

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

**Mémoire de Fin d'Etude
De MASTER ACADEMIQUE**
Spécialité : **automatique option commande des
systèmes**

Présenté par

**KARA FATMA
TALEB TAHAR**

Mémoire dirigé par Hamache Amar

Thème

**Modélisation et commande en vitesse d'un moteur à courant continu
alimenté par un hacheur MLI**

Mémoire soutenu publiquement le 13/10/2015 devant le jury composé de :

M Mohand Achour TOUAT

Grade, Lieu d'exercice, Président

M Amar HAMACHE

MCB, UMMTO, Encadreur

M Fadila BOUDJEMAA

Grade, Lieu d'exercice, Examineur

M Takfarinas CHELLI

Grade, Lieu d'exercice, Examineur

Ce travail a été réalisé à l'UMMTO

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et nos profondes gratitude à Dieu qui nous a donnés le courage et la volonté de réaliser ce travail.

Nous tenons aussi à remercier nos chers parents pour leur patience, leurs encouragements et leurs conseils durant nos études.

Nous remercions infiniment notre promoteur Amar HAMACHE d'avoir encadré ce travail et pour ses orientations et judicieux conseils.

Nos remerciements sont exprimés à l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous remercions toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

- ✓ *Ma mère*
- ✓ *Mon père*
- ✓ *Ma grand-mère*
- ✓ *La mémoire de mon grand-père.*
- ✓ *Mes frères et sœurs : Amirouche, Rezki, Hassina, Fahima, Akila, Kahina, et mon neveu Rayane*
- ✓ *Toute la famille KARA parents et enfants.*
- ✓ *Mon binôme et sa famille.*
- ✓ *Tous ceux qui nous ont encouragés pour réaliser ce travail.*
- ✓ *Tous mes amis.*

Fatma
Fatma

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

- ✓ *Ma mère*
- ✓ *Mon père*
- ✓ *Mon frère et mes sœurs, mes beaux frères, mes neveux*
- ✓ *Toute la famille **TALEB** parents et enfants.*
- ✓ *Mon binôme et sa famille.*
- ✓ *Tous ceux qui nous ont encouragés pour réaliser ce travail.*
- ✓ *Tous mes amis.*

Tahar
Tahar

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : le moteur a courant continu : Généralités	
I.1 Introduction.....	2
I.2. Constitution du moteur à courant continu	3
I.2.1. Inducteur (stator)	3
I.2.2. Induit (rotor)	4
I.2.3. Collecteur	4
I.2.4. Balais et porte-balais.....	5
I.3. Types de moteurs à courant continu.....	5
a)Machines à excitation séries	5
b) Machine à excitation shunt ou (dérivation)	6
c) Machine à excitation indépendante	7
d) Moteur à excitation compound ou composée	8
I.4. Comparaison entre les différents types machine	9
I.5. Le fonctionnement de la machine à courant continu dans les quatre quadrants.....	10
I.6. Moteur à excitation séparév	11
I.7. Caractéristiques d'un moteur à courant continu	11
I.7.1. Caractéristiquemécanique	11
I.7.1. Point defonctionnement.....	12
I.8. Avantages et inconvénients des moteurs à courant continu.....	13
I.9. Conclusion	14
Chapitre II : Modélisation du système	
II.1 Introduction.....	15
II.2. Modélisation de moteur à courant continu	16
II.3. Modélisation du hacheur MLI.....	18
II.4. Conclusion	19
Chapitre III : commande du système globale	
III.1. Introduction	20
III.2. Réponse du système en boucle ouverte.....	20
III.3. Cahier des charges.....	22
III.4. Commande par PI.....	23
III.5. Commande par modes glissants	28
III.6. Analyse des résultats.....	35
III.7. Conclusion	35
Conclusion générale	36
Bibliographie.	

Introduction Générale

Le moteur à courant continu est le moteur le plus utilisé dans l'industrie. Grâce à ses performances statiques et dynamiques en comparaison à celles des autres types de moteurs, sa vitesse, voire même son couple, peut être réglée de façon très précise et dans de larges gammes de valeurs.

En effet, par nature le moteur à courant continu reste le moteur le facile à intégrer dans une chaîne d'industrie et il possède une structure relativement simple. De plus, il peut être adapté à n'importe quelle taille selon les besoins (électroménager, microélectronique, engins, cimenteries...etc.).

Dans ce contexte, notre travail consiste à modéliser puis analyser le fonctionnement d'un système d'entraînement électrique constitué d'un moteur à courant continu et d'un hacheur à MLI (modulation de largeur d'impulsion), commandé par deux techniques classiques.

Le mémoire s'articule autour de trois chapitres comme suit :

Le premier portera sur quelques généralités sur les moteurs à courant continu entre autres : types de moteurs, leurs caractéristiques statiques, avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation du moteur à excitation séparée et celle du hacheur quatre quadrants utilisant la technique MLI.

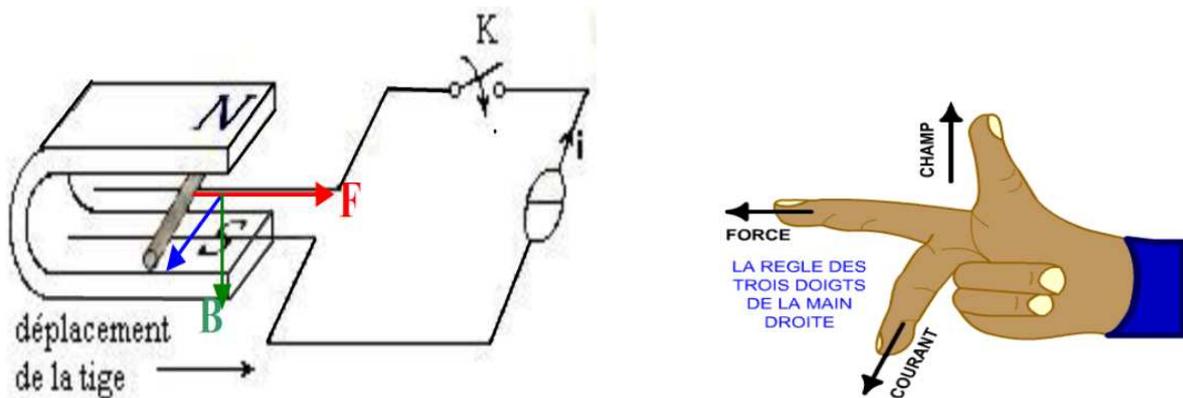
Quant au troisième et dernier chapitre, nous donnerons le cahier des charges suivi de la synthèse des deux lois de commande. On enchainera par des simulations dans le cas où ces lois de commande sont appliquées au pilotage du système.

Le mémoire sera achevé par une conclusion générale suivie de quelques perspectives.

