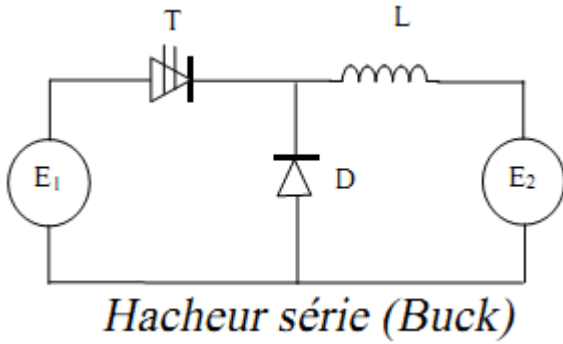
**Fig.II-1: symbole d'un convertisseur continu —continu**

### Topologie des Hacheurs Elémentaires :

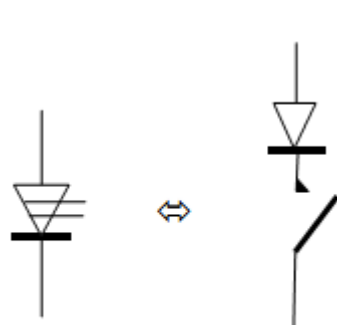
**Un hacheur élémentaire possède la topologie suivante:**



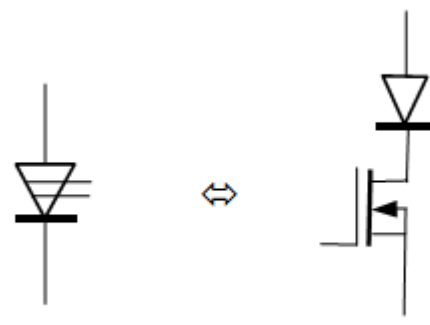
Aux trois emplacements marqués (?), on distribue: une inductance, une diode et une soupape. On montre que, parmi tous les schémas valides possibles, on est ramené à trois schémas différents et donc trois comportements de base qu'il convient de connaître:



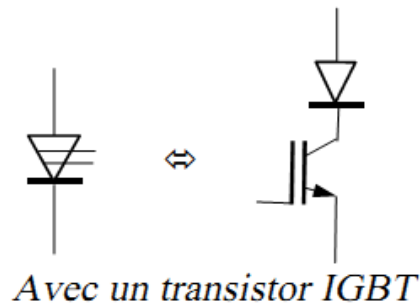
Une soupape consiste essentiellement dans la mise en série d'une diode et d'un interrupteur qui est généralement un transistor:



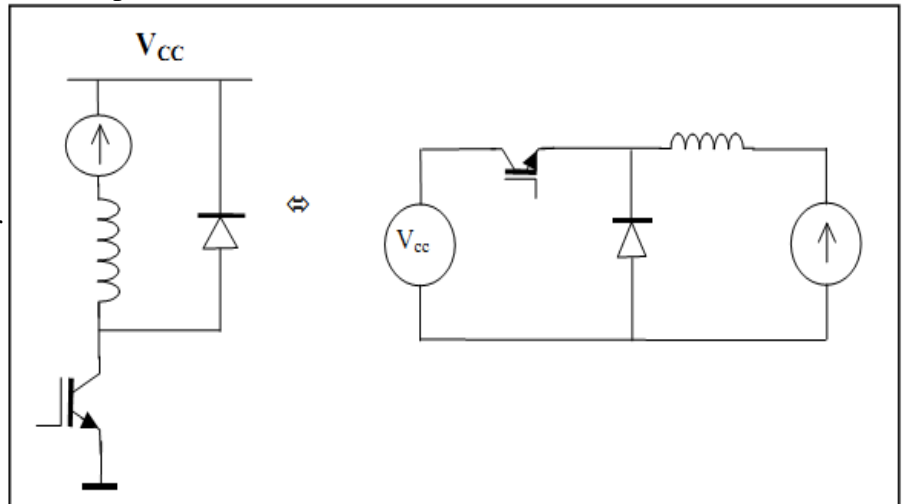
*Fonctionnement*



*Avec un transistor MOS de puissance*



Un schéma de réalisation de hacheur peut très souvent se ramener en une combinaison de un ou plusieurs hacheurs élémentaires. Ainsi, le schéma ci-contre: un montage émetteur commun fonctionnant en commutation sur charge inductive est en fait un



**Fig .II.9 Un schéma de réalisation de hacheur**

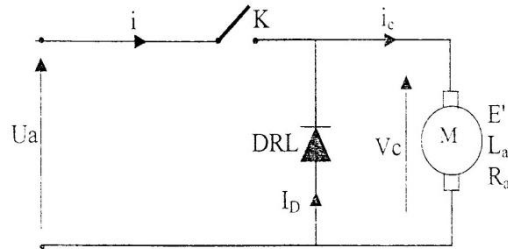
hacheur série. On peut le montrer sans difficulté en remarquant que  $V_{cc}$  est une source et que le transistor ne peut pas être traversé par des courants inverses et est donc assimilable à une soupape.

On distingue le hacheur série (dévolteur) et le hacheur parallèle (survolteur). Ces derniers, permettent le transfert de l'énergie dans un seul sens, ou les appelle hacheurs non réversibles\*. Pour permettre un transfert de l'énergie dans les deux sens, les deux hacheurs (série et parallèle) sont combinés selon différents montages pour réaliser des hacheurs réversibles. Avec ces derniers, il est possible de réaliser des freinages et des réglages de vitesse avec inversion du sens de rotation. [7]

## Hacheurs non réversibles

### II-2-2-1. Hacheur dévolteur (série)

Le schéma de principe est représenté sur la figure II-2.



**Fig. II-2 : Hacheurs série**

Un interrupteur K commandé assure une liaison directe pendant les intervalles de fermeture entre le générateur et la charge.

La diode de roue libre (DRL) sert à évacuer l'énergie emmagasinée dans l'inductance  $L_a$  du récepteur lorsque l'interrupteur K est ouvert.

Cette inductance permet de rendre le courant  $i_c$  dans la charge beaucoup moins ondulé que la tension  $V_c$ .

Soit  $t_f$  : Durée de fermeture de l'interrupteur K.

T : période de hachage.

$\alpha = t_f/T$  : rapport cyclique du hacheur .

La valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge est donnée par :

$$v_c = \frac{1}{T} \int_0^{t_f} U_a dt = \alpha U_a \dots \dots \dots (II-1)$$

La valeur moyenne du courant à l'entrée est :

$$I = \frac{t_f}{T} I_c = \alpha I_c \dots \dots \dots (II-2)$$

La valeur moyenne du courant dans la diode de roué libre:

$$I_D = \frac{T-t_f}{T} I_c = (1-\alpha) \dots \dots \dots (II-3)$$

La valeur moyenne du courant dans la charge est donnée par :

$$I_c = \frac{V_c - E'}{R_a} = \frac{\alpha U_a - E'}{R'} \dots \dots \dots (II-4)$$

Sur la figure II-3, on a représenté les allures de la tension aux bornes de la charge, du courant d'entrée, et du courant dans la diode (DRL). [8]

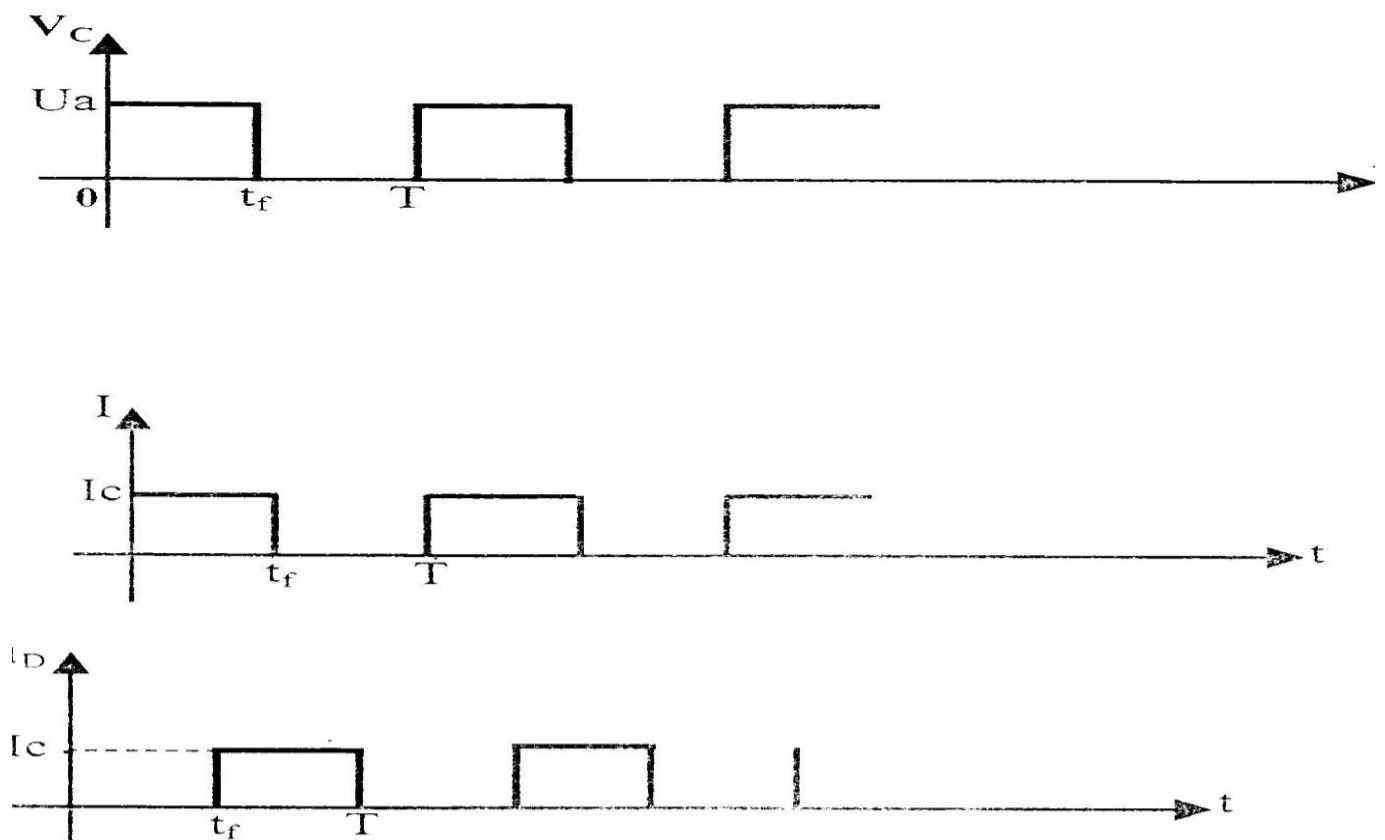


Fig. II-3: Formes d'ondes théoriques fournies par un hacheur série

**II-2-2-2. . Hacheur survolteur (parallèle) :**

Le schéma de principe est représenté sur la figure II-4.

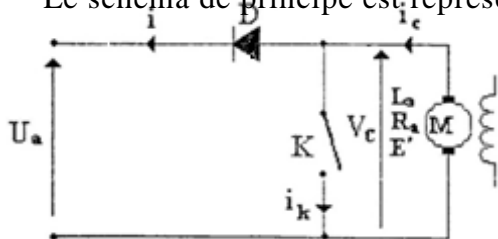


Fig. II -4 : hacheur parallèle



La valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge est donnée par :

$$V_c = (1 - \alpha) U_a \dots \dots \dots (II-5)$$

La valeur moyenne du courant dans la charge est donnée par :

$$I_c = \frac{E - V_c}{R_a} = \frac{E - (1 - \alpha) U_a}{R_a} \dots \dots \dots (II - 6)$$

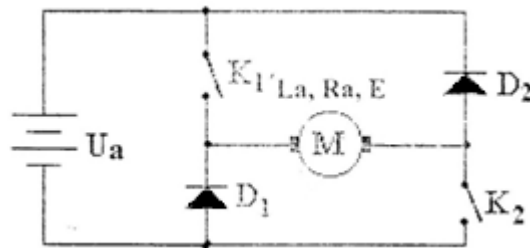
**II-2-3. Hacheurs réversibles :**

Pour transférer l'énergie d'une source  $U_a$  à une charge se présentant comme une f.c.e.m  $E'$  telle que  $E' < U_a$ , l'utilisation d'un montage du type dévolteur s'impose. Pour inverser le sens du transfert de l'énergie, il faut bien que la source  $U_a$  soit susceptible de recevoir l'énergie ; la charge  $\dot{E}$  susceptible

d'en fournir et puisque  $\dot{E} < U_a$ , la liaison électrique nécessite l'utilisation d'un hacheur survolteur. On distingue les types de réversibilités suivantes :

**II-2-3-1. Hacheur réversible en tension :**

Le schéma de principe est représenté sur la figure II-5.



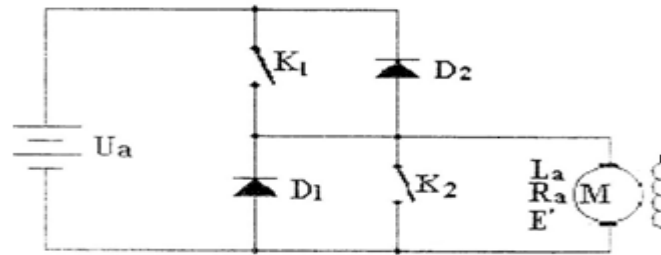
**Fig. II -5 : Hacheur réversible en tension .**

Le fonctionnement du hacheur consiste à commander simultanément les interrupteurs  $K_1$  et  $K_2$

Le sens du courant dans la charge teste le même, mais la tension  $\dot{E}$  peut varier entre  $-U_a$  et  $+U_a$ .

### II-2-3-2. Hacheur réversible en courant :

Le schéma de principe est représenté sur la figure II-6.

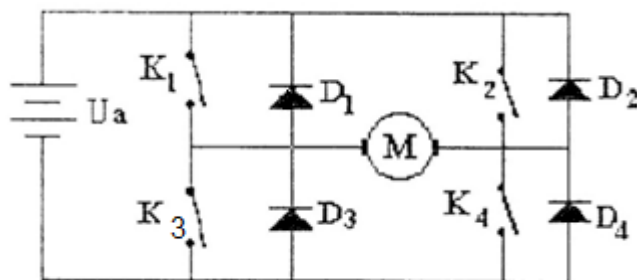


**Fig. 11-6 : Hacheur réversible en courant.**

La fermeture de  $K_1$  ( $k_2$  ouvert) correspond au fonctionnement dévolteur. la diode  $D1$  joue le rôle de DRL. La fermeture de  $k_2$  ( $K_1$  ouvert) associé à la diode  $D_{22}$  correspond au fonctionnement en survolteur. réversibilité peut s'effectuer sans discontinuité sur le courant. [8]

### II-2-3-3. Hacheur réversible en tension et en courant :

La structure se déduit immédiatement de la combinaison de deux structures précédentes.



Le schéma de principe est représenté sur la figure II-7

**Fig. II -7 Hacheur réversible en tension et en courant.**

### II-3- Hacheurs à transistors : [8]

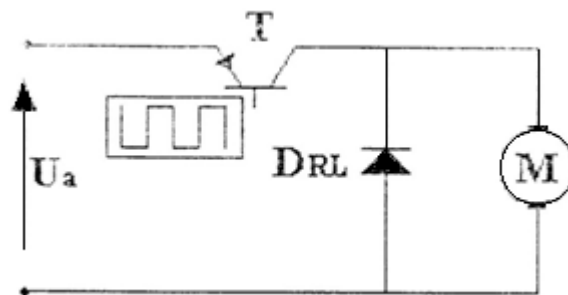
Les hacheurs à transistors sont les plus réponsus, car ils sont très simple à réaliser et à commander. Ils présentent également plusieurs avantages que nous pouvons résumer dans ce qui suit :

1)- Ils peuvent fonctionner à des fréquences relativement élevées (de l'ordre de quelques kilohertz) ce qui permet d'améliorer considérablement la dynamique des circuits de réglage.

2)- Facilité de commande, car il suffit d'appliquer un signal en créneaux à la base des transistors pour que ceux-ci travaillent en commutation (saturés ou bloqués).

3). Ils ne nécessitent pas de circuits d'extinction comme c'est le cas pour les hacheurs à thyristors.

Leurs inconvénients est la limitation en puissance (quelques Kilowatts). La figure II - 8 montre le schéma de principe de la commande unidirectionnelle

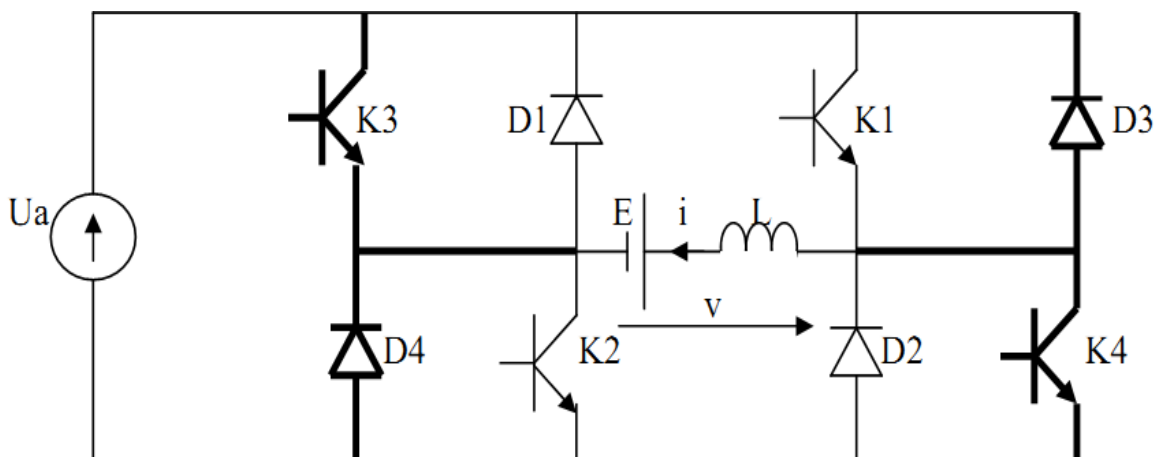


**Fig. II-8 : Hacheur à transistor.**

Le transistor T placé en série avec la source est commandé périodiquement. la valeur moyenne de la tension de sortie est variable entre 0 et  $U_a$ .

**II-4- Hacheur quatre quadrants :**

Pour obtenir une réversibilité quatre quadrants, il suffit d'associer tête bêche deux hacheurs réversibles deux quadrants (K1, K2, D1, D2) et (K3, K4, D3, D4).



## II -4-1-Deux stratégies de commande sont utilisées :

### II -4-1-1-Stratégie de commande.

Tous les interrupteurs sont commandés de la même manière quelque soit le quadrant de fonctionnement.  $K1 = K2 = K3 = K4$ .