I.1. Introduction

Les moteurs à courant continu (MCC) sont des machines électriques tournantes, ce sont des convertisseurs électromécaniques permettant la conversion d'énergie électrique à courant continu en énergie mécanique. [2]

Le phénomène de conversion sus cité, repose sur la loi physique de Laplace qui stipule qu'une force tendant à mettre les parties tournantes en mouvement est créée, lorsque celles-ci sont parcourues par un courant électrique et immergées dans un champs magnétique (figure I.1). [1]



A : Barre parcouru par un courant I dans le champ d'induction B

B : règle des trois doigts de la main droite

Figure I.1: Force de Laplace (électromagnétique).

L'effort élémentaire $d\vec{F}$ appliqué au conducteur:

$$d\vec{F} = I \cdot d\vec{x} \wedge \vec{B} \tag{I.1}$$

L'effort élémentaire (F) appliqué au conducteur :

$$d\vec{F} = -B \cdot I \cdot dx \cdot \vec{i} \wedge \vec{k} \tag{I.2}$$

Le conducteur est soumis à l'effort :

$$d\vec{F} = -B \cdot I \cdot dx \cdot \vec{j} \tag{I.3}$$

I.2. Constitution du moteur à courant continu

Le moteur à courant continu est représenté dans la figure suivantes :

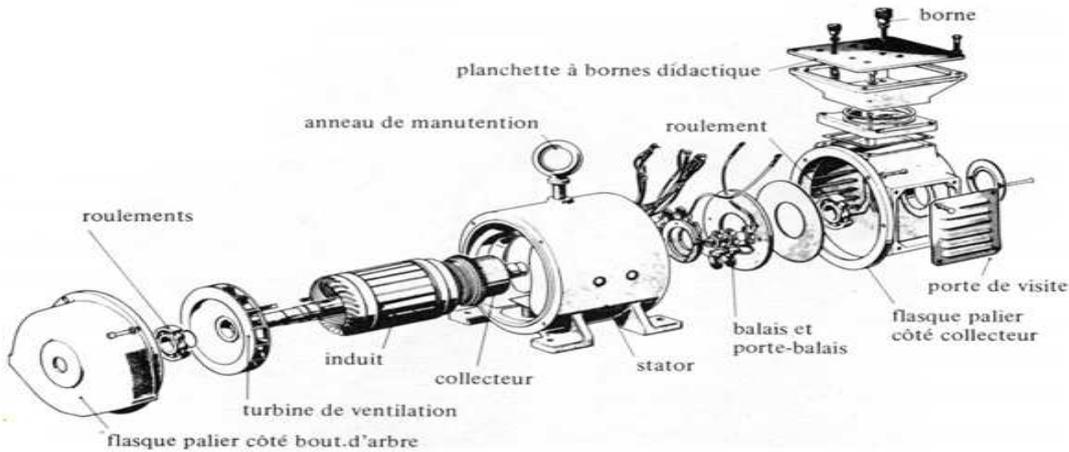


Figure I.2 : Constitution du moteur à courant continu

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

I.2.1. Inducteur (stator)

C'est une partie fixe du moteur, il est constitué d'un électro-aimant à deux pôles et d'une carcasse sur laquelle sont montés les bobinages formant un ensemble d'enroulements. Il sert aussi à créer le champ magnétique (figure I.2). [4]

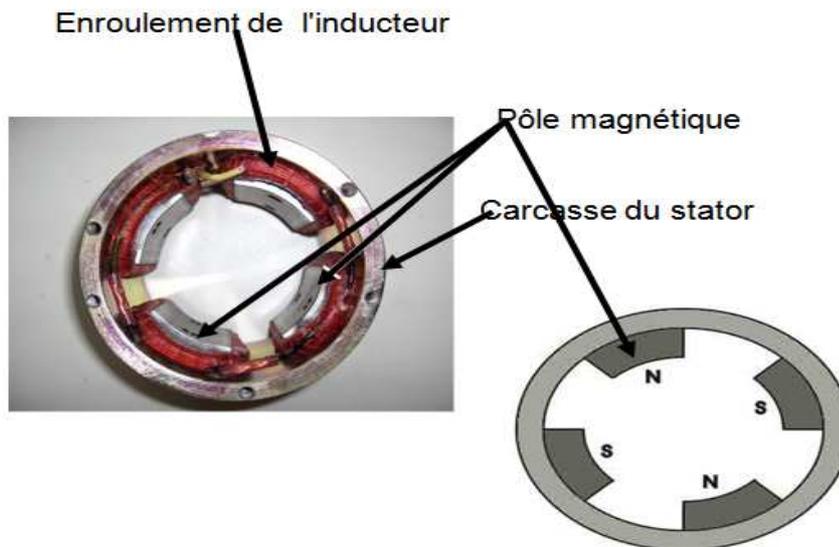


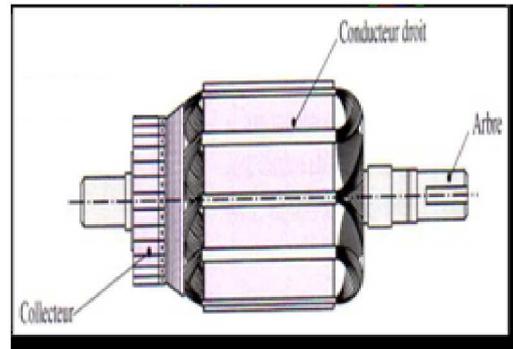
Figure I.3: Stator du moteur.

I.2.2. Induit (rotor)

C'est la partie mobile constitué d'un cylindre présentant des encoches dans lesquelles sont logés les conducteurs sensiblement parallèles à son axe. Ses spires soumises à la force électromagnétique entraînent le rotor (figure I.3). [1]



A : image réel



B : schéma du rotor

Figure I.4: Rotor du moteur.

Entre l'induit et l'inducteur, on trouve un intervalle d'air appelé entrefer, indispensable à la rotation sans frottement de l'induit à l'intérieur de l'inducteur.