$K1$  et  $K2$  sont commandés à la fermeture de  $0$  à  $\alpha T$  alors que  $K3$  et  $K4$  sont ouverts,  $K3$  et  $K4$  sont commandés à la fermeture de  $\alpha T$  à  $T$  alors que  $K1$  et  $K2$  sont ouverts, C'est le sens du courant  $i$  qui détermine les composants actifs. Par exemple si  $K3$  est, commandé à la fermeture avec  $i > 0$ , c'est  $D1$  qui conduira. Mais si  $K3$  est commandé à la , fermeture avec  $i < 0$ , c'est  $K3$  qui sera traversé par le courant  $i$ , Exemples d'états des composants en fonction du sens de courant  $i$  :

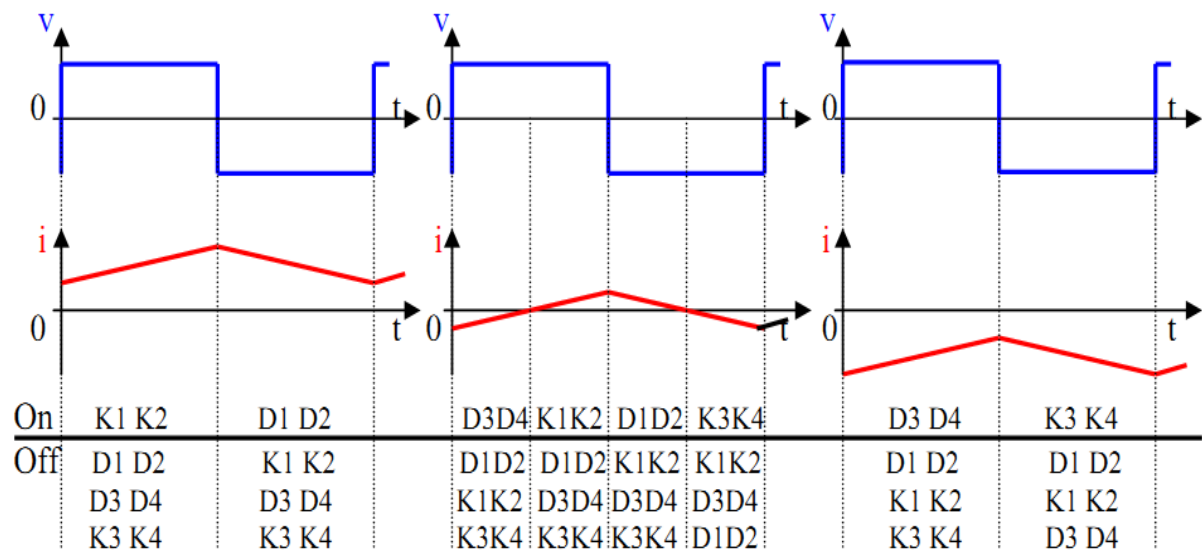


Fig. II.18 Stratégie de commande.

### Remarques :

$\alpha T$  correspond au temps de conduction de  $K1$  et  $K2$ , au temps de blocage de  $K3$  et  $K4$ , Comme les formes d'ondes sont identiques à celles du hacheur deux quadrants la tension ( $v$ ), est de même expression :  $(v) = U_a.(2\alpha-1)$ , Quelque soit le quadrant le hacheur contrôle la tension et le courant dans la charge.

## 2° Stratégie de commande :

K1 fonctionne à la fréquence de hachage alors que K2 est fermé en permanence si on souhaite une tension moyenne positive en sortie (K3 et K4 sont bloqués).

K3 fonctionne à la fréquence de hachage alors que K4 est fermé en permanence si on souhaite une tension moyenne négative en sortie (K1 et K2 sont bloqués). [8]

### Remarque :

$\alpha T$  correspond au temps de conduction de K1 pour  $(v) > 0$  et au temps de conduction de K3 pour  $(v) < 0$ .

Alors  $(v) = \alpha U_a$  si  $K2 = 1$  et  $(v) = -\alpha U_a$  si  $K4 = 1$ .

Formes d'ondes pour  $(v) > 0$  et  $i < 0$  :

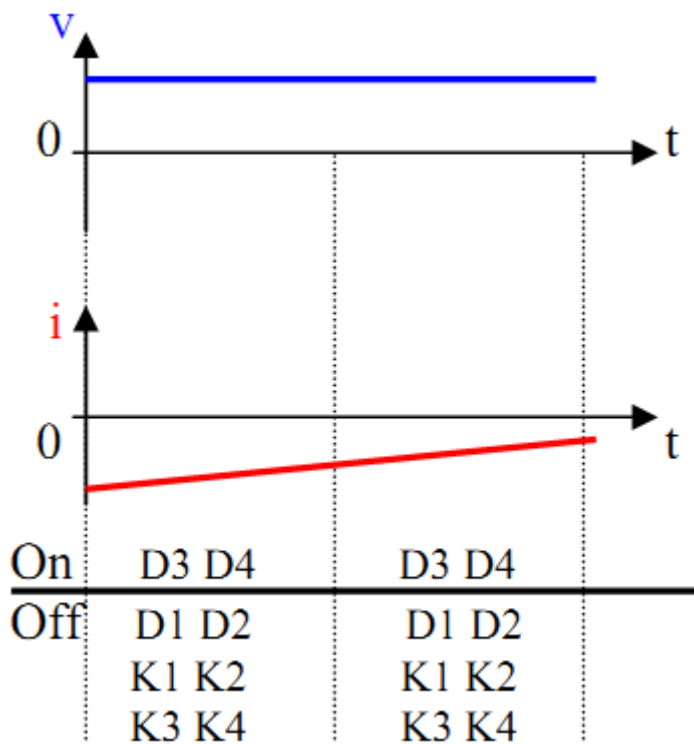


Fig. II.19 Stratégie de commande

pour  $(v) < 0$  et  $i > 0$  :

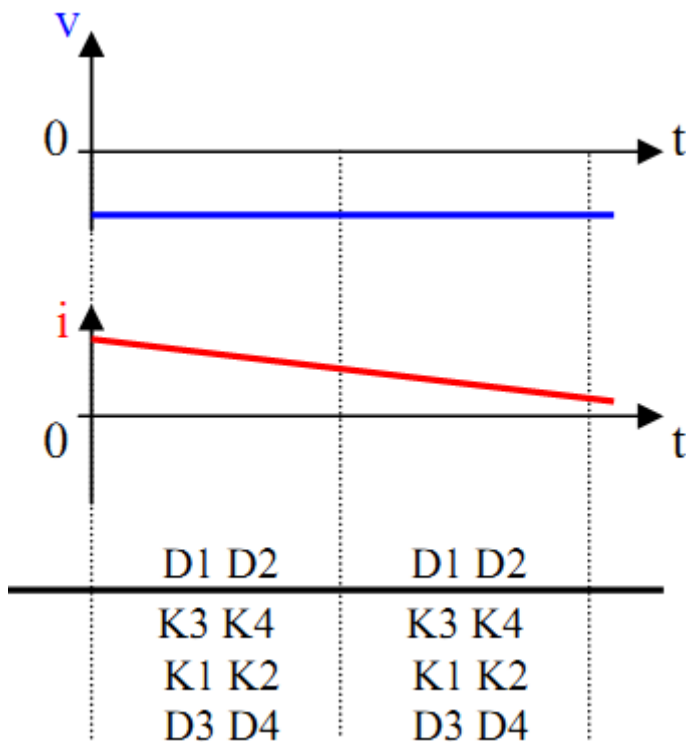
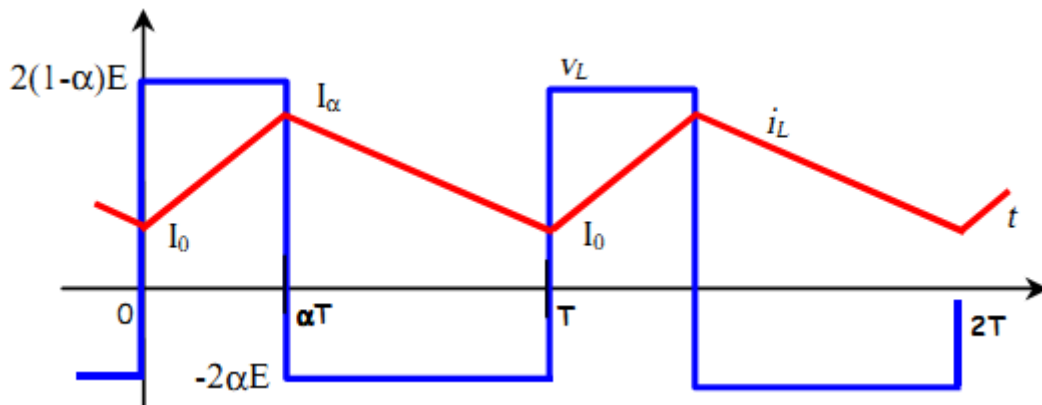


Fig. II.20. Stratégie de commande

### II -4-1-2- Caractéristique statique de commande:

Dans le régime DNI, on a  $\alpha = \alpha_c = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{E_2}{E_1} \right)$  On obtient  $E_2 = (2\alpha - 1)E_1$ .

Etude de la bobine:



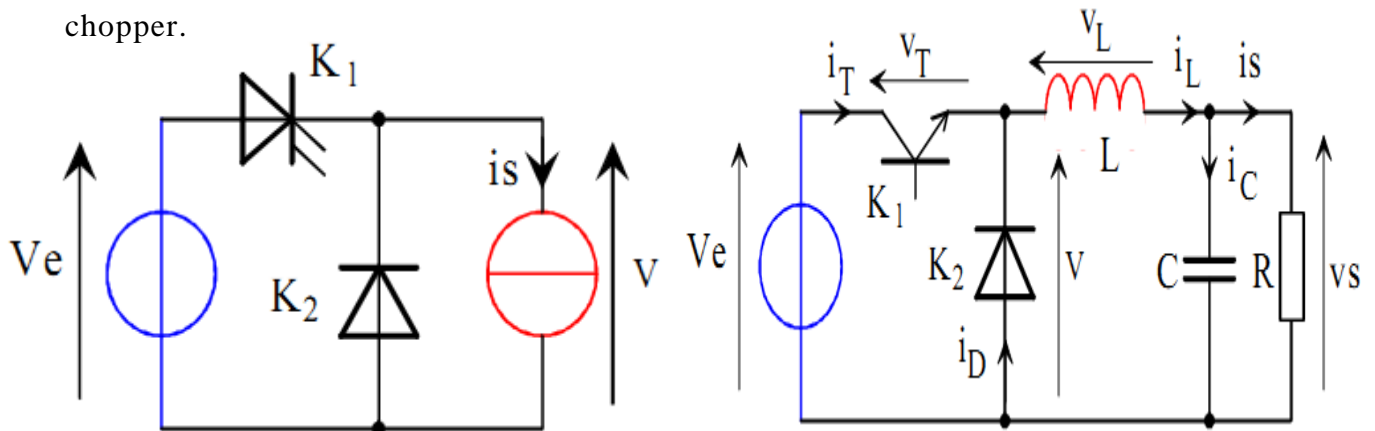
L'ondulation de courant dans l'inductance vaut

$$\Delta I_L = I_\alpha - I_0 = \frac{E_1 - E_2}{L} \Delta t = 2\alpha(1-\alpha) \frac{E_1}{Lf} \text{ avec } f = \frac{1}{T}$$

## II -5-1-Cas du hacheur de type BUCK

### II -5-1-1-Définition

Hacheur abaisseur, hacheur dévolteur, hacheur série, hacheur de type BUCK, buck chopper.



**Fig. 9.1. La fonction hacheur BUCK (dessins\h\_serie1.drw).**

Le hacheur série est un convertisseur direct DC–DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant.

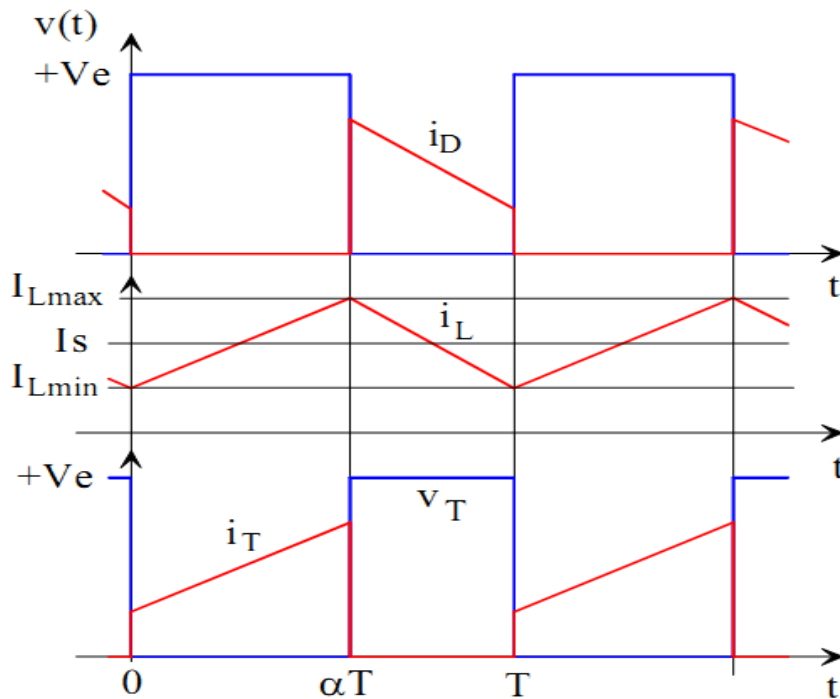
L'interrupteur K1 peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

### Fonctionnement

L'interrupteur K1 est fermé pendant la fraction  $\alpha T$  de la période de découpage T. La source d'entrée fournit l'énergie à la charge R au travers de l'inductance L. Lors du blocage du transistor, la diode K2 assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie emmagasinée dans cette inductance est alors déchargée dans le condensateur et la résistance de charge. Les formes d'ondes en conduction continue sont représentées à la figure 9.2. En régime permanent, la valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle. La tension de sortie est donnée par la relation suivante

$$V_s = (V_s) = (V - V_l) = (V) = \alpha \times V_e$$

Par définition,  $0 \leq a \leq 1$ , ce qui induit que le montage est abaisseur de tension (dévolteur). [9]

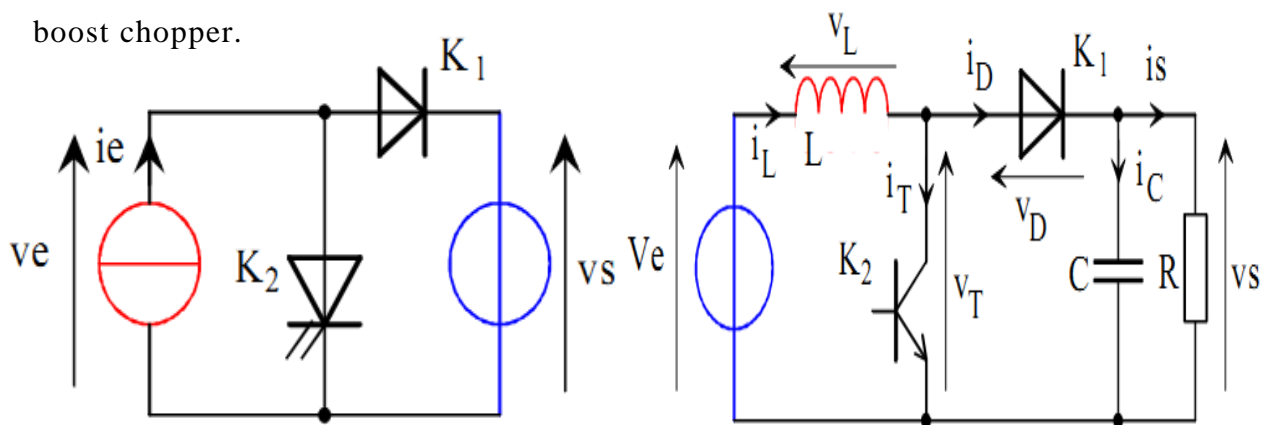


**Formes d'ondes du hacheur de type BUCK**  
(dessns\h\_serie1.draw).

## II -6-1-Cas du hacheur de type BOOST

### II -6-1-1-Définition

Hacheur élévateur, hacheur survolteur, hacheur parallèle, hacheur de type BOOST, boost chopper.



### La fonction hacheur BOOST (dessins\boost7.draw).

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K1



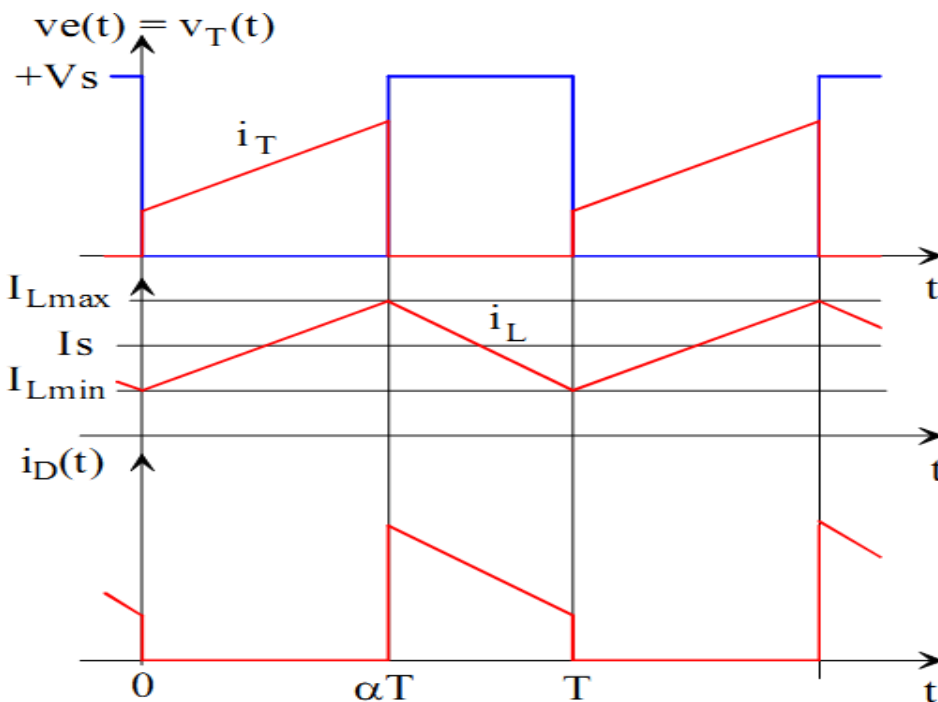
peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

## Fonctionnement

L'interrupteur K1 est fermé pendant la fraction  $\alpha T$  de la période de découpage  $T$ . La source d'entrée fournit l'énergie à la charge  $R$  au travers de l'inductance  $L$ . Lors du blocage du transistor, la diode K2 assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie emmagasinée dans cette inductance est alors déchargée dans le condensateur et la résistance de charge. Les formes d'ondes en conduction continue sont représentées à la figure 9.10. En régime permanent, la valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle, ce qui impose la relation suivante :

$$V_e = (V_e) = (V_t) = (1-\alpha) \times V_s \text{ soit } V_s = V_e \times \frac{1}{1-\alpha}$$

Par définition,  $0 \leq \alpha \leq 1$ , ce qui induit que le montage est élévateur de tension (survolteur).



Formes d'ondes du hacheur de type BOOST (dessins\boost7.drw).

## II -7-1-Cas du hacheur de type BUCK-BOOST :

### II -7-1-1-Définition :

Hacheur inverseur, dévolteur-survolteur, de type BUCK-BOOST, buck-boost chopper, inverter chopper.

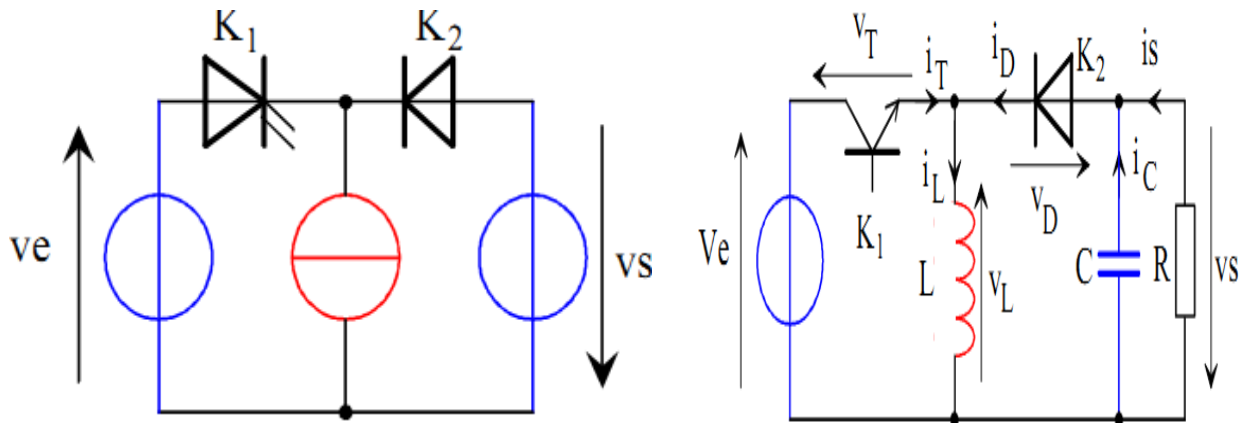


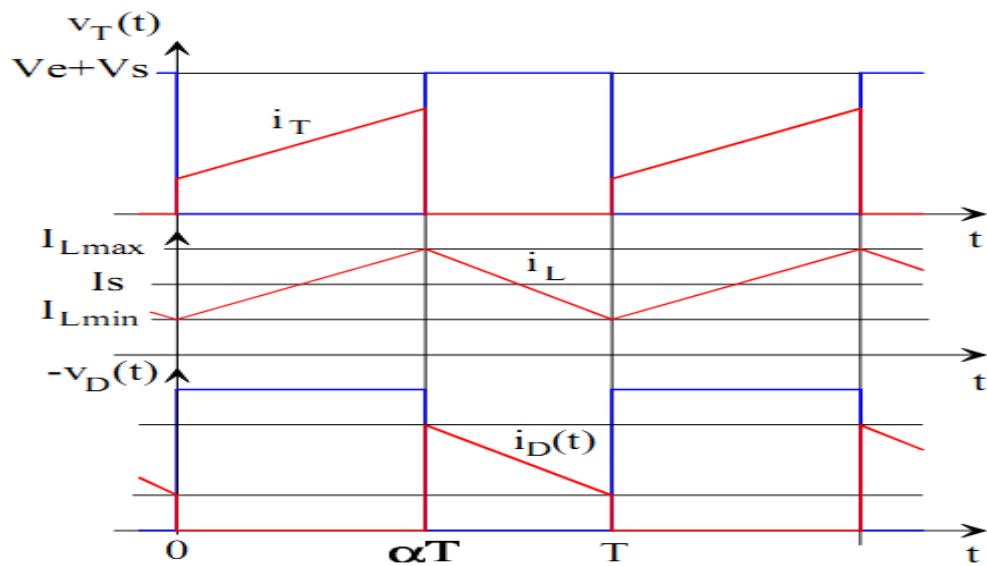
Figure II.20. La fonction hacheur inverseur (dessins\buckboo1.drw).

Le hacheur inverseur est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K1 peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

### Fonctionnement

L'interrupteur K1 est fermé pendant la fraction  $\alpha T$  de la période de découpage T. La source d'entrée fournit l'énergie à l'inductance L. La charge est déconnecté du montage (diode K2 bloquée). Lors du blocage du transistor, la diode K2 assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie emmagasinée dans cette inductance est alors déchargée dans le condensateur et la résistance de charge. Les formes d'ondes en conduction continue sont représentée à la figure 9.2. En régime permanent, la valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle, ce qui impose la relation suivante :  $V_s = V_e \frac{\alpha}{1-\alpha}$

Par définition,  $0 \leq \alpha \leq 1$ , ce qui induit que le montage est abaisseur ET élévateur de tension (négative). [9]



**Formes d'ondes du hacheur BUCK-BOOST (dessins\buckboo1.drw).**

## conclusion

Avec le développement des transistors de puissance et la possibilité qu'ils offrent pour la montée en fréquence, les hacheurs à transistors trouvent largement leur emploi dans les entraînements réglés. L'inconvénient majeur qui est la limitation en puissance restreint leur emploi à des petites puissances (quelques Kilowatts).



# **CHAPITRE III :**

# **Simulation**

### III.1- INTRODUCTION

La simulation est une forme particulière de l'expérience ou l'expérimentation n'agit pas sur le processus réel mais sur une représentation ( modèle ) des constituants physiques on emploie couramment trois représentations des modèles.

- 1- les équations différentielles,
- 2- les schémas fonctionnels,
- 3- les schémas de fluence des signaux,

les schémas fonctionnels et les schémas de fluence des signaux constituent des représentations graphiques abrégées soit du diagramme schématique représentant le système physique, soit de l'ensemble des équations mathématiques qui caractérisent les éléments du système.

donc la simulation permet de ramener l'étude des systèmes réels à une étude mathématique ou graphique.

### III.2- MATLAB/Simulink

Compte tenu des possibilités offertes en matière de modélisation et de simulation des systèmes mixtes (continus et discrets) et la simplicité d'implantation des modèles (linéaires et non linéaires) grâce à son interface graphique, ainsi que la possibilité d'échange de données entre simulink et l'espace de travail Matlab, dans lequel le système modélisé sous Simulink peut recevoir des données de l'espace de travail ou y envoyer des données de sortie. Les études en simulation présentées dans ce travail ont été menées par Matlab/Simulink<sup>TM</sup>. [10]

Simulink est donc un programme additionnel à matlab pour la modélisation et la simulation des systèmes dynamiques continus et discrets. Il offre de nombreux outils, spécifiques aux systèmes dynamiques, tout en conservant la puissance et les fonctionnalités de Matlab.

le programme Simulink procède en deux étapes. Dans la première, le système à étudier est défini par un modèle mathématique développé à cet effet, soit dans le domaine temporel ou par sa fonction de transfert, puis ce modèle élaboré est alors introduit dans le programme sous formes de blocs. Alors que la deuxième phase consiste à l'analyse du

comportement du système précédemment défini après avoir spécifié les paramètres de simulation. Simulink possède une bibliothèque de modèles déjà prédéfinis, qui peuvent être facilement modifiés et introduits dans de nouveaux modèles à analyser. [11]

### III.3-FONCTION DE TRANSFERT DU MOTEUR A COURANT CONTINU

L'ensemble moteur –charge est réalisable à partir des équations de base de la machine à courant continu et du principe fondamental de la dynamique .

#### III.3.1-Fonction de transfert de la Partie électrique(équations électriques)

La tension d'induit du moteur est égale :

$$U_d = E + R_a I_d + L_a \frac{dI_d}{dt} \quad (\text{III-1})$$

Après la transformation de *Laplace* :

$$U_d(S) = E(S) + (R_a + L_a S)I_d(S) \quad (\text{III-2})$$

$$I_d(S) = \frac{U_d(S) - E(S)}{R_a + L_a S} \quad (\text{III-3}) \text{ La}$$

fonction de transfert de la partie électrique est écrite comme suite :

$$G_1(S) = \frac{I_d(S)}{U_d(S) - E(S)} = \frac{1/R_a}{1 + \frac{L_a}{R_a} S} \quad (\text{III-4})$$

#### III.3.2- Fonction de transfert de la Partie mécanique (équations mécaniques)

Ce calcul est généralement réalisé à partir de principe fondamental de la dynamique appliqué en rotation :

$$C_m - C_r = J \frac{dw}{dt} \quad (\text{III-5}) \text{ Après}$$

la transformation de *Laplace* :

$$C_m(S) - C_r(S) = J.S.w(S) \quad (\text{III-6})$$

Et d'autre part :

$$C_m = K' \cdot \phi \cdot I_d = K I_d \quad (\text{III-7})$$

$$E = K' \cdot \phi \cdot w = K \cdot w \quad (\text{III-8})$$

où :

$$K = K' \phi$$

On a:

$$w(S) = \frac{C_m(S) - C_r(S)}{JS} \quad (\text{III-9})$$

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

$$G_2(S) = \frac{w(S)}{C_m(S) - C_r(S)} = \frac{1}{JS} \quad (\text{III-10})$$

### III.3.3-Calcul des paramètres statiques du moteur

#### III.3.3.1-Coefficients de transfert du moteur

En régime permanent l'équation (III-1 ), devienne :

$$U_d = E + R_a I_d \quad (\text{III-11})$$

Et on remplace l'équation (IV-8) dans l'équation (IV-11), alors :

$$U_d = K.w + R_a I_d \Rightarrow K = \frac{U_d - R_a I_d}{w} \quad (\text{III-12})$$

**A.N:**

$$K = \frac{220 - 16.4}{209.3} \Rightarrow K = 0.9667 \text{ v.s/rad}$$

**Coefficient électromécanique:**

$$K_m = 1 / K \quad (\text{III-13})$$

$$K_m = 1 / 0.9667 \Rightarrow K_m = 1.0343 \text{ rad/v.s}$$

#### III.3.3.2- Constante de temps électrique du moteur

De l'équation (III-4) on a :

$$G_1(S) = \frac{1/R_a}{1 + \frac{L_a}{R_a} S}$$

Avec :  $T_e = \frac{L_a}{R_a}$  : constante de temps électrique.

Tel que :  $L_a = \delta \frac{U_{dn}}{P_p \cdot \omega_n \cdot I_{dn}}$

**A.N**

$$L_a = 0.25 \frac{220}{2 * 209.33 * 2.2}$$

$$L_a = 0.0597 \text{ H}$$

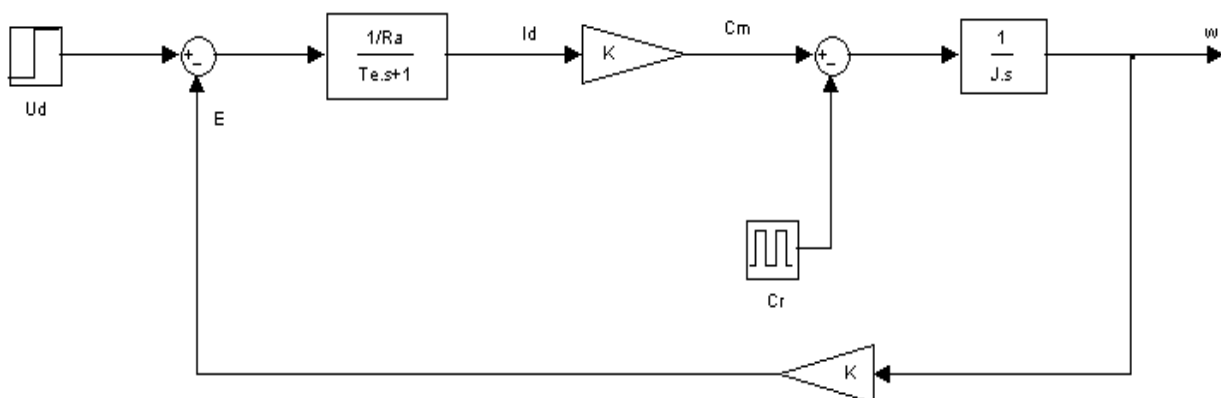
D'où :  $G_1(S) = \frac{1/R_a}{1+T_e S}$  (III-14)

**A.N :**

$$T_e = \frac{59.71 * 10^{-3}}{8} \Rightarrow T_e = 0.00746 \text{ s}$$

### III.3.4-Schéma bloc du moteur

En introduisant les fonctions de transfert des différentes parties du moteur on obtient le schéma structural de la figure (IV-1)



**Figure (III-1) : Schéma bloc du moteur à courant continu**



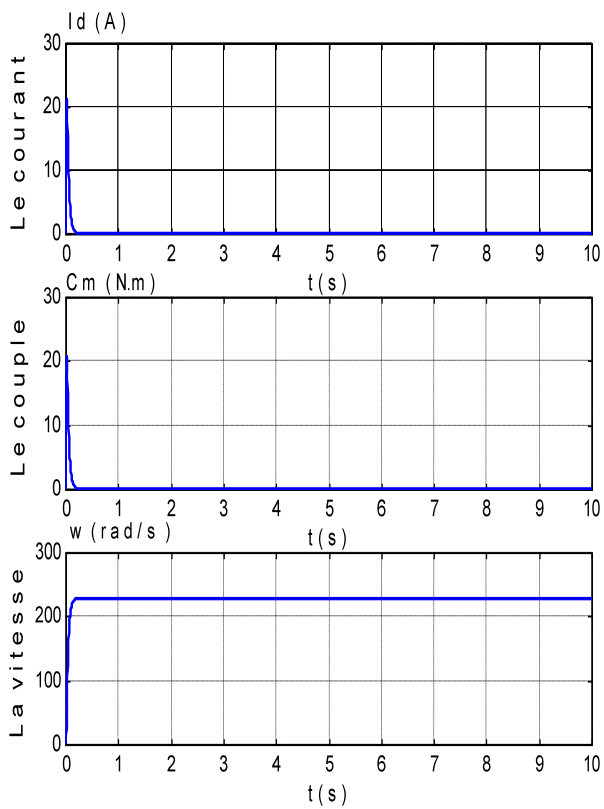


Figure (III-2) : Marche à vide

( $U_d=220$  v,  $C_r=0$ )

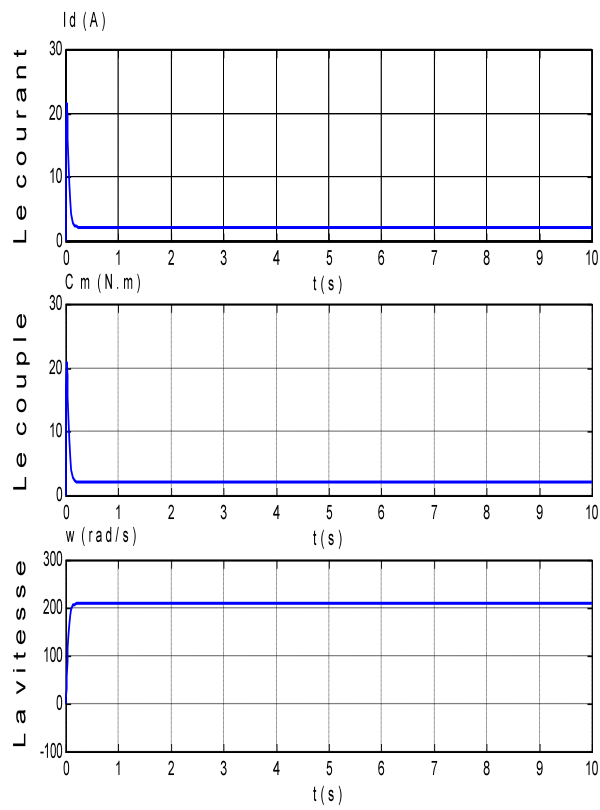
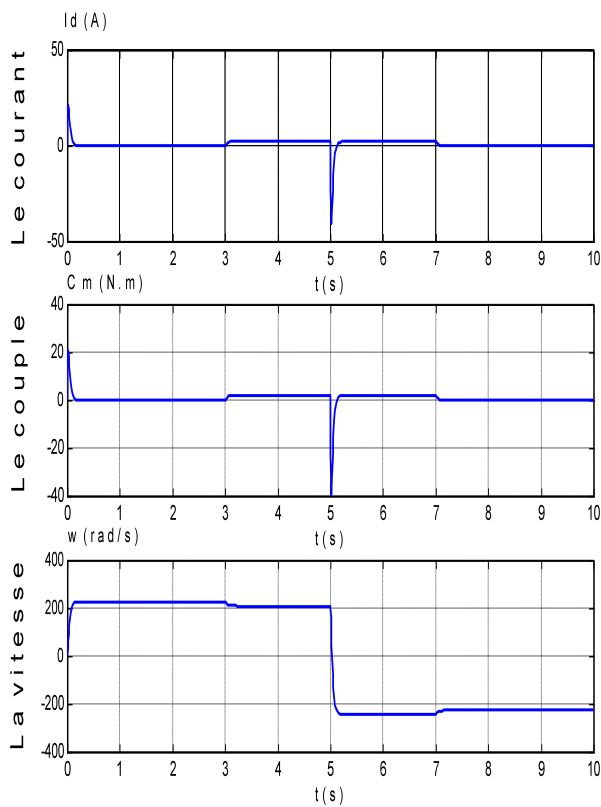
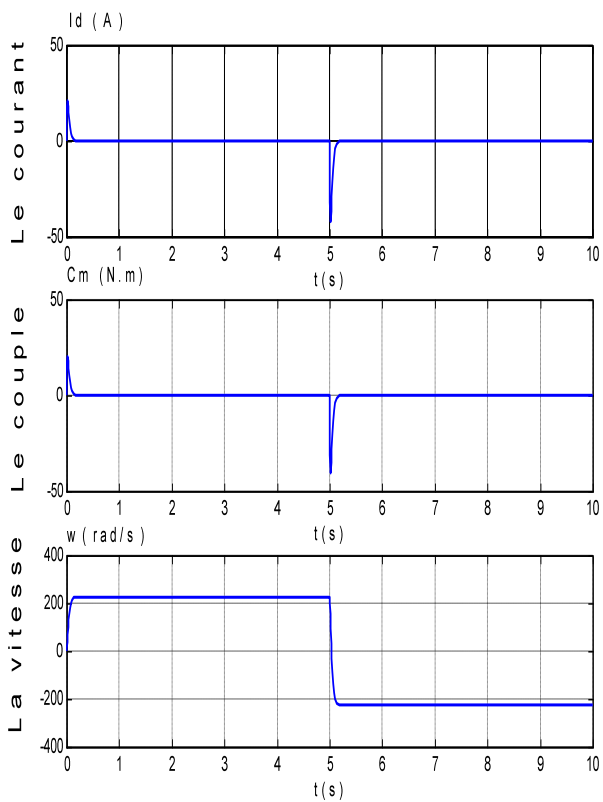
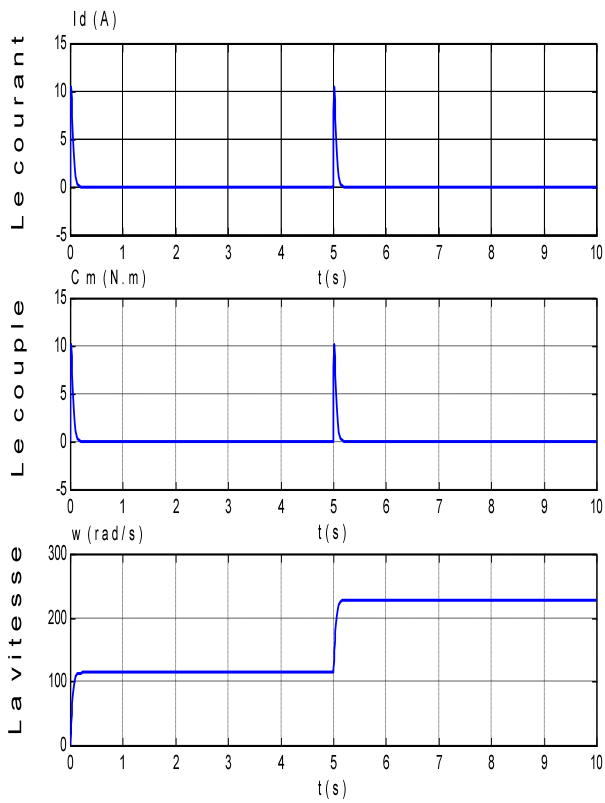