I.2.3. Collecteur

Il est constitué de lames de cuivre isolées entre elles et disposées de sorte à former un cylindre. Sur chacune d'entre elles sont soudés le départ et le retour d'une section d'enroulement. Le collecteur est donc un commutateur mécanique qui inverse le sens du courant dans les conducteurs qui franchissent la ligne neutre (figure I.4). [4]

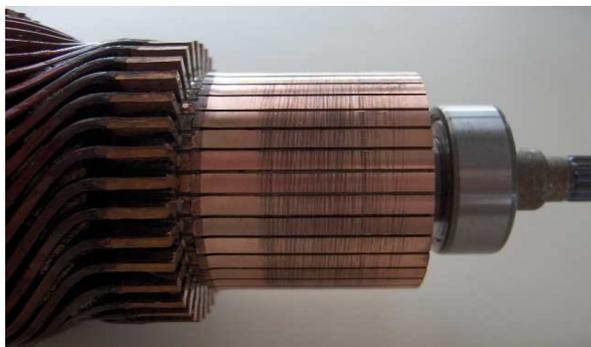


Figure A : image réel

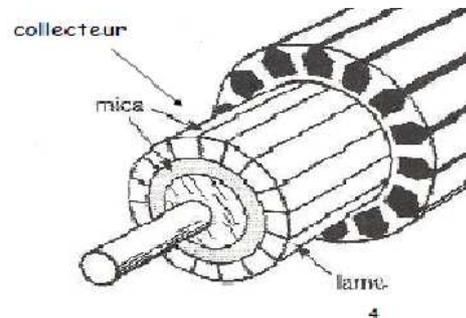


Figure B : schéma du collecteur

Figure I.5: Collecteur du moteur.

I.2.4. Balais et Porte-balais

Les balais assurent le passage du courant électrique entre l'alimentation et les bobinages de l'induit sous forme d'un contact par frottement. Ils sont faits généralement en graphite. Le porte-balai assure la fixation du balai sur le collecteur (figure I.5). [4]

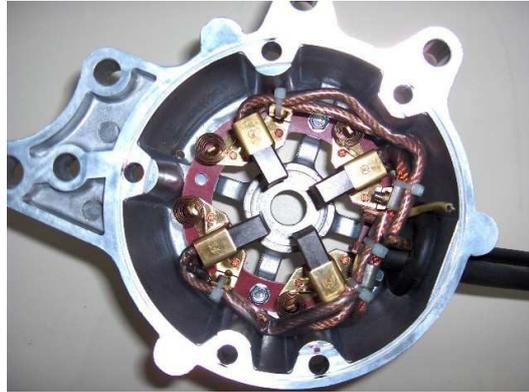


Figure I.6: Balais et porte-balais.

I.3. Types de moteurs à courant continu

Il en existe plusieurs, selon le raccordement de l'excitation au circuit d'inducteur, dont :

- Moteur à excitation série,
- moteur à excitation shunt,
- moteur à excitation e (ou composée),
- moteur à excitation séparée,

a) - Machines à excitation séries :

Ce type de moteur est caractérisé par le fait que le stator (inducteur bobiné) est raccordé en série avec le rotor (induit), comme le montre le schéma ci-dessous :

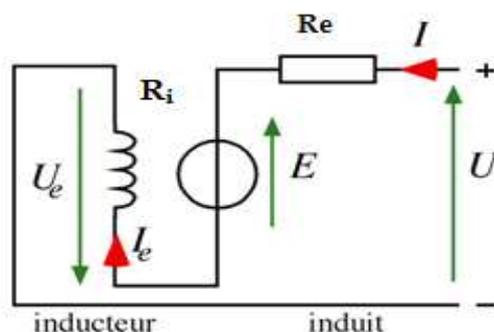


Figure I.7 : Machine à excitation en série

Dans ce type de moteur, le même courant I traverse le rotor et stator

$$i_{\text{induit}} = i_{\text{inducteur}} \quad (\text{I.4})$$

Et la tension d'alimentation est donnée la relation suivante :

$$U_i = U_e = U \quad (\text{I.5})$$

- Les équations de la machine deviennent :

$$U = E + R_i i_i + R_e i_e = E + i(R_e + R_i) \quad (\text{I.6})$$

-La force électromotrice de moteur :

$$E = K_e \Phi \Omega \quad (\text{I.7})$$

-Le couple de moteur :

$$C = K_m \Phi i \quad (\text{I.8})$$

Avec :

i_e : Courant d'excitation (l'inducteur) [A]

i_i : Courant d'induit [A]

i : Le courant absorbé par la machine [A]

U_e : Tension d'excitation (l'inducteur) [V]

U_i : Tension d'induit [V]

U : Tension d'alimentation [V]

E : Force électromotrice [V]

R_i : La résistance aux bornes de l'induit

R_e : La résistance aux bornes de l'inducteur

K_e : Coefficient de construction

K_m : Coefficient de construction

C : Couple nominale [N.m]

Ω : Vitesse angulaire nominale [rd/s]

Φ : Flux magnétique [wb]

Dans cette machine le flux magnétique est créé grâce au courant circulant dans l'induit, une seule source suffit pour alimenter l'induit et l'inducteur, mais le flux magnétique dépend directement du courant d'induit, donc de la charge du moteur, à vide le moteur n'a pas à fournir de couple utile, le courant d'induit et d'inducteur aussi donc

le flux est presque nul, le moteur à excitation série ne peut fonctionner qu'en charge.

b) Machine à excitation shunt ou (dérivation) :

Le schéma électrique du moteur shunt est représenté par la figure suivante

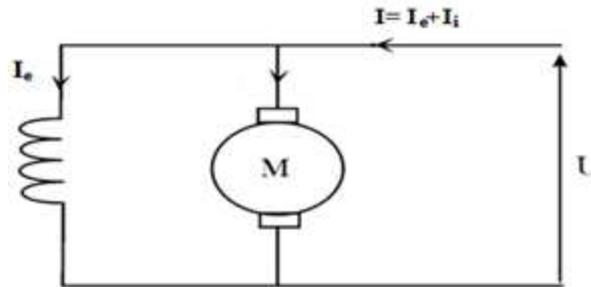


Figure I.8 : Machine à excitation shunt

Dans le moteur shunt le stator est monté en parallèle avec le rotor, donc la tension aux bornes du rotor est la même que celle aux bornes du stator.

$$U_i = U_e = U \tag{I.9}$$

Les équations de la machine deviennent :

$$U = E + R_i i_i \tag{I.10}$$

$$C = K_m \Phi i \tag{I.11}$$

c) Machine à excitation indépendante :

Le schéma électrique d'un moteur à excitation indépendante est représenté par la figure suivante :

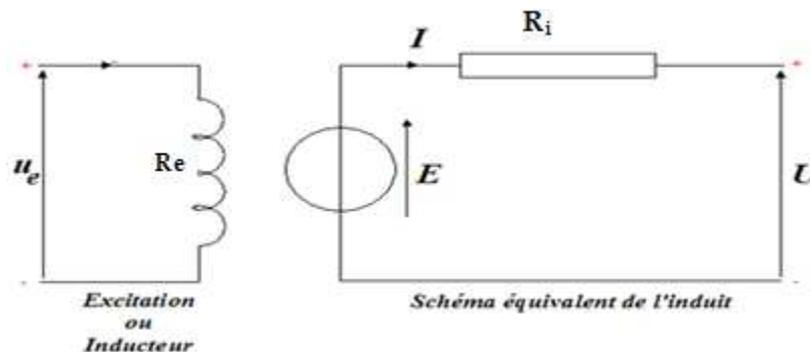


Figure I.9 : machine à excitation indépendante

Dans ce type de la machine l'alimentation du stator est indépendante de celle du rotor.