Figure (III-3) : Marche en charge

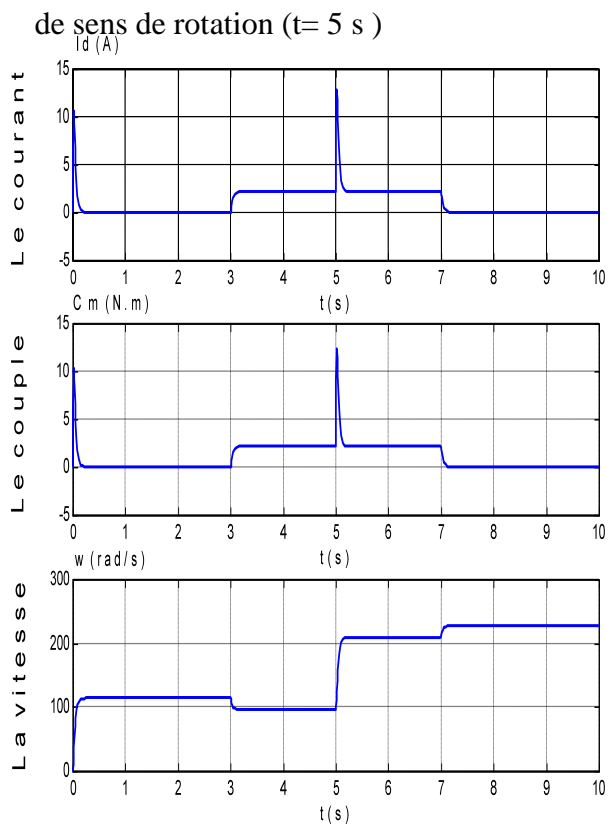
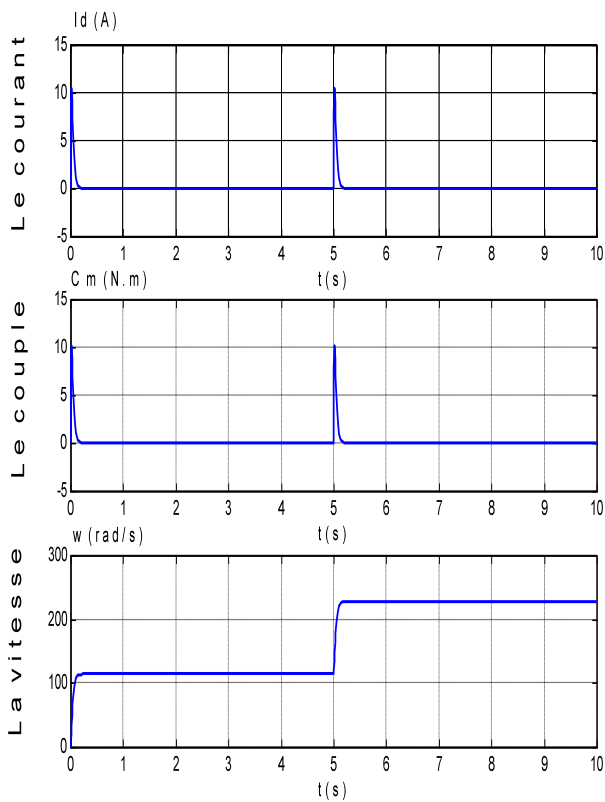
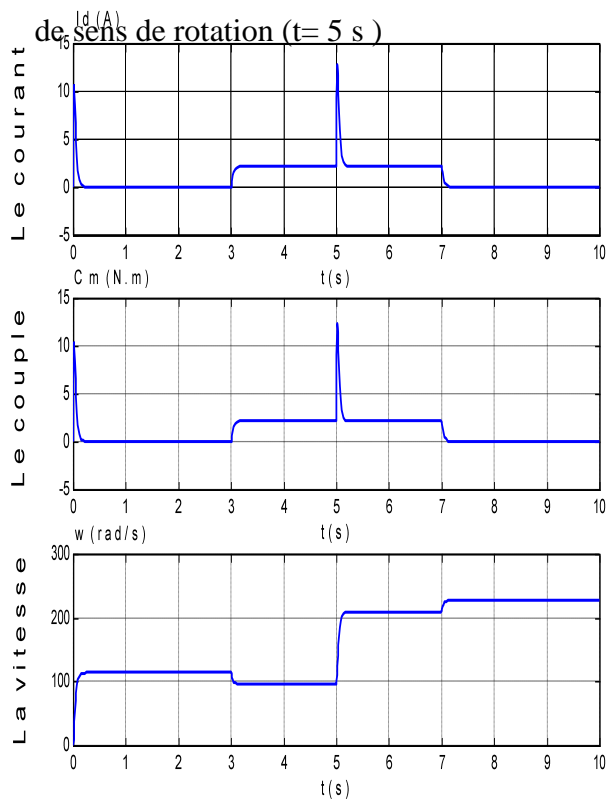
( $U_d=220$  v ,  $C_r=2.127$  N.m)



**Figure(III-4) :** marche à vide, avec changement de sens de rotation (à  $t=5$  s)

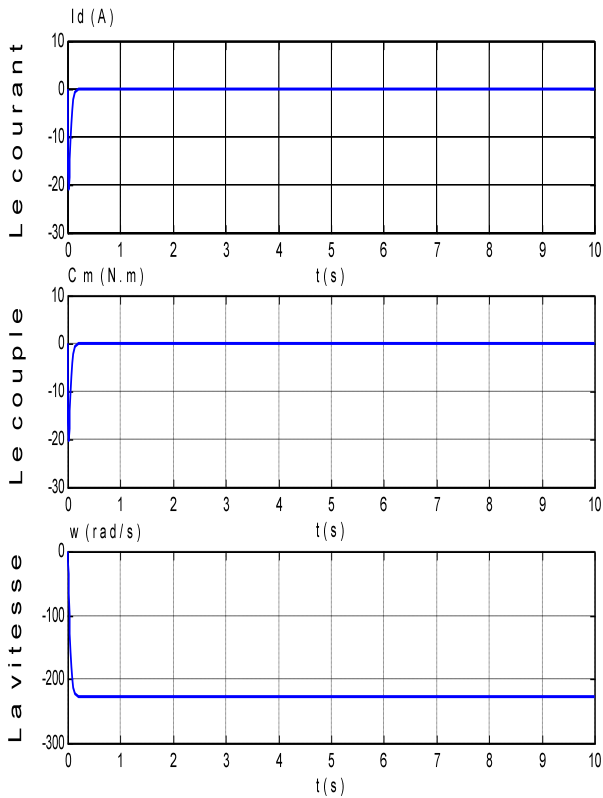


**Figure(III-5) :** Marche à vide, puis en charge ( $t=3$  s à  $t=7$  s) avec changement de sens de rotation ( $t=5$  s)



**Figure (III-6) :** Marche à vide ( $U_d=110$  v),

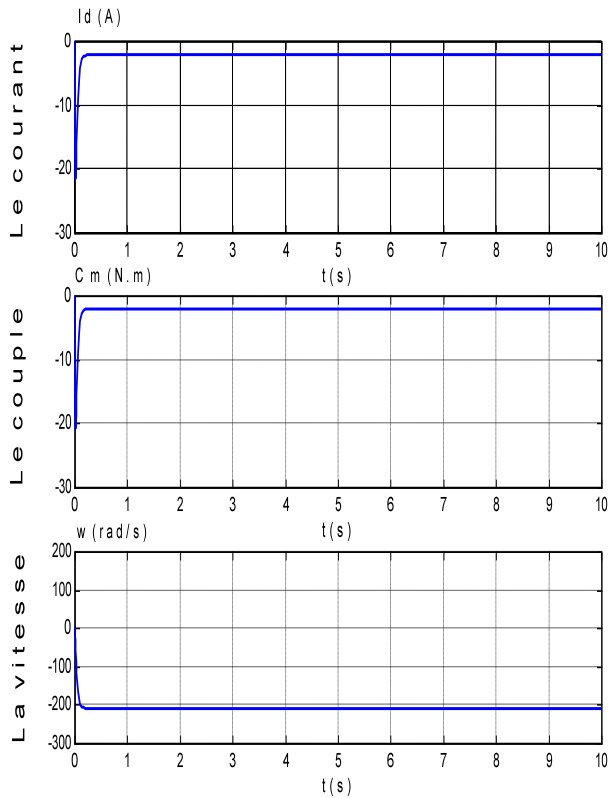
Puis à  $t=5$  s, ( $U_d=220$  v) .



**Figure (III-7) :** Marche à vide  $U_d=110$ v

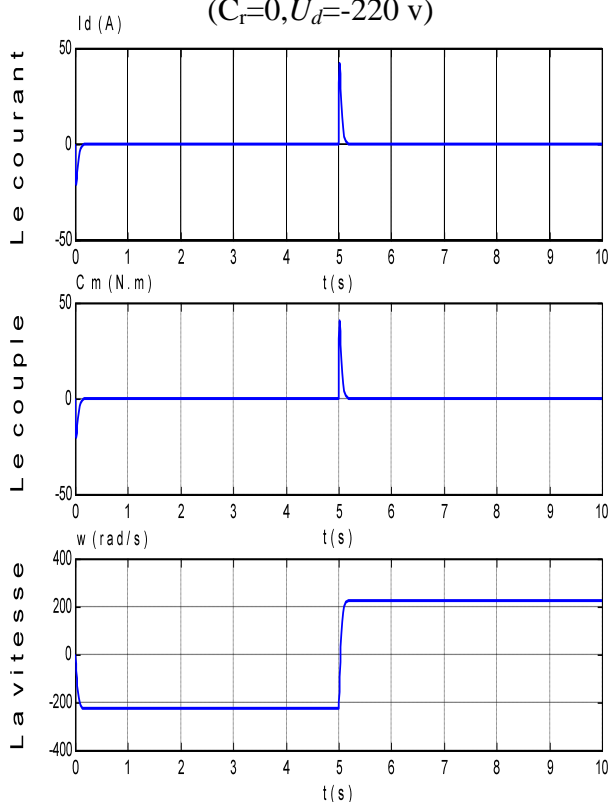
puis en charge ( $C_r=2.127$ N.m,  $t=3$  s à

$t=7$  s), et à  $t=5$  s, ( $U_d=220$  v).



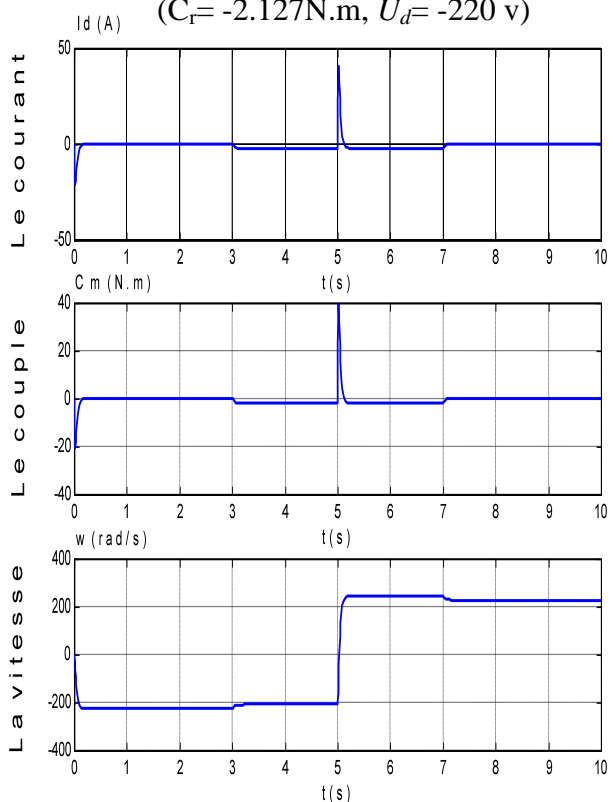
**Figure (III-8) :** Marche à vide

( $C_r=0, U_d=-220$  v)



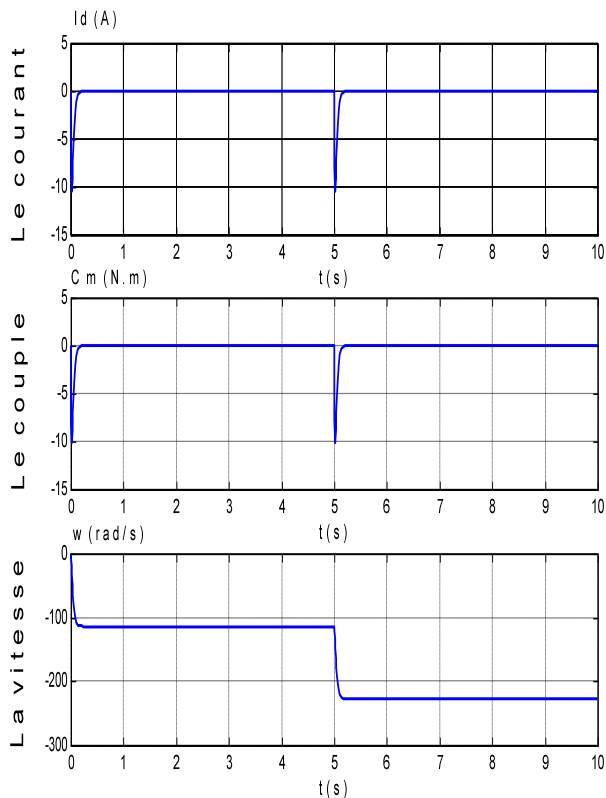
**Figure (III-9) :** Marche en charge

( $C_r= -2.127$ N.m,  $U_d= -220$  v)



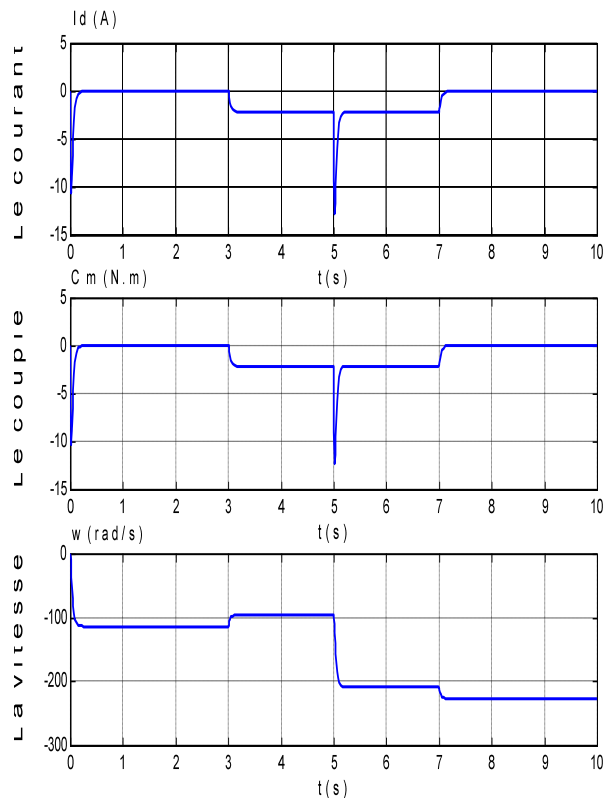
**Figure (III-10):** Marche à vide avec

( $U_d=-220\text{v}$ ) Changement de sens  
de rotation à  $t= 5 \text{ s}$



**Figure (III-11):** Marche à vide( $U_d=-220\text{v}$ )

puis en charge ( $t=3 \text{ s}$  à  $t=7 \text{ s}$ ),avec  
changement de sens de rotaion  $t=5 \text{ s}$



**Figure (III -12):** Marche à vide  $U_d=-110\text{v}$ ,

puis à  $t = 5 \text{ s}$  ,  $U_d = - 220 \text{ v}$ .

**Figure (III-13):** Marche à vide  $U_d=-110\text{v}$

puis en charge ( $C_r=-2.127\text{N.m}$  ,  $t=3 \text{ s}$  à  
 $t=7 \text{ s}$ ) avec changement de vitesse

( $t=5 \text{ s}$ ,  $U_d=-220 \text{ v}$ )

## III.4- MODELISATION DE CONVERTISSEUR

### III.4.1- Introduction.

Lors de l'alimentation de l'induit d'une machine à courant continu, les convertisseurs généralement utilisés sont de type hacheur ou pont à thyristors. Ils sont généralement assimilés en première approche à un gain constant. On dit alors qu'on utilise un modèle à valeur moyenne instantanée, c'est-à-dire que l'on assimile la tension de sortie sur une période de fonctionnement du convertisseur à sa valeur moyenne. Un tel type de modélisation est satisfaisant si le circuit alimenté par cette source de tension présente une constante de temps relativement grande devant la période de

fonctionnement du convertisseur. Dans le cas contraire, il faut rechercher une modélisation rendant compte du fonctionnement échantillonné du convertisseur, ainsi que des retards pouvant être introduit par le mode de commande. [12]

### III.4.2-Fonction de transfert du convertisseur

Le fonctionnement discontinu d'un convertisseur statique provoque. Lors de phénomène transitoire de réglage, d'un certain retard de la tension de sortie par rapport au signal de commande, le convertisseur statique avec le dispositif de commande est en général décrit approximativement par une fonction de transfert de la forme [13]:

$$G_{con}(S) = \frac{K_{cm}}{1 + T_{cm}S} \quad (\text{III-15})$$

$K_{cm}$  : coefficient d'amplification du convertisseur

Le facteur de transfert  $K_{cm}$  est donné par la caractéristique statique :

$$K_{cm} = \frac{\Delta U_d}{\Delta U_{cm}} \quad (\text{III-16})$$

$\Delta U_d$  : La différence entre deux valeurs voisine de la tension redressée  $U_d$  représenté en fonction de  $\alpha$

$\Delta U_{cm}$  : La différence entre deux valeurs voisine de la tension de la commande, ces valeurs correspondent à celle de la tension redressée.

$T_{cm} = \frac{T_p}{2P}$  : Le rapport de période  $T_p$  par le nombre de pulsation de commande (en pont triphasé  $P = 6$ ).

#### Calcul de $T_{cm}$ , $K_{cm}$

**Pour  $T_{cm}$  :** on a un pont triphasé c-à-d  $P = 6$

donc : 
$$T_{cm} = \frac{T}{2P} = \frac{1}{2Pf} \quad (\text{III-17})$$

**A.N :**

$$T_{cm} = \frac{1}{2 * 6 * 50} \Rightarrow T_{cm} = 0.00167 \text{ s}$$

$$T_{cm} = 1.67 * 10^{-3} \text{ s}$$

**Pour  $K_{cm}$  :**

Calcule des caractéristiques.

On construit les courbes :  $U_d = f(\alpha)$  ;  $U_d = f(U_{cm})$  .A partir du tableau suivant :

<i>n</i>		.33	7		3	7	
	20	212.5	190.53	155.56		94	

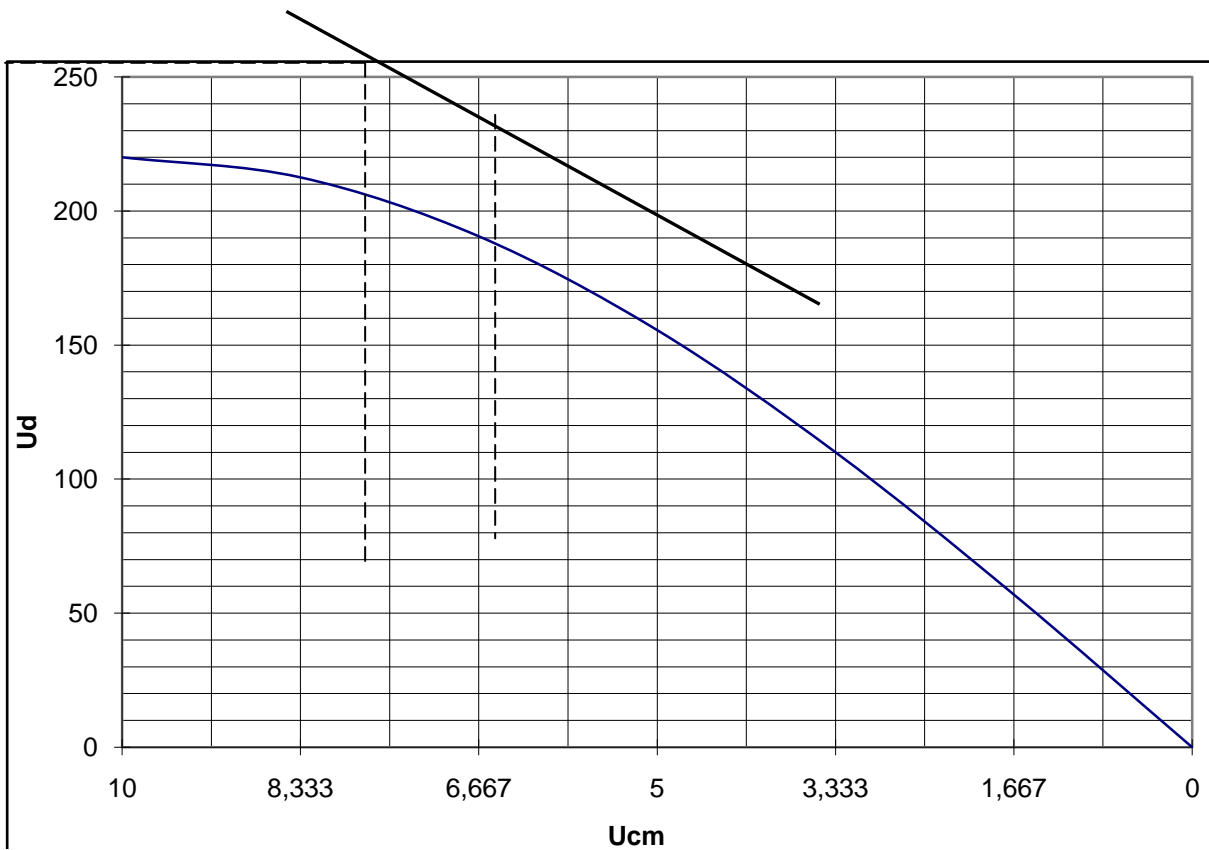


Figure (III-14) : La caractéristique de réglage

$$K_{cm} = \frac{U_{d_2} - U_{d_1}}{U_{c_2} - U_{c_1}} = \frac{183.3 - 150}{6.25 - 4.74} \approx 22$$