Les équations de la machine deviennent :

$$U = E + R_i i_i \quad (\text{I.12})$$

$$E = K_e \Phi \Omega \quad (\text{I.13})$$

$$C = K_m \Phi i \quad (\text{I.14})$$

Le flux magnétique est créé indépendamment de la tension de l'induit, Il faut pour cela deux sources séparées, une pour alimenter l'inducteur et créer le flux, l'autre pour alimenter l'induit. L'induit est représenté par un rotor tournant alimenté par les balais.

d) Moteur à excitation compound ou composée :

Le schéma électrique du moteur à excitation compound est représenté par la figure suivante :

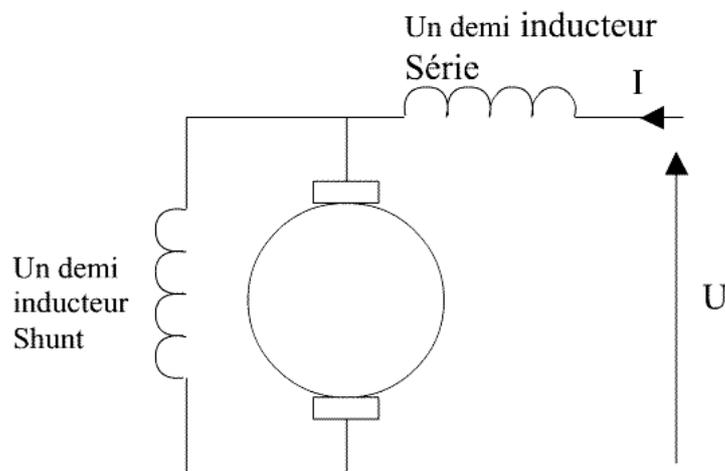


Figure I.10: machine à excitation compound

Ce moteur est utilisé dans des machines dont les charges sont irrégulières, ce moteur pourrait être appelé série-shunt, En effet sa caractéristique est d'avoir deux inducteurs.

- l'un est en série avec l'induit.
- l'autre en parallèle avec le groupe induit + inducteur 1.

Une augmentation de la charge, implique une diminution de la vitesse donc une augmentation du courant d'induit, ce courant traverse également un des inducteurs et augmente ainsi le flux magnétique (donc le couple).

La vitesse de ce type de moteur est relativement constante quelque soit la charge, Il a un bon couple au démarrage.

I.4. Comparaison entre les différents types machine : voir le tableau (1-1)

TYPE DE MOTEUR	PARTICULARITES	AVANTAGE	EMPLOI
Excitation séparée	Le circuit inducteur est alimenté par une source séparée.	Vitesse constante quelque soit la charge	Utilisé sur les dispositifs à vitesse variable
Excitation Dérivation	Vitesse constante quelque soit la charge		
Excitation Série	Inducteur monté en série avec l'induit	Fort couple de démarrage	Utilisé en traction électrique
Excitation composée	C'est une combinaison des deux cas précédents		

Tableau(1-1)

I-5. Le fonctionnement de la machine à courant continu dans les quatre quadrants est représenté dans la figure suivante :

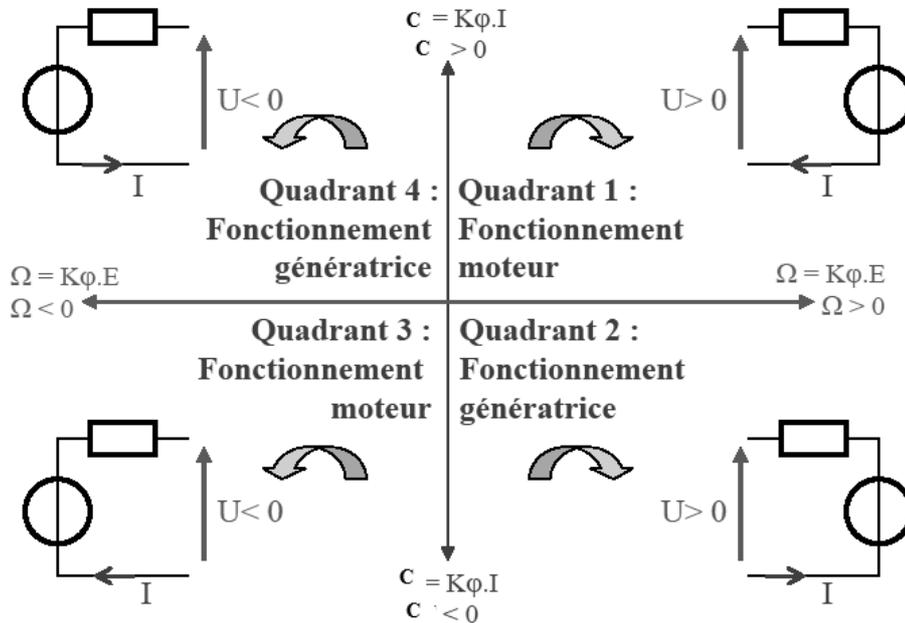


Figure I.11: la machine à courant continu dans les quatre quadrants

Avec :

Ω : vitesse de rotation [tr/min]

C : couple électromagnétique [N.m]

Quadrant 1 : fonctionnent moteur on a : $U > 0$ et $\Omega > 0$, $C > 0$

Quadrant 2 : fonctionnement en génératrice on a : $U > 0$ et $C < 0$, $\Omega > 0$

Quadrant 3 : moteur tournant dans le sens inverse: $U < 0$ et $\Omega < 0$, $C < 0$

Quadrant 4 : génératrice tournant à l'inverse $U < 0$ et $\Omega > 0$, $C > 0$.

En moteur (quadrant 1 et 3), la machine fournit reçoit de la puissance mécanique à l'appareil qu'elle entraîne.

En génératrice (quadrant 2 et 4), la machine reçoit de la puissance de cet appareil, elle le freine. Cette puissance est renvoyée, aux pertes près, dans la source électrique : c'est freinage avec récupération d'énergie.

Dans le présent travail, on s'intéressera au moteur à excitation séparée.