### III.4.3- Schéma bloc de l'ensemble convertisseur-moteur

Nous représentant ci-dessous le schéma fonctionnel de l'association convertisseur statique moteur à courant continu :

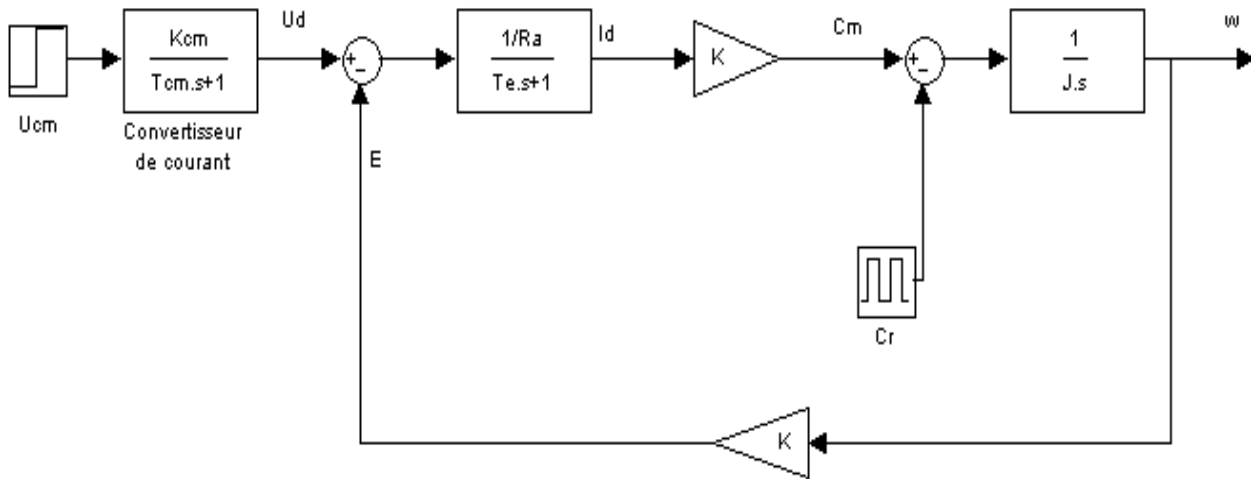
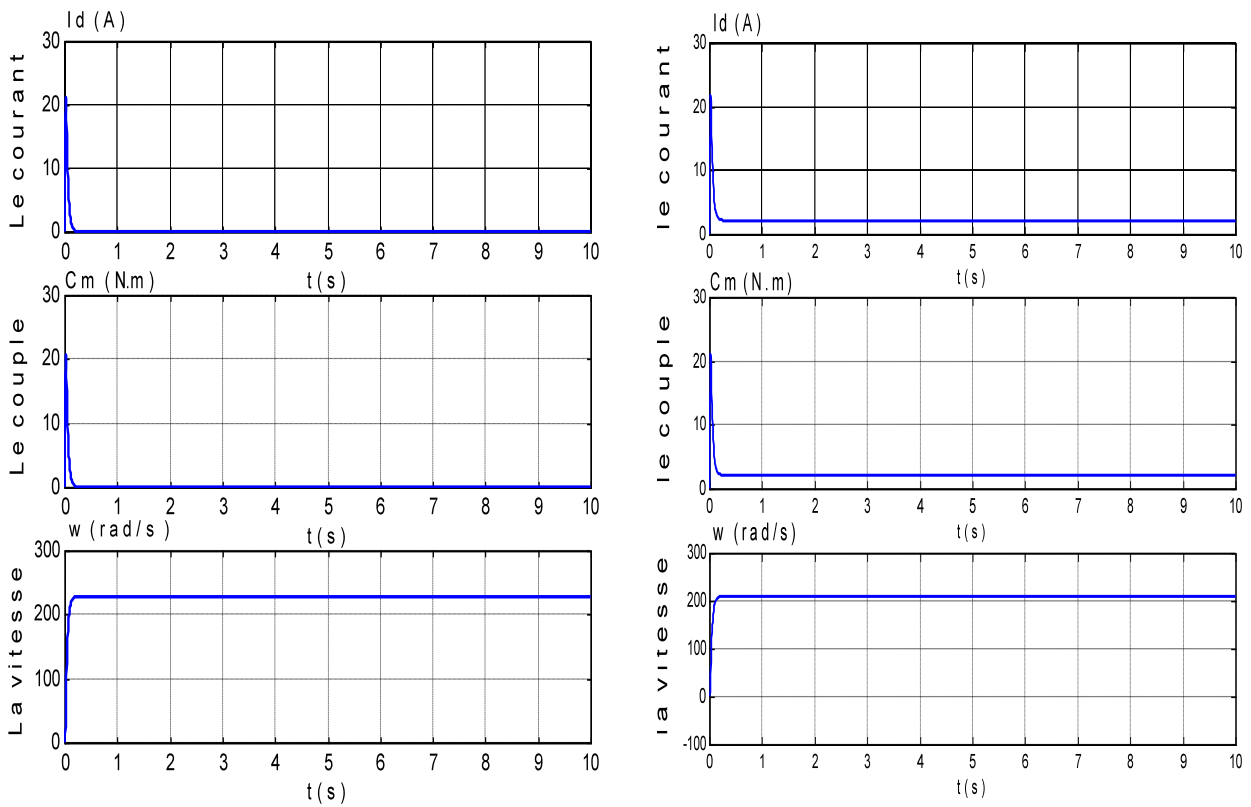
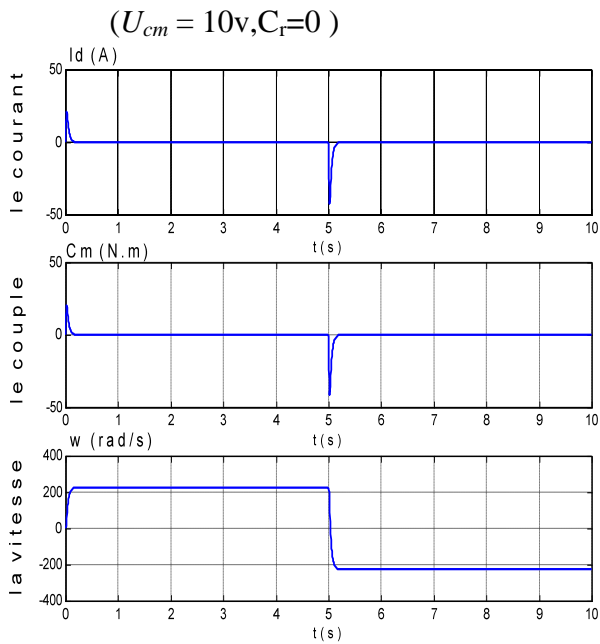


Figure (III- 15) : schéma de bloc de l'ensemble moteur -convertisseur

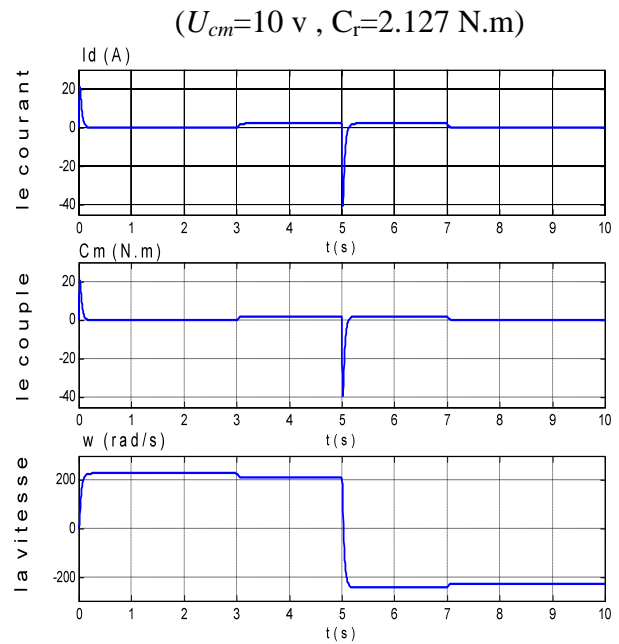




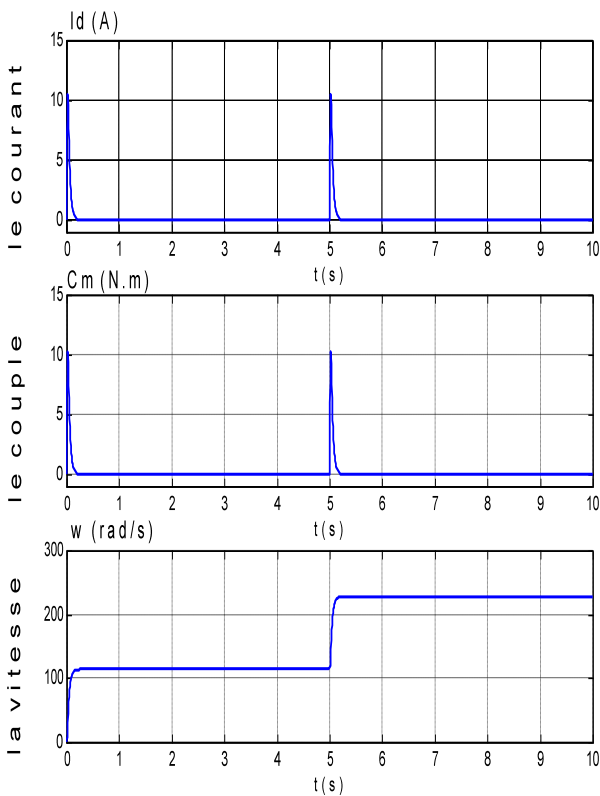
**Figure (III-16) : Marche à vide**



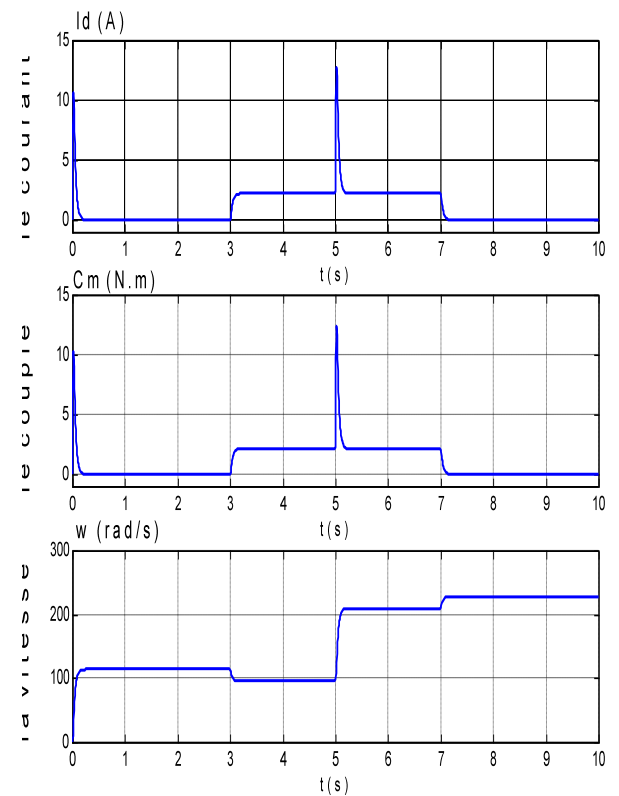
**Figure (III-17) : Marche en charge**



**Figure(III-18) :marche à vide,avec  
changement de sens de rotation (à  $t=5$  s)**

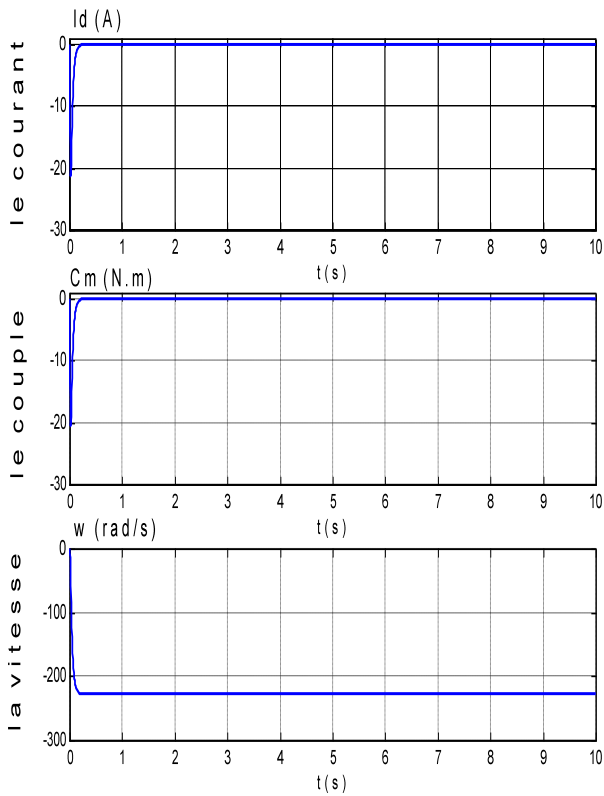


**Figure(III-19) : Marche à vide,puis en  
charge ( $t=3$  s à  $t=7$  s)avec changement  
de sens de rotation ( $t= 5$  s )**



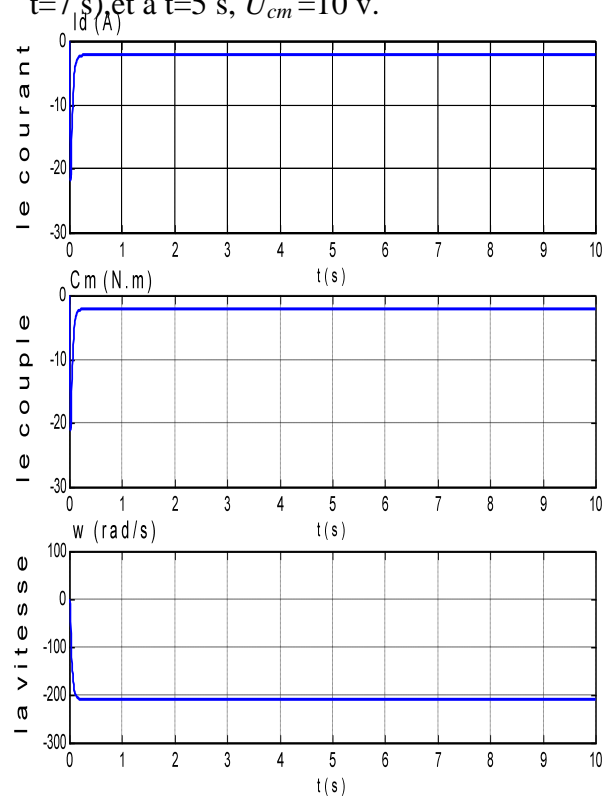
**Figure (III-20) :** Marche à vide ( $U_{cm}=5$  v),

Puis à  $t=5$  s,  $U_{cm} = 10$  v .



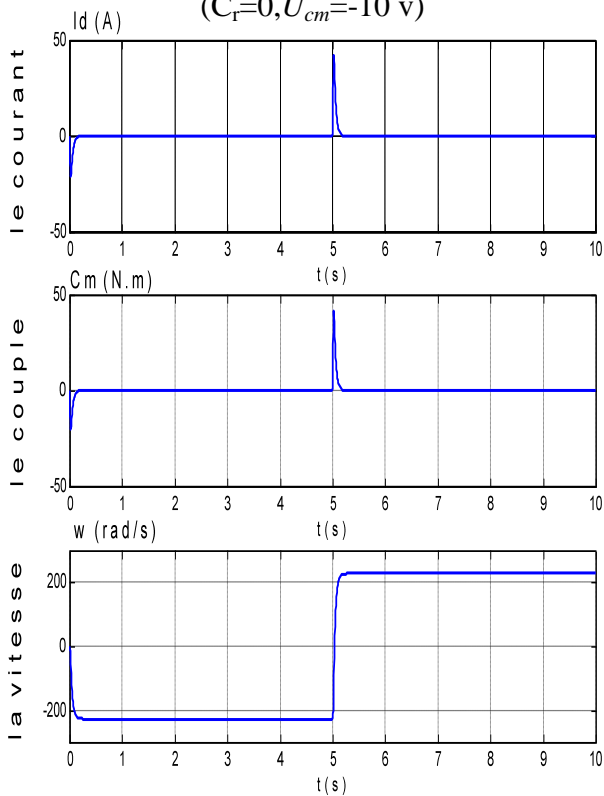
**Figure (III-21) :** Marche à vide  $U_{cm}=5$ v,

puis en charge ( $C_r=2.127$ N.m,  $t=3$  s à  $t=7$  s) et à  $t=5$  s,  $U_{cm} = 10$  v.



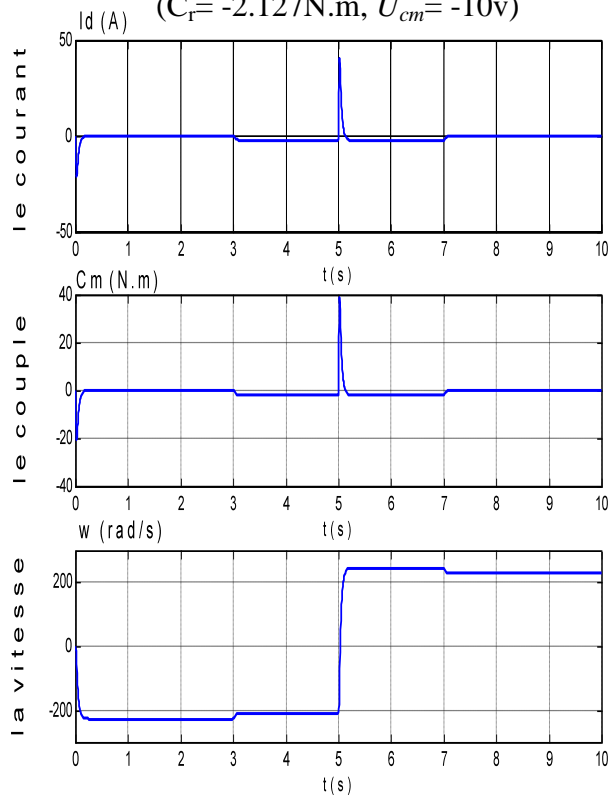
**Figure (III-22) :** Marche à vide

( $C_r=0, U_{cm}=-10$  v)



**Figure (III-23) :** Marche en charge

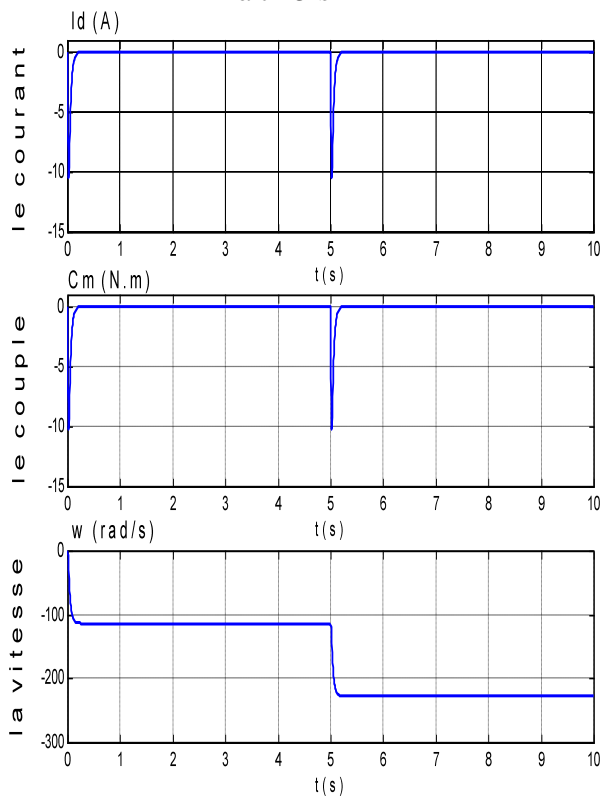
( $C_r= -2.127$ N.m,  $U_{cm}= -10$ v)



**Figure (III-24):** Marche à vide avec

Changement de sens de rotation

à  $t=5$  s



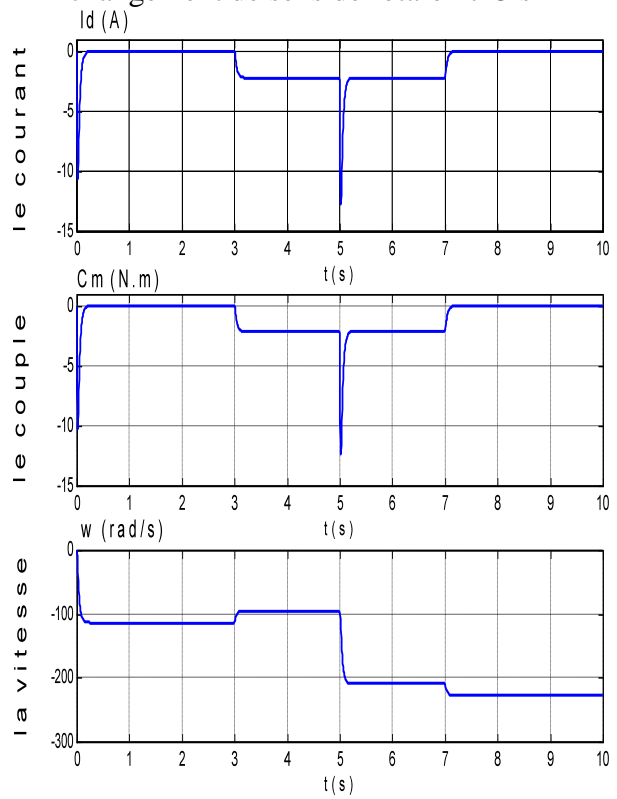
**Figure (III -26):** Marche à vide  $U_{cm}=-5v$ ,

puis à  $t=5$  s ,  $U_{cm} = -10$  v.