I.6. Moteur à excitation séparée

Le circuit électrique de ce moteur est représenté à la figure I.12

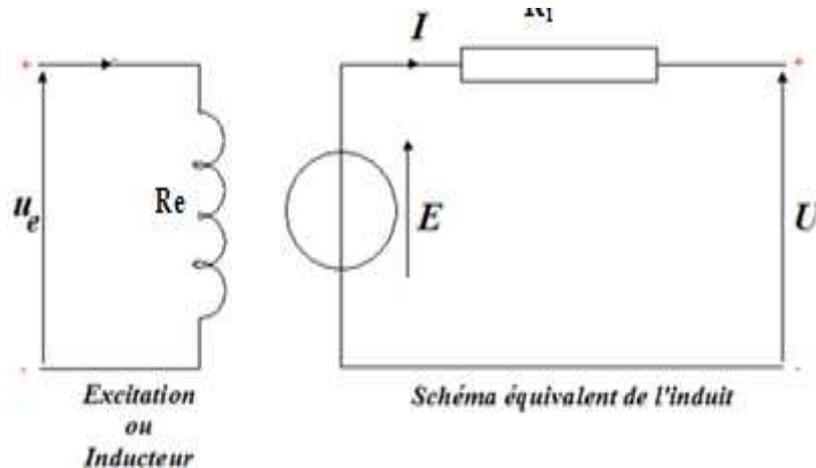


Figure I.12: Circuit équivalent du moteur à excitation séparée.

Dans ce type de moteur, l'alimentation du stator est indépendante de celle du rotor et la caractéristique statique montre une vitesse quasi constante.

Le flux magnétique est créé indépendamment de la tension de l'induit. Pour cela, il faut prévoir deux sources séparées; une pour alimenter l'inducteur et créer le flux, l'autre pour alimenter l'induit.

I.7. Caractéristiques d'un moteur à courant continu

Les moteurs à courant continu sont classés selon la manière dont sont raccordés les circuits d'excitations et d'induits.

I.7.1. Caractéristique mécanique

On appelle caractéristique mécanique la courbe du couple sur l'arbre du moteur en fonction de la vitesse. A chaque tension d'induit correspond une droite dont la pente ne dépend que de l'excitation. [3]

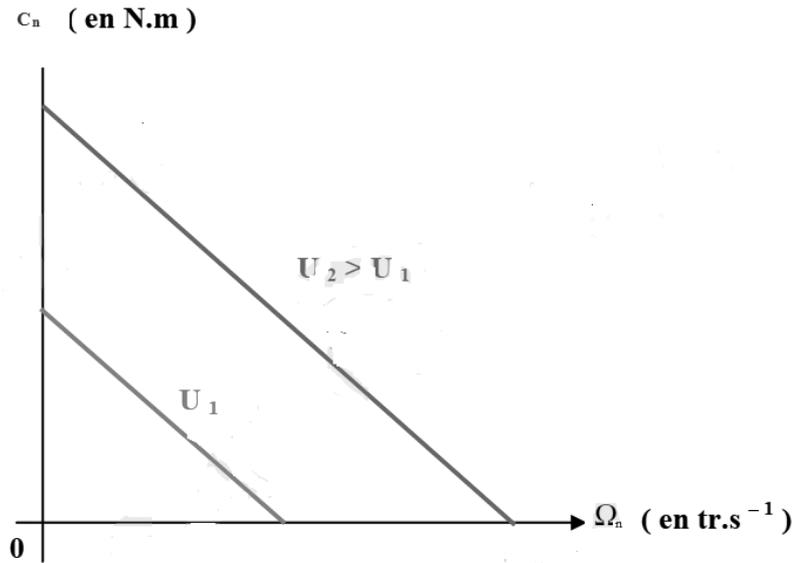


Figure 1.13 : Caractéristique du moteur à courant continu.

I.7.2. Point de fonctionnement

A vide, le couple utile est nul et la vitesse à vide est donnée par:

$$\Omega = \frac{U}{K} \quad (\text{I.15})$$

Au démarrage, la vitesse de rotation est nulle, la f.é.m. aussi et l'intensité imposée par la charge est, en général, trop importante pour l'enroulement de l'induit.

[3]

Pour que le moteur puisse entraîner cette charge il doit fournir un couple utile C_u tel que :

$$C_u = C_r \quad (\text{I.16})$$

C'est cette dernière égalité qui représente le point de fonctionnement de l'ensemble moteur plus charge.

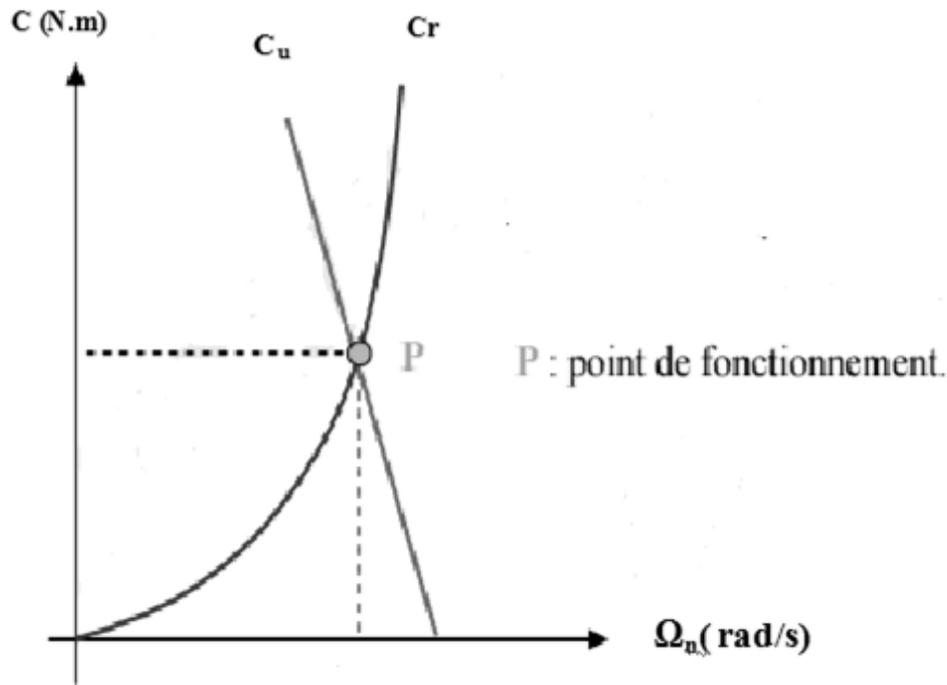


Figure I.14 : Point de fonctionnement du système: moteur plus charge.

I.8. Avantages et inconvénients des moteurs à courant continu

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

Le principal problème de ces machines vient de la liaison entre les balais, ou « charbons » et le collecteur rotatif, ainsi que le collecteur lui-même comme indiqué plus haut et la complexité de sa réalisation. De plus il faut signaler que :

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

- un autre problème limite les vitesses d'utilisation élevées de ces moteurs lorsque le rotor est bobiné, c'est le phénomène de défrettage, la force centrifuge finit par casser les liens assurant la tenue des ensembles de spires.

Un certain nombre de ces inconvénients ont partiellement été résolus par des réalisations de moteurs sans fer au rotor, comme les moteurs "disques" ou les moteurs « cloches », qui néanmoins possèdent toujours des balais.