**Figure (III-25):** Marche à vide  $U_{cm}=-10v$

puis en charge ( $t=3$  s à  $t=7$  s),avec

changement de sens de rotaion  $t=5$  s



**Figure (III-27):** Marche à vide  $U_{cm}=-5v$

puis en charge ( $C_r=-2.127N.m$  ,  $t=3$  s à  $t=7$  s) avec changement de vitesse ( $t=5$  s,  $U_{cm}=-10$  v)

## Interprétation

Les figures précédentes représentent les courbes du courant, du couple et de vitesse pour différentes étapes du fonctionnement d'un moteur à courant continu.

Au premier lieu, il est bien remarquer que les caractéristiques (courant-couple -temps) des forts appels pendant le démarrage; en régime permanent sont stabilisés à des valeurs nulles.

Dans la courbe de vitesse on remarque bien qu'elle est d'une forme apériodique durant le régime transitoire, puis elle se stabilise à la vitesse de la marche à vide  $w_0$  en régime permanent.

Si on applique une charge nominale ( $C_r=C_n$ ), les valeurs du courant, du couple et de vitesse se stabilisent respectivement : au courant nominal  $I_{dn}$ , au couple nominal  $C_n$  et la vitesse nominale  $w_n$  (l'appel du courant, couple et de vitesse dépend de l'application d'un couple résistant (la charge)).

Dans le troisième cas on applique à l'entrée un échelon positif, après un certain temps on applique un autre échelon négatif pour voir clairement le passage d'un état stationnaire à un autre. On remarque que le courant et le couple subissent un pic à l'instant de changement de sens de rotation (cela est dû au changement du signe de la tension (positif  $\rightarrow$  négatif)).

Si on applique aux systèmes deux échelons d'amplitudes différentes décalés ( $U_d=110$  v,  $U_d=220$  v), la vitesse atteint une valeur correspondante à ce changement ( $U_d=110$  v,  $C_r=0$ ), puis la vitesse proportionnelle à la tension ( $U_d=220$  v,  $C_r=0$ ).

### N.B:

- Les interprétations des résultats des figures (IV-8) jusqu'à (IV-13) sont les mêmes interprétations des figures précédentes mais le moteur marche dans le sens inverse.
- Les résultats de simulation convertisseur-moteur sont des mêmes résultats que la simulation du moteur à courant continu **Figure(IV-1)**.

## III.5- ETUDE DE BOUCLE DE COURANT

### III.5.1- Introduction

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 [14].

### III.5.2- Capteur de courant d'induit

La mesure de courant est effectuée à l'aide d'un transformateur de courant 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.

### III.5.3- Calcul du facteur de transfert

Il est déterminé d'après la formule suivante :

$$K_{cc} = \frac{U_{\max}}{I_{\max}} \quad (\text{III-18})$$

$U_{\max}$  : tension de capteur de sortie maximale.

$I_{\max}$  : courant admissible d'induit.

$$K_{cc} = \frac{10}{2.5 * 2.2} = 1.818 \text{ V/A}$$

### 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  $T_{cc} = 0.005$  s

### III.5.4- Fonction de transfert du capteur de courant

La fonction de transfert du capteur de courant est :

$$G_{cc}(S) = \frac{K_{cc}}{1 + T_{cc}S} \quad (\text{III-19})$$

$$G_{cc}(S) = \frac{1.818}{1 + 0.005S}$$

### III.5.5- 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 :

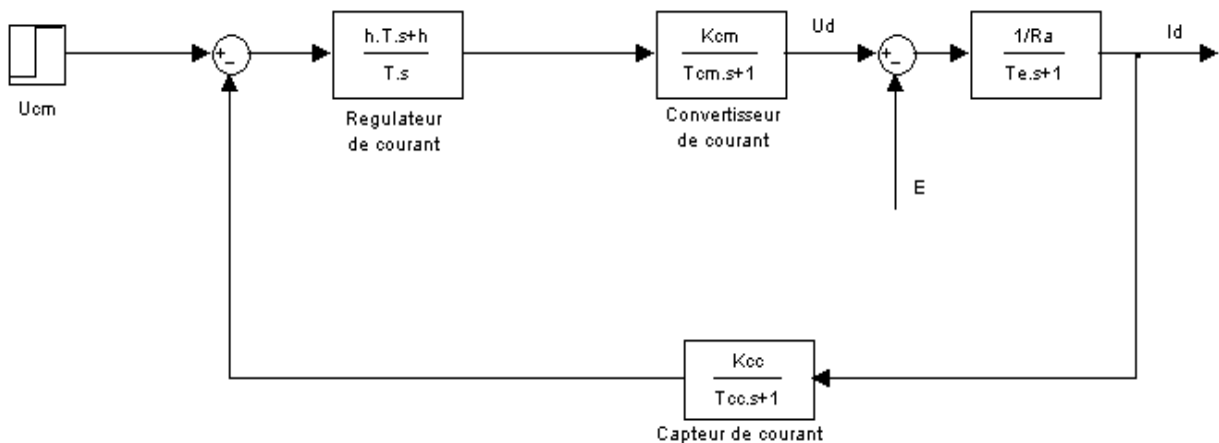


Figure (IV-28): Schéma bloc de régulation de courant.

### III.5.6- 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 :

$$G_3(S) = \frac{1}{T_1S(1 + T_2S)} \quad (\text{III-20})$$

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

$$G_{Rc}(S) = h \frac{1+TS}{TS} \quad (\text{III-21})$$

Pour déterminer cet optimum, *kessler* introduit un coefficient d'avance de phase ( $a$ ), tel que :

$$a = T/T_2 \quad ; \quad h = \frac{T_1}{T_2 \sqrt{a}} .$$

$a$  : coefficient d'avance de phase.

$T$  : constante de temps de régulateur de courant

$h$  : coefficient d'amplification de régulateur de courant.

La fonction de transfert en boucle ouverte de courant est :

$$G_4(S) = \frac{h.K_{cm} . K_{cc} . (1/R_a)}{T.S} \frac{1+T.S}{(1+T_{cc}.S)(1+T_{cm}.S)(1+T_e.S)} \quad (\text{III-22})$$

Après l'approximation, on approche  $G_4(S)$  par la forme :

$$G_5(S) = \frac{hK_{cm} K_{cc}}{R_a.T} \frac{1+T.S}{[1+(T_{cc}+T_{cm})S]T_e S^2} \quad (\text{III-23})$$

On peut faire l'égalité entre la fonction de transfert standard et la fonction de transfert de la boucle de courant ouverte [14].

Après la simplification, on trouve :

$$T_2 = T_{cc} + T_{cm}$$

$$T_1 = \frac{R_a.T_e}{K_{cc}.K_{cm}}$$

Et avec l'application numérique on trouve les paramètres du régulateur de courant :

$$T = 0.02668 \text{ s}$$

$$h = 0.1119.$$

## III.6- ETUDE DE LA BOUCLE DE VITESSE

### III.6.1- Introduction

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] .

### III.6.2- Capteur de vitesse

Pour mesurer la vitesse de rotation du moteur, on utilise une dynamo-tachymétrique qui représente une petite génératrice à aimant permanent. Entre les deux balais du rotor on obtient une tension proportionnelle à la vitesse dont la polarité est une indication pour le sens de rotation.

### III.6.3- 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 :

$$K_{cv} = \frac{U_{\max}}{W_{\max}} = \frac{10}{209.33} \Rightarrow K_{cv} = 0.04777 \text{ V.rad / s}$$

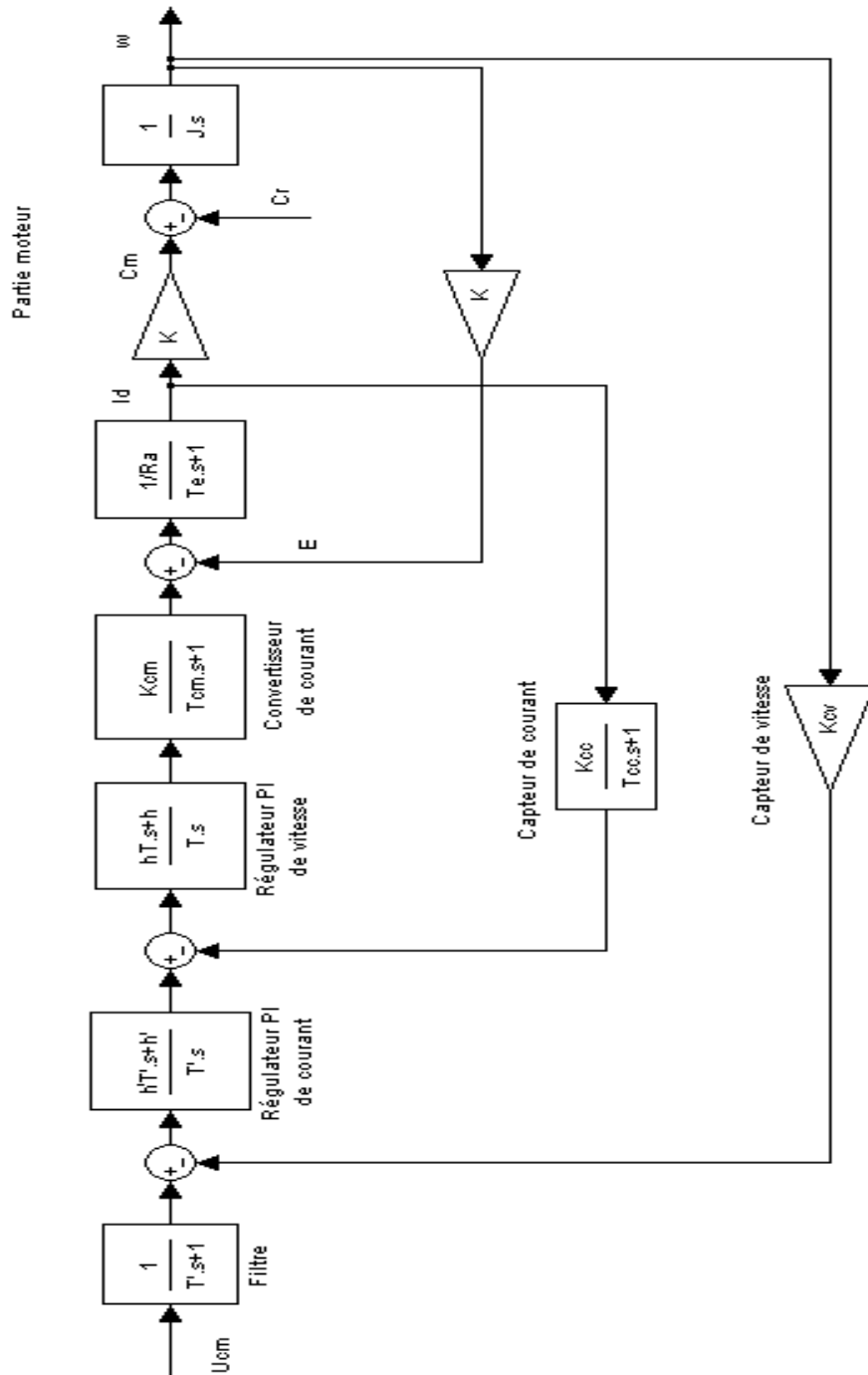


La fonction de transfert du capteur de vitesse est :

$$G_{cv}(S) = K_{cv} \quad (\text{III-24})$$

### III.6.4- Synthèse de la boucle de vitesse

Le schéma bloc final du moteur



**Figure (III-29)** : Schéma bloc de la régulation en cascade de l'association convertisseur-moteur à courant continu

### III.65- 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 :

$$G_6(S) = \frac{1}{K_{cc} \left(1 + \frac{S}{W_{coi}}\right)} \quad (\text{III-25})$$

Tel que :

$$W_{coi} = \frac{1}{(T_{cc} + T_{cm})\sqrt{a}} \quad (\text{III-26})$$

$W_{coi}$  : La fréquence de coupure de boucle de courant

La fonction de transfert de régulateur de vitesse est de la forme suivante :

$$G_{Rv}(S) = h' \frac{1 + T' S}{T' S} \quad (\text{III-27})$$

Selon la méthode de *kessler* la fonction de transfert de la boucle de vitesse ouverte :

$$G_7(S) = \frac{h' \cdot K \cdot K_{cv}}{T' \cdot K_{cc} \cdot J} \frac{1 + T' \cdot S}{S^2 \left(1 + \frac{S}{W_{coi}}\right)} \quad (\text{III-28})$$

Comme le calcul des paramètres du régulateur de courant. On fait le même travail pour déterminer les paramètres du régulateur de vitesse.

On trouve [14] :

$$T'_1 = \frac{J \cdot K_{cc}}{K \cdot K_{cv}} \quad , \quad T'_2 = \frac{1}{W_{coi}}$$

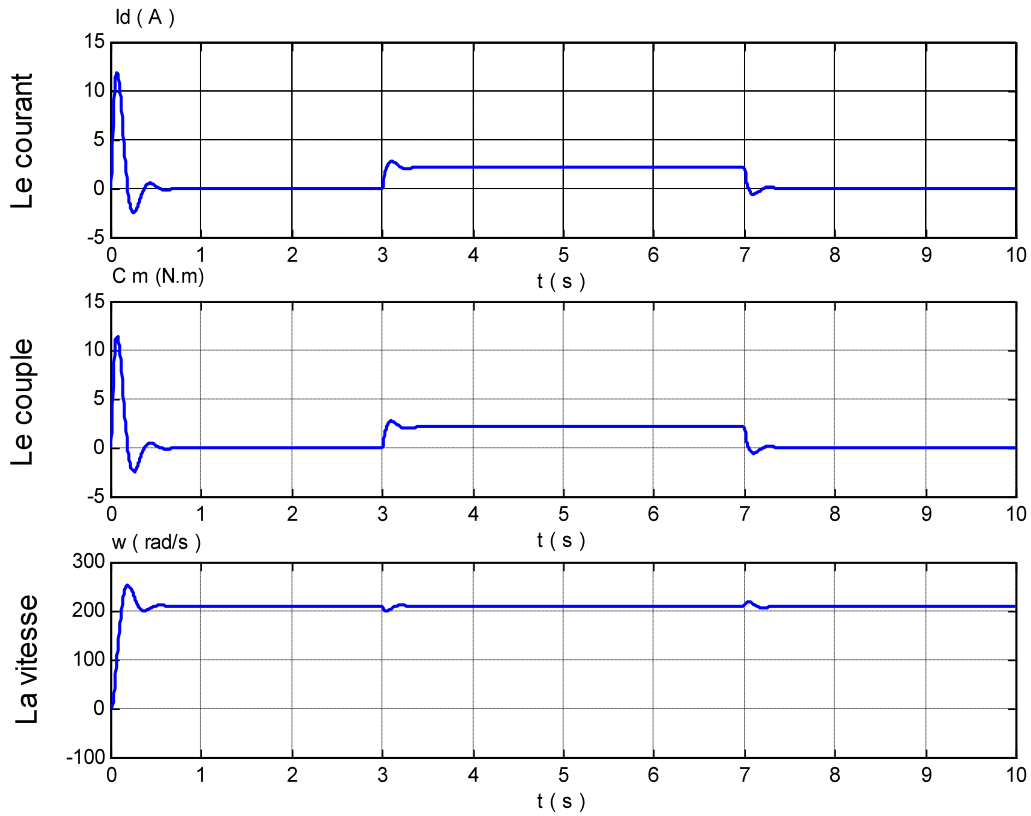
$$T' = a \cdot T'_2 \quad , \quad h' = \frac{1}{\sqrt{a}} \frac{T'_1}{T'_2}$$