Les inconvénients ci-dessus ont été radicalement éliminés grâce à la technologie du moteur *brushless*, dénommé aussi "moteur à courant continu sans balais", ou moteur sans balais. [5]

I.9. Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons exposé, la constitution, le principe de fonctionnement, les caractéristiques statiques ainsi que les avantages et inconvénients de l'utilisation des moteurs à courant continu.

Dans le prochain chapitre, nous allons modéliser le système afin d'avoir un modèle de commande servant à la synthèse d'une loi de commande pour piloter le moteur.

II.1. Introduction

En général, les moteurs à courant continu sont connus par leurs enroulements et leurs géométries pour se prêter à une analyse tenant-compte de leurs configurations exactes, on doit donc développer pour chaque type un modèle dont le comportement soit le plus proche possible du modèle réel.

La modélisation de l'ensemble: moteur plus hacheur MLI est considérée comme phase initiale. Elle permet en effet de déterminer le modèle du procédé qui sera utilisé pour prédire son comportement futur. C'est aussi une phase primordiale pour l'observation et l'analyse de l'évolution des grandeurs électromécaniques d'une part, et d'autre part pour l'élaboration des lois de commande.

La figure II.1 représente un schéma simplifié du système global où figure le moteur ainsi que le hacheur MLI.

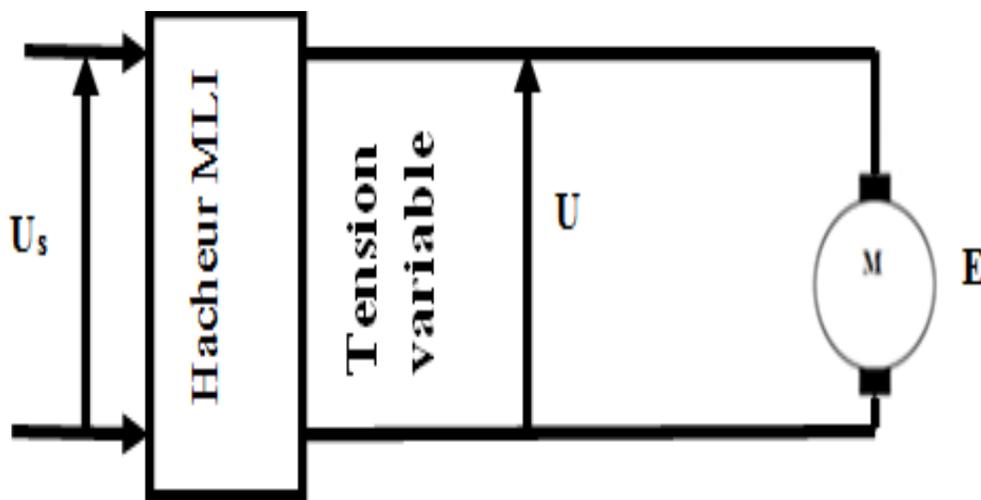


Figure II.1: Schéma du système simplifié.

Sur la figure ci-dessus:

U_s : est la tension d'entrée du hacheur MLI,

U : est la tension d'alimentation de l'induit (sortie du hacheur),

E : est la force contre électromotrice du moteur.

II.2. Modélisation de moteur à courant continu

Le circuit d'induit peut être représenté comme suit (figure II.2):

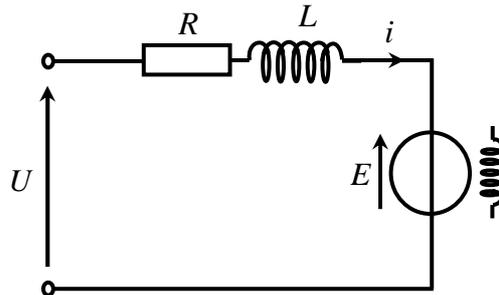


Figure II.2: Circuit d'induit.

L'application des lois de Kirchhoff au circuit de la figure II.2, permet d'écrire:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = U - E \quad (\text{II.1})$$

La force contre électromotrice E s'exprime par:

$$E = K\Omega \quad (\text{II.2})$$

Où: K est la constante de vitesse qui est fonction de l'excitation.

Les expressions (II.1) et (II.2) conduisent à:

$$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L}i - \frac{K}{L}\Omega + \frac{1}{L}U \quad (\text{II.3})$$

L'application de la deuxième loi de Newton, relative au mouvement de rotation d'un solide, à l'induit du moteur permet d'écrire

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C - C_f - C_r \quad (\text{II.4})$$

Où: C est le couple électromagnétique développé par l'arbre du moteur en [N.m], il dépend directement du courant selon la relation suivante:

$$C = K \cdot i \quad (\text{II.5})$$

C_r est le couple de charge en [N.m],

C_f est le couple des frottements visqueux en [N.m], il dépend directement de la vitesse selon l'équation suivante:

$$C_f = f \Omega \quad (\text{II.6})$$

Les équations (II.4), (II.5) et (II.6) conduisent à l'équation suivante:

$$\frac{d\Omega}{dt} = -\frac{f}{J}\Omega + \frac{K}{J}i - \frac{1}{J}C_r \quad (\text{II.7})$$

Les grandeurs $x_1 = \Omega$ et $x_2 = i$ peuvent être choisies comme variables d'état mesurables. La tension U est l'entrée de commande et C_r est une perturbation aléatoire.

La sortie du système est la vitesse $y = \Omega$. Dans ce cas, les équations (II.2) et (II.7) peuvent se réécrire comme suit:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{f}{J}x_1 + \frac{K}{J}x_2 - \frac{1}{J}C_r \\ \dot{x}_2 = -\frac{K}{L}x_1 - \frac{R}{L}x_2 + \frac{1}{L}U \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Ou encore sous forme de représentation d'état linéaire :

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU + \bar{B}C_r \\ y = CX \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Où : les matrices A, B, C et \bar{B} sont tels que:

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{f}{J} & \frac{K}{J} \\ -\frac{K}{L} & -\frac{R}{L} \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{pmatrix}, C = (1 \ 0) \text{ et } \bar{B} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{J} \\ 0 \end{pmatrix}.$$

II.3. Modélisation du hacheur MLI

Le hacheur MLI (modulation de largeur d'impulsion) est un dispositif électronique de puissance servant à moduler la tension d'entrée qui est souvent fixe pour délivrer en sortie une tension continue variable (positive ou négative) selon la fonction de modulation choisie (figure II.3). [9]

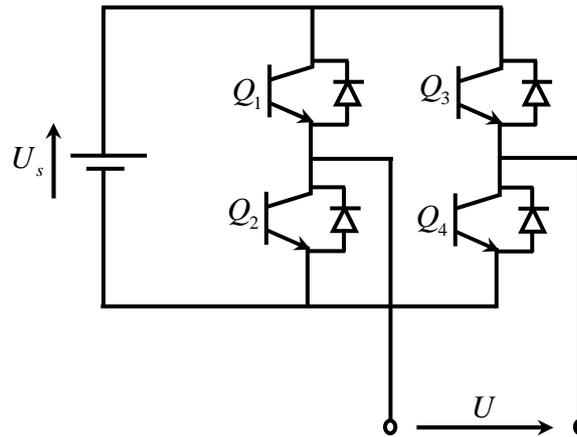


Figure II.3: Hacheur quatre quadrants.

En commande numérique (pseudo-continue), il est préférable d'utiliser la MLI calculée qui consiste à calculer le rapport cyclique μ , au début de chaque instant d'échantillonnage comme suit:

$$\mu = \frac{U}{U_s} \quad (\text{II.10})$$

Afin de compléter la logique d'ouverture –fermeture des valves de puissance, le dispositif de commande du hacheur détermine la durée de fermeture t_{on} (largeur d'impulsion) des valves selon la formule ci-dessous:

$$t_{on} = \mu T_s \quad (\text{II.11})$$

Où: T_s est la période de hachage du hacheur.

La figure II.4 représente l'allure de la tension et des impulsions dans la technique de modulation calculée.

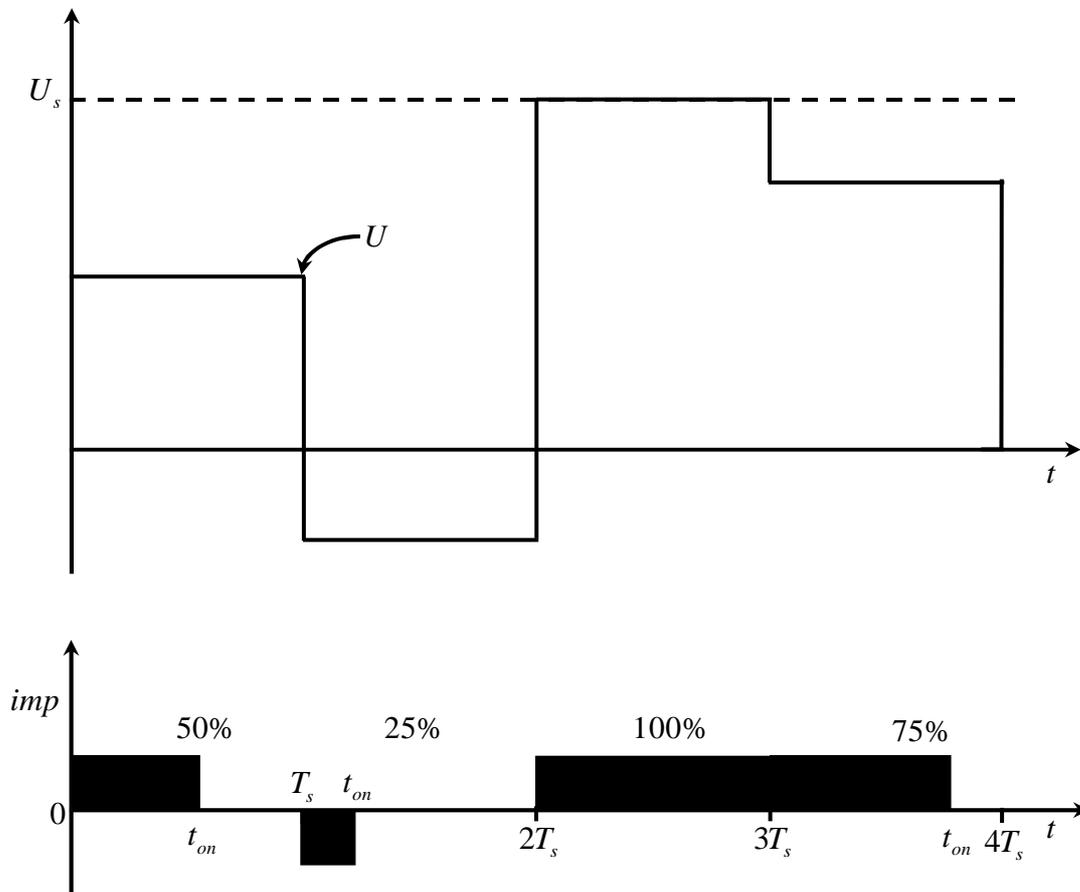


Figure II.4: Modulation de largeur d'impulsion calculée.

II.4. Conclusion

Le présent chapitre a été consacré à la modélisation de l'ensemble: moteur équipé du hacheur MLI. L'application des lois de Kirchhoff au circuit électrique et la deuxième loi de Newton à la partie mécanique a permis d'établir une représentation d'état linéaire du moteur. Quant au hacheur MLI, il a été modélisé par une fonction de modulation concrétisée par un rapport cyclique calculé.

III.1. Introduction

Après avoir modélisé le système composé du moteur à courant continu et du hacheur à MLI, il y a lieu d'expliciter le cahier des charges et de synthétiser des lois de commande qui servent au pilotage du système.

Deux techniques de commandes seront testées par simulation puis comparées en termes de performances dynamique et statique.

N.B : pour des raisons de simulation, nous avons élaboré un programme **Matlab** déroulant la méthode de Butcher-Boule pour la résolution de l'équation d'état.

III.2. Réponse du système en boucle ouverte

Si la tension d'alimentation délivrée par le hacheur est constante (train d'impulsions régulier), alors on dira que le moteur fonctionne en boucle ouverte, c'est-à-dire celui n'est pas commandé.

Dans ce qui suit, nous supposons que le pré actionneur (le hacheur) est à réponse très rapide et que les pertes par commutation des interrupteurs de puissance sont négligeables. De plus, la tension d'entrée du hacheur est supposée être constante.