$T'$  : constante de temps de régulateur de vitesse

$h'$  : coefficient d'amplification de régulateur de vitesse

$$T' = 0.05336 \text{ s}$$

$$h' = 7.38153$$



Figure

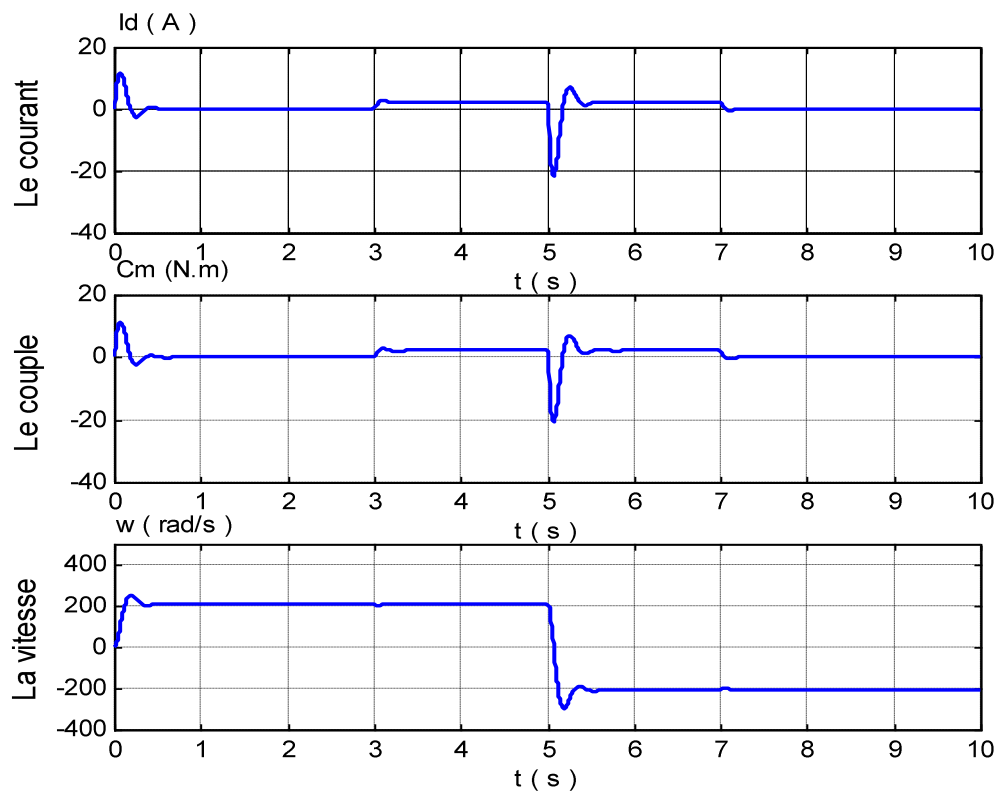
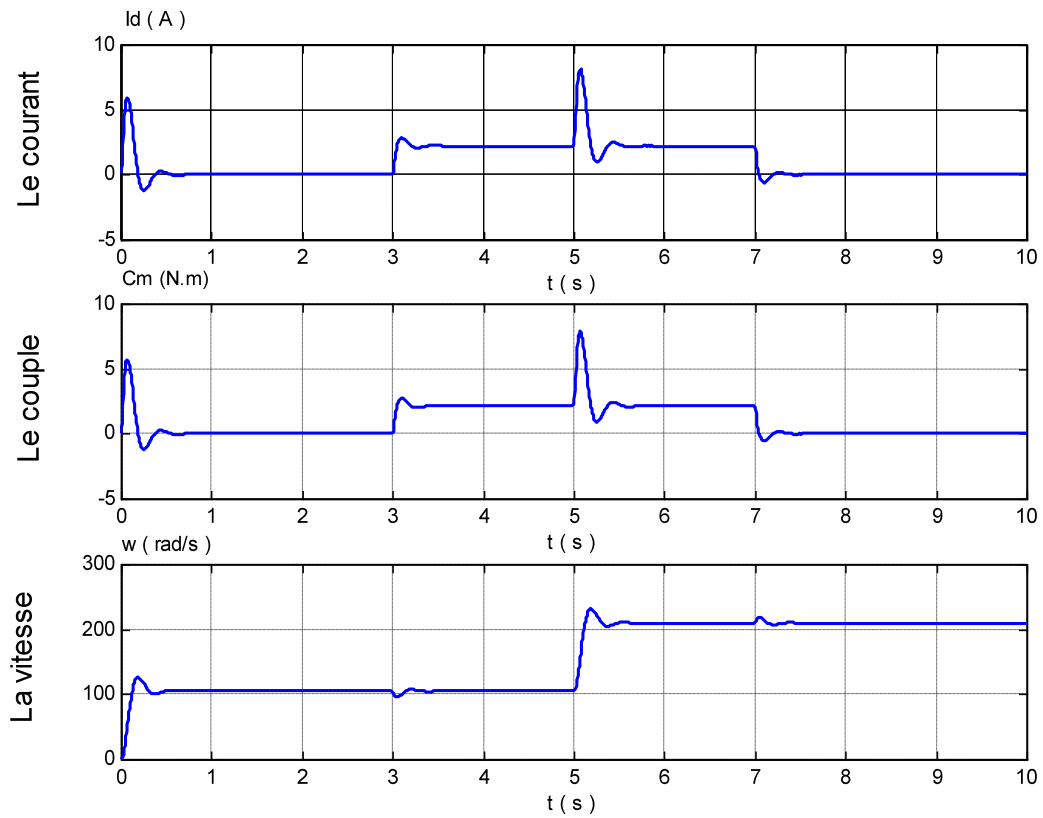
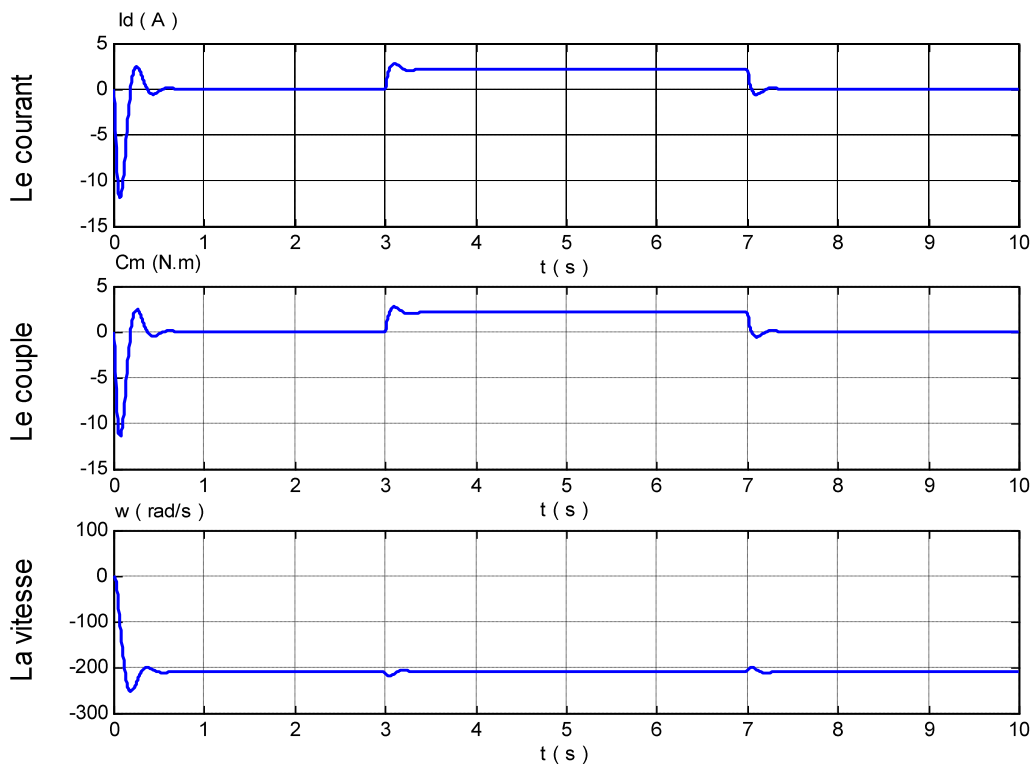


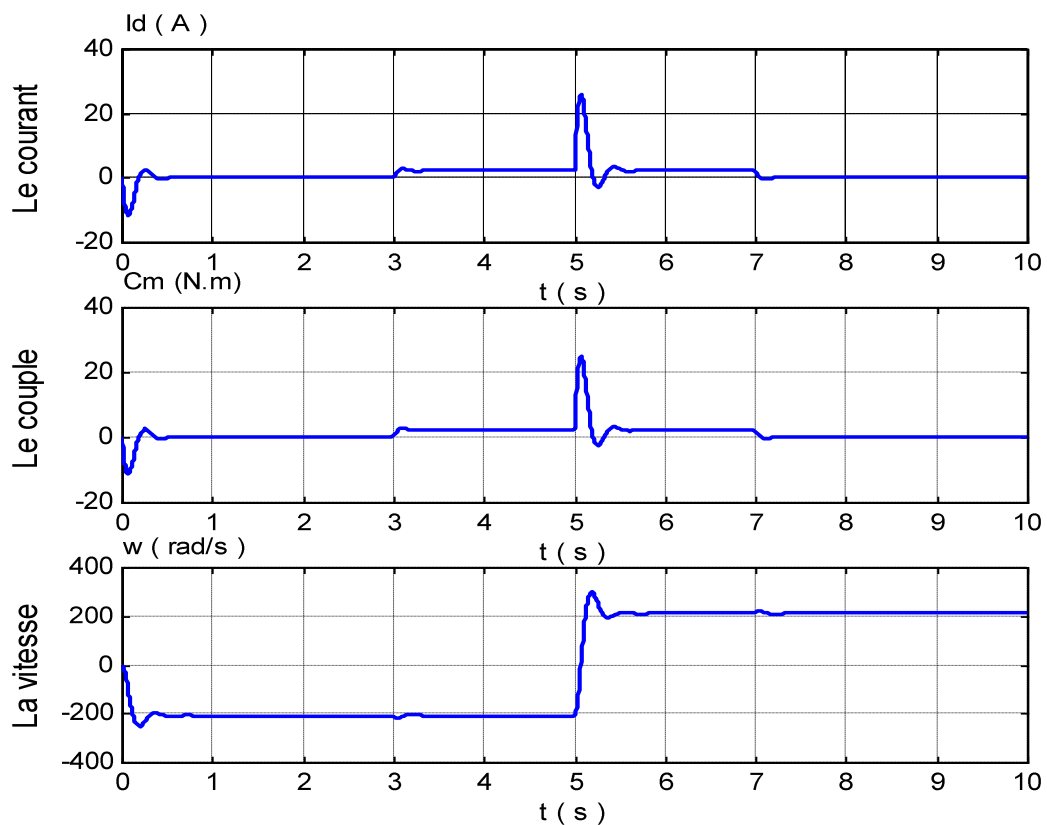
Figure (III-31) : Marche à vide  $U_{cm}=10v$ , puis en charge ( $C_r=2.127 N.m$ ,  $t=3 s$  à  $t=7s$ ), avec changement de sens de rotation ( $t=5 s$ ,  $U_{cm}=-10 v$ )



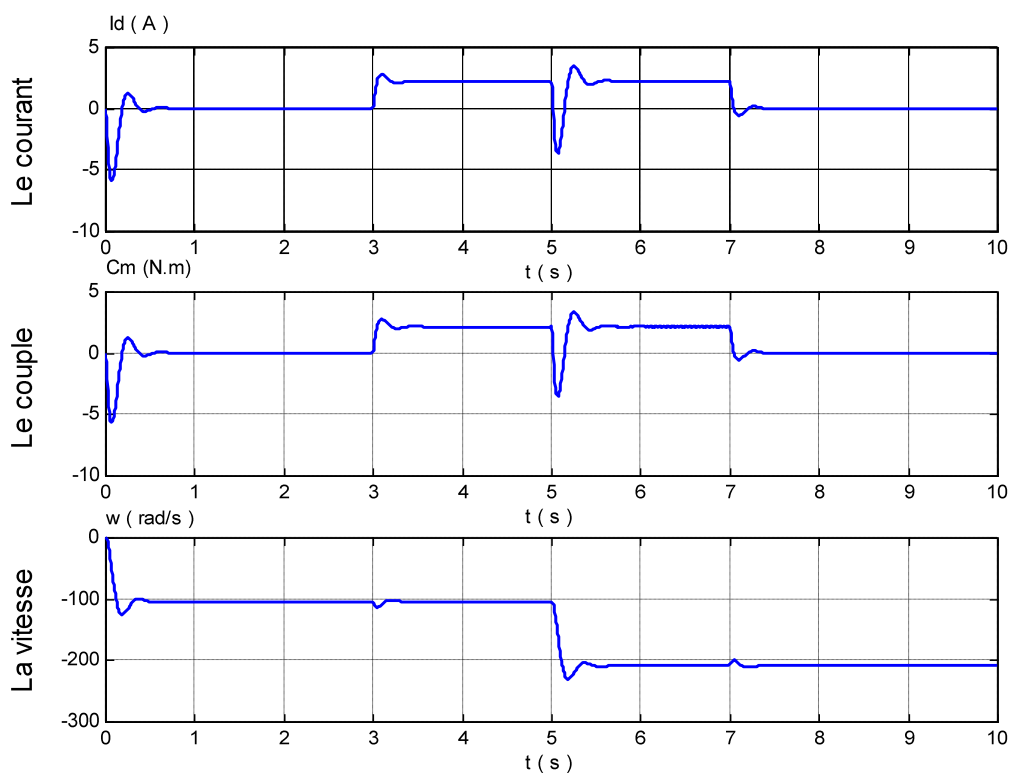
**Figure (III-32) :** Marche à vide  $U_{cm}=5$ v, puis en charge ( $C_r=2.127$  N.m,  $t=3$  s à  $t=7$  s), à  $t=5$  s changement de vitesse ( $U_{cm}=10$  v)



**Figure (III-33) :** Marche à vide  $U_{cm}=-10$ v, puis en charge ( $C_r=-2.127$  N.m,  $t=3$  s à  $t=7$  s)



**Figure (III-34) :** Marche à vide  $U_{cm}=-10v$ , puis en charge ( $C_r=-2.127$  N.m,  $t=3$  s à  $t=7$  s) avec changement de sens de rotation ( $t=5$  s,  $U_{cm}=10$  v)



**Figure (III-35) :** Marche à vide  $U_{cm}=-5v$ , puis en charge ( $C_r=-2.127$  N.m,  $t=3$  s à  $t=7$  s), à  $t=5$  s changement de vitesse ( $U_{cm}=-10$  v)

### III.7- Schéma bloc de simulink

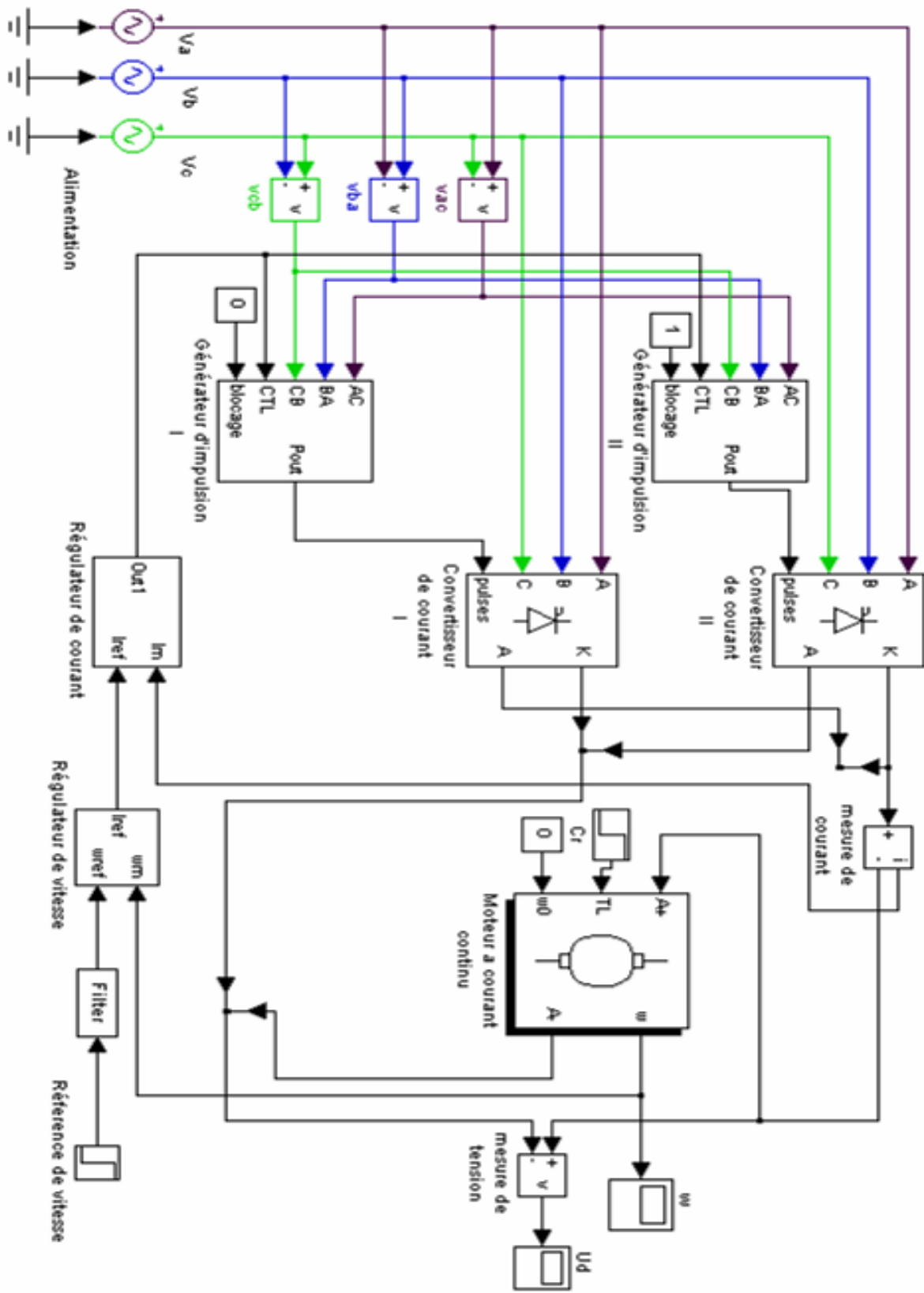


Figure (III-36) : Schéma complet du modèle réel de l'association convertisseur de courant bidirectionnel-moteur à courant continu

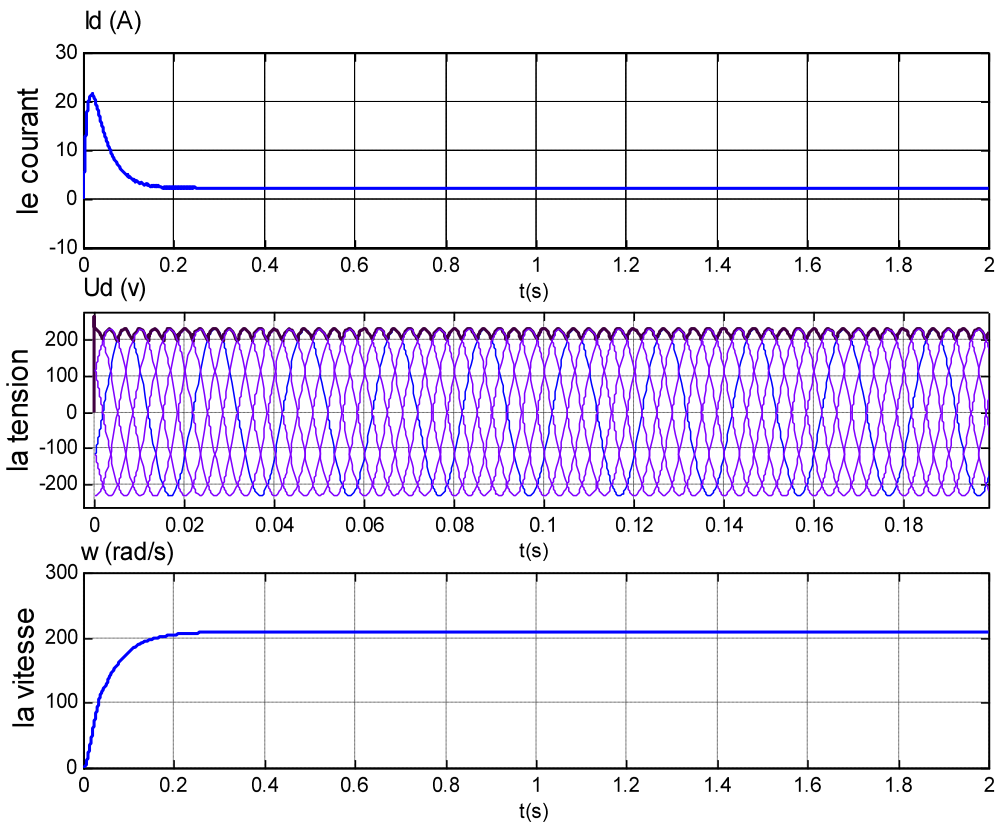


Figure (III-37) : Marche en charge ( $C_r=2.127 \text{ N.m}$  ,  $U_d=220 \text{ v}$ )

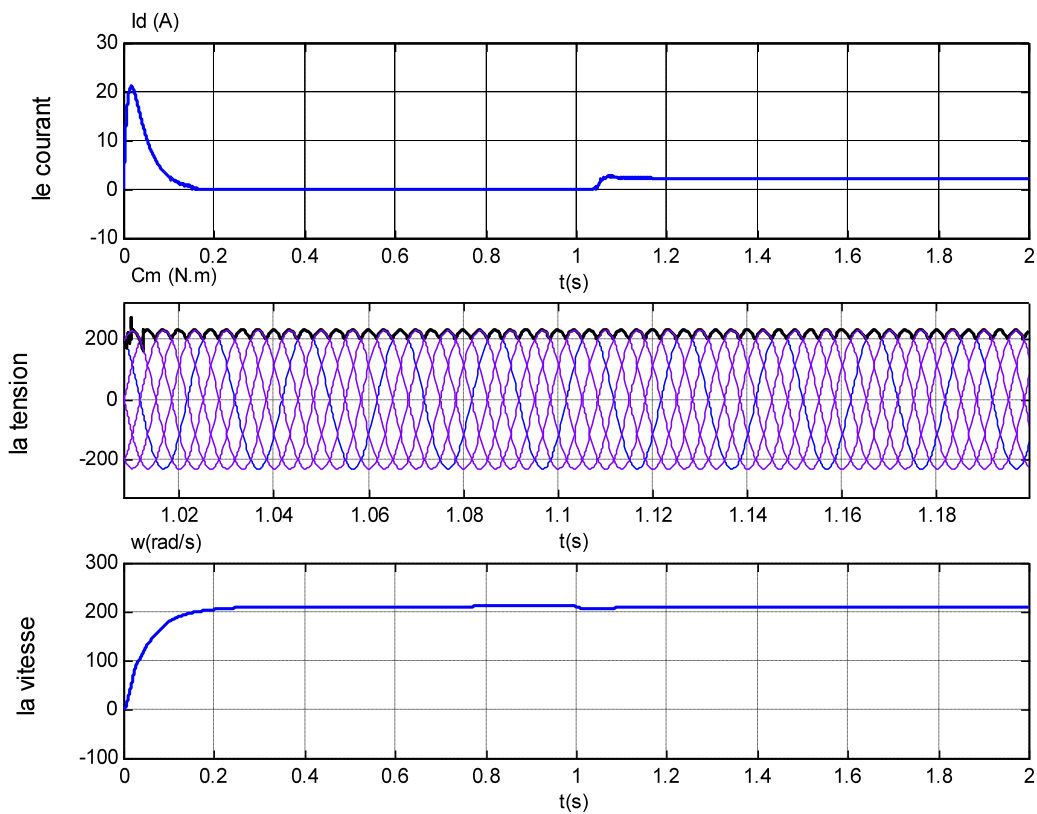
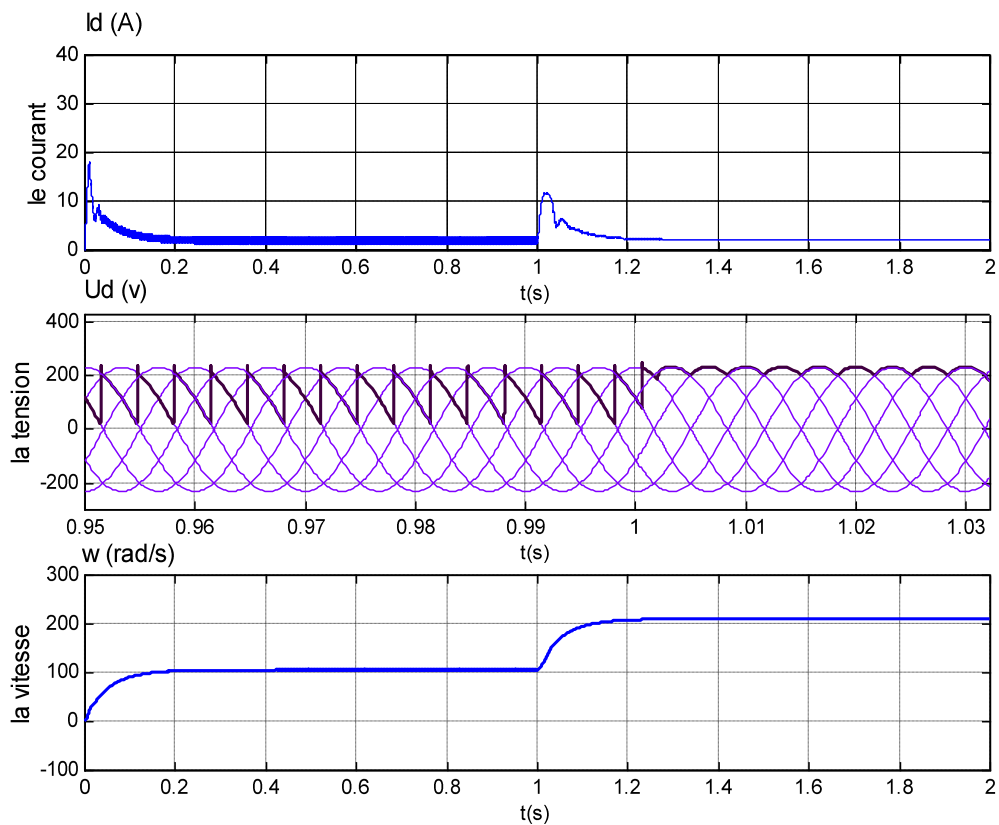
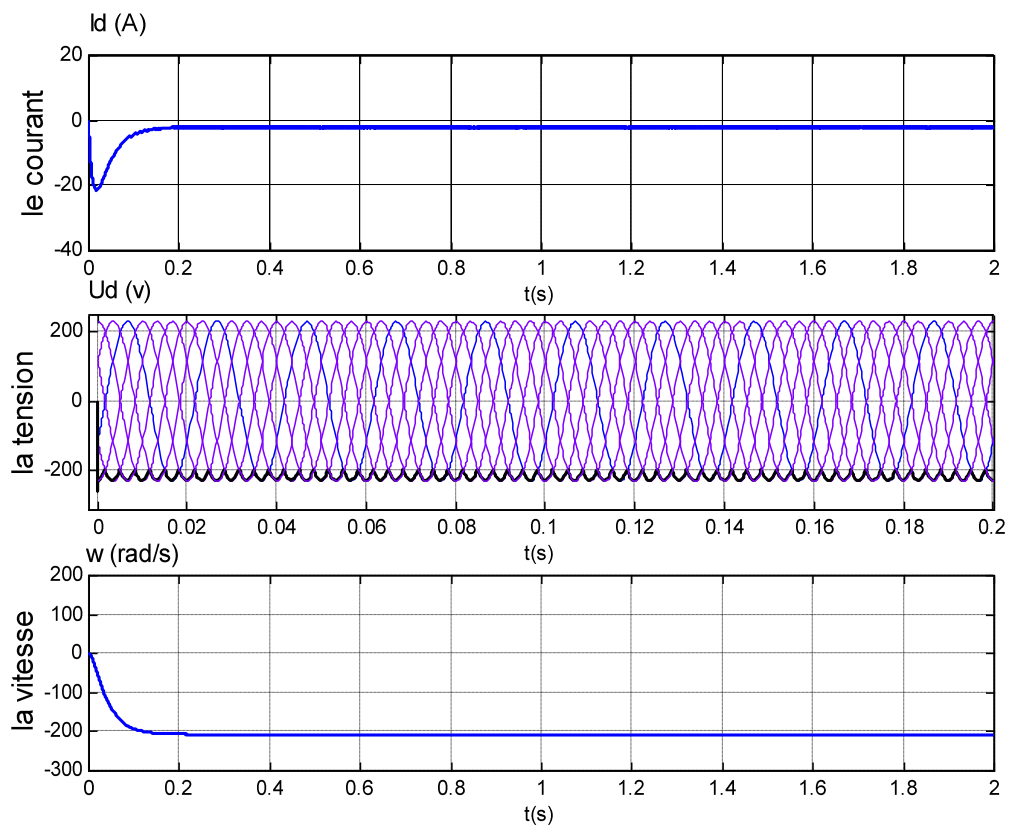


Figure (III-38) : Marche à vide puis en charge (à  $t=1 \text{ s}$ ,  $C_r=2.127 \text{ N.m}$  ,  $U_d=220 \text{ v}$ )

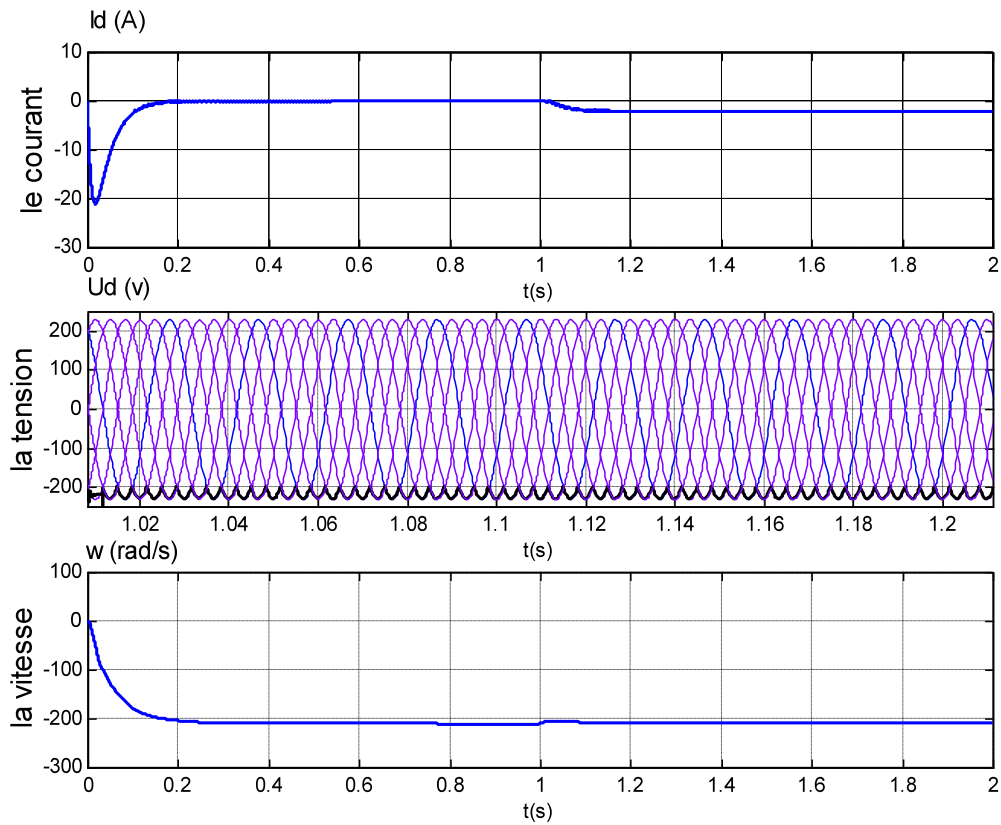


**Figure (III-39) :** Marche en charge ( $C_r=2.127$  N.m,  $w=w_n/2$ ,  $w=w_n$ )

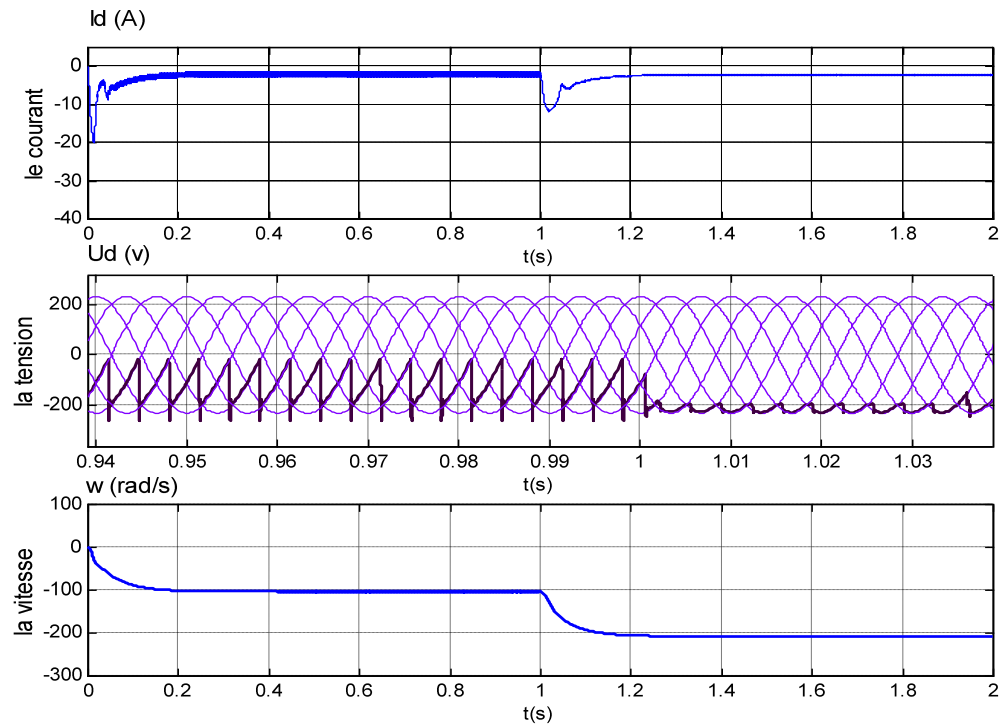




**Figure (III-40) : Marche en charge ( $C_r = -2.127 \text{ N.m}$ ,  $U_d = -220 \text{ v}$ )**



**Figure (III-41) : Marche à vide ,puis en charge (à  $t=1 \text{ s}$ ,  $C_r = -2.127 \text{ N.m}$ ,  $U_d = -220 \text{ v}$ )**



**Figure (III-42) : Marche en charge ( $C_r = -2.127 \text{ N.m}$ ,  $w = -w_n/2$ ,  $w = -w_n$ )**

## Interprétation

Il est bien remarquer que les caractéristiques (vitesse, courant , temps) figure(IV-30)

Dans le cas où on applique un couple résistant (perturbation) que la vitesse diminue à une valeur inférieure à celle du régime permanent en un temps moyennement court puis retourne au régime établi jusqu'à l'élimination de la perturbation où elle augmente rapidement puis rentre au régime permanent.

En fin on peut conclure que le rôle principal du régulateur de vitesse et de maintenir à niveau constant la vitesse de sortie quelle que soit la variation de la charge.

Ces courbes montrent l'efficacité de régulateur et la robustesse de système de régulation vis-à-vis le réglage de vitesse avec la variation de la charge ( $C_r$ ) , et l'inversion de sens de rotation .

Afin d'obtenir les résultats qui peuvent être comparable à ceux obtenus à partir du schéma bloc on a utiliser une structure réversible en courant du convertisseur statique utilisé figure(III-36), la réponse complète du système est représenté sur les figures (III-37) à vide , (III-38) en charge et (III-39) avec perturbation pour le fonctionnement du système en sens direct, et les figures (III-40), (III-41), (III-42), correspondantes au fonctionnement du moteur dans le sens inverse.

Dans le schéma bloc l'information de n'importe qu'elle nature puisse circuler dans n'importe quel sens, tandis que dans un circuit électrique le thyristor se bloque. Si le courant qui le traverse devient inférieur au courant de maintien.

## III.8- ETUDE DE STABILITE DU SYSTEME

Selon la méthode de critère de *ROUTH* on étudiera la stabilité comme suit :

La fonction de transfert en boucle fermée de schéma de bloc de la régulation en cascade de moteur figure (III-29) est écrite sous la forme suivante:

$$G_8(S) = \frac{(1 + T_{cc}S).H.K.h'.(1 + T'S)}{\left[ L.S.J.(1 + T_{cc}S) + J.S.H.K_{cc} + L(1 + T_{cc}S).K^2 + (1 + T_{cc}S).H.K.K_{cv} \right] T'} \quad (\text{III-29})$$

avec:

$$L = (1 + T_eS)(1 + T_{cm}S)TS$$

$$H = 1 / R_a \cdot (K_{cm} h(1 + TS))$$

Après la simplification on trouve le dénominateur (D) :

$$D = 0.042 * S + 5.6 * 10^{-4} * S^2 + 3.28 * 10^{-6} S^3 + 9.07 * 10^{-9} * S^4 + 8.375 * 10^{-12} * S^5$$

On pose :  $D = 0$

$$0.042 * S + 5.6 * 10^{-4} * S^2 + 3.28 * 10^{-6} S^3 + 9.07 * 10^{-9} * S^4 + 8.375 * 10^{-12} * S^5 = 0 \quad (\text{III-30})$$

$S^5$	$8.375 * 10^{-12}$	$3.28 * 10^{-6}$	0.042
$S^4$	$9.07 * 10^{-9}$	$5.6 * 10^{-4}$	0
$S^3$	$2.76 * 10^{-6}$	0.042	0
$S^2$	$1.16 * 10^{-9}$	0	0
$S$	0.042	0	0

Puisqu'il n'y a pas de changement de signe dans la première colonne de la table de *ROUTH*, toutes les racines de l'équation (III-30) ont leur partie réelle négative, c'est-à-dire le système est stable.



**CONCLUSION  
GENERALE**



## CONCLUSION GENERALE

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.

Notre projet fait l'objet d'étude et de réalisation d'un hacheur réversible en courant, destiné à l'alimentation d'un moteur à courant continu dans un système d'asservissement et régulation en vitesse variable. Ce hacheur présente l'avantage d'être facile à réaliser et moins encombrant.

Afin de montrer l'utilité de ce hacheur, nous avons étudié son association avec le moteur. Il est ainsi possible de faire varier la vitesse de ce dernier en réglant le rapport cyclique (cc) et réaliser son freinage grâce à la réversibilité en courant du montage.

La première partie de ce travail est consacrée aux structures, caractéristiques et à l'utilité des moteurs à courant continu (choix d'un MCC) c'est-à-dire (avantages, facile à régler sa vitesse, ses équations électriques et mécaniques)

A la base des exigences imposées telle que la réversibilité du moteur, on a choisi un convertisseur à thyristors réversible qui donne accès aux quatre quadrants, permettant des inversions rapides, en réduisant les coûts et donnant un excellent rendement.

Après avoir calculé les paramètres des régulateurs on procède à la simulation numériques et dynamiques, et l'aptitude du système qui absorbe les perturbations 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. Pour notre part, nous avons pu mettre en œuvre le côté pratique avec les moyens qui ont été mis à notre disposition.



*BIBLIOGRAPHIQUE*

[1] HENRI NEY

Electrotechnique et normalisation 4 équipements de puissance Edition Nathan, 1988.

[2] :MR. OURBIA — F.TAMINE

Etude théorique et expérimentale d'un système de commande d'un moteur à courant continu.

Projet de fin d'études ; C.U.Bejaia 1993.

[3] :B. SAINT -JEAN —ING

Electrotechnique et machines électriques.

Editions EYROLLES,Paris,1976;1977.

Editions LIDEC, Canada,1976;1977.

[4] :DJ. CHEURFA - ANTAR ALIOUAT

Contribution à l'étude et à la réalisation d'une commande réversible à courant continu.

Projet de fin d'études; C . U. Bejaia, 2000.

[5] GUY SEGUIER

L'électronique de puissance, les fonctions de base et leurs principales applications.

Cinquième éditions; DUNOD.

[6] Génératrice et moteur à courant continu

Plate-forme 3E (Électricité, Electronique, Electrotechnique) C.E.S.I.R.E. – Université J Fourier Grenoble

[7] : ROBERT BAUSIERE - FRANCIS LABRIQUE- GUY SEGUIER Les convertisseurs de l'électronique de puissance, la conversion —continu- continu (Volume 3) . Technique et documentation Lavoisier, 1987.

[8] : A/O.KHETTAL-A/M. BOUSBA

Etude et réalisation d'un hacheur à transistor pour l'alimentation d'un moteur à courant continu.

Projet de fin d'études, C.U. Bejaia ,1997-1998.

[9] : Thierry LEQUEU – Mars 2005 – [DIV435] – Fichier : IUT-EDP-9.DOC

[10] A. MESBAH, M. MOKHTARI, Apprendre et maîtriser Matlab, Edition Springer.

[11] .Mathworks, Simulink, dynamic systems simulation software, The Math Works, inc.

[12] Sites Internet.

[13] Handruedi BHULER, " Electronique de réglage et de commande ",Volume XVI, 3<sup>eme</sup> édition, Lavoisier [1990].

[14] G.Grellet , G.clere , " Actionneur électrique " édition EYROLLES, 2<sup>eme</sup> tirage [2000]