Les valeurs des paramètres de simulation ainsi que les caractéristiques du système sont données ci-dessous (plaque signalétique d'un **moteur E-tek de Briggs & Stratton**) :

Tension nominale: 48V ,

Courant nominal: 100 A ,

Puissance nominale: 5 KW ,

Courant maximal: 500 A pendant 1 min ,

Vitesse nominale: 500 tr / min ,

Rendement: 88% minimum,

Couple nominal: 8.4 N.m ,

Poids: 10 Kg ,

Moment d'inertie de l'arbre: $J = 0.267\text{ Kg.m}^2$,

Coefficient de frottement visqueux: $f = 0.0167\text{ Kg.s}^{-1}$,

Résistance d'induit: $R = 0.6\Omega$,

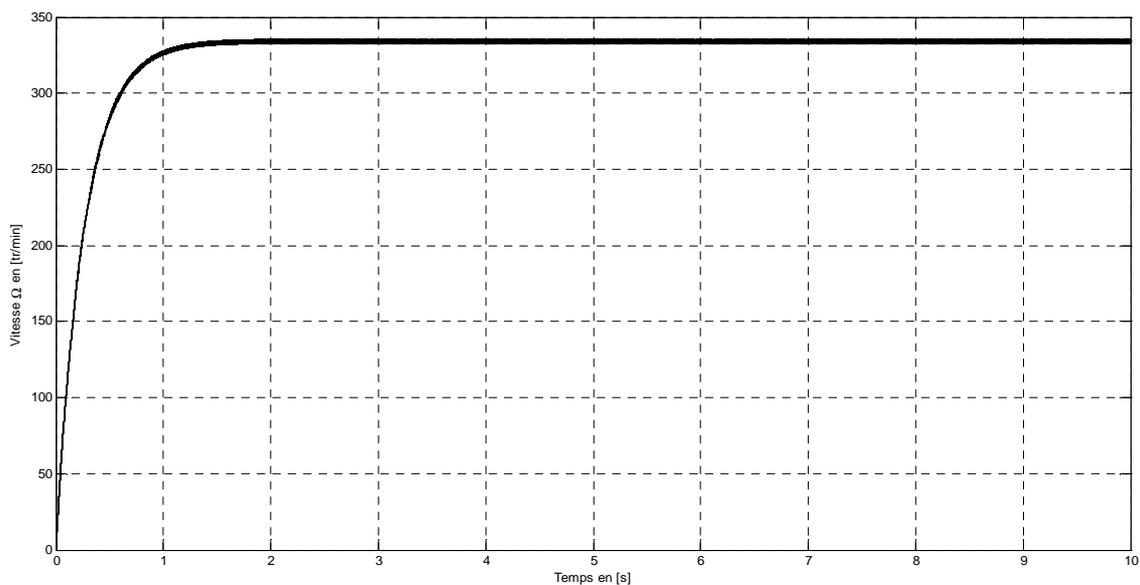
Inductance d'induit: $L = 0.012\text{ H}$,

Constante de couple (ou de vitesse): $K = 0.8$,

Fréquence de hachage: $f_{dec} = 1.0\text{ KHz}$,

Tension d'entrée du hacheur : $U_s = 48\text{ V}$

La figure III.1 représente la réponse du système pour une tension d'alimentation de $U = 24\text{ V}$.



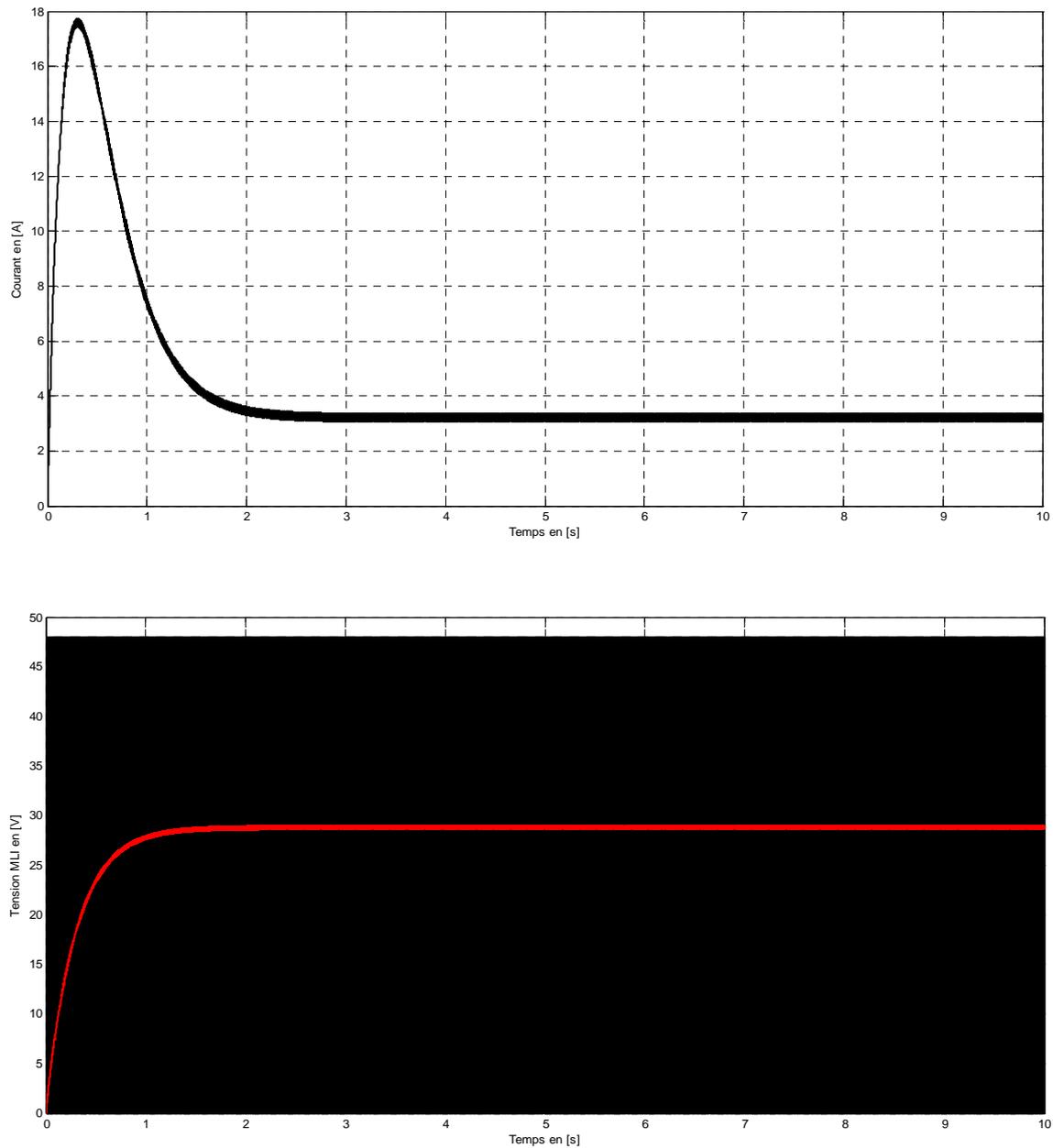


Figure III.1: Réponse du système en boucle ouverte.

N.B : le graphe en rouge représente la moyenne tension de la tension MLI.

III.3. Cahier des charges

Les moteurs à courant continu à moyenne puissance, sont souvent utilisés en industrie d'usinage (fraisage, tournage, polissage...etc.) comme entraînements réglés, et ce dans l'objectif de régler la vitesse ou le couple. Pour cette étude, on se propose de **régler la vitesse de rotation du moteur.**

En effet, celle-ci doit poursuivre la trajectoire de référence de la figure III.2.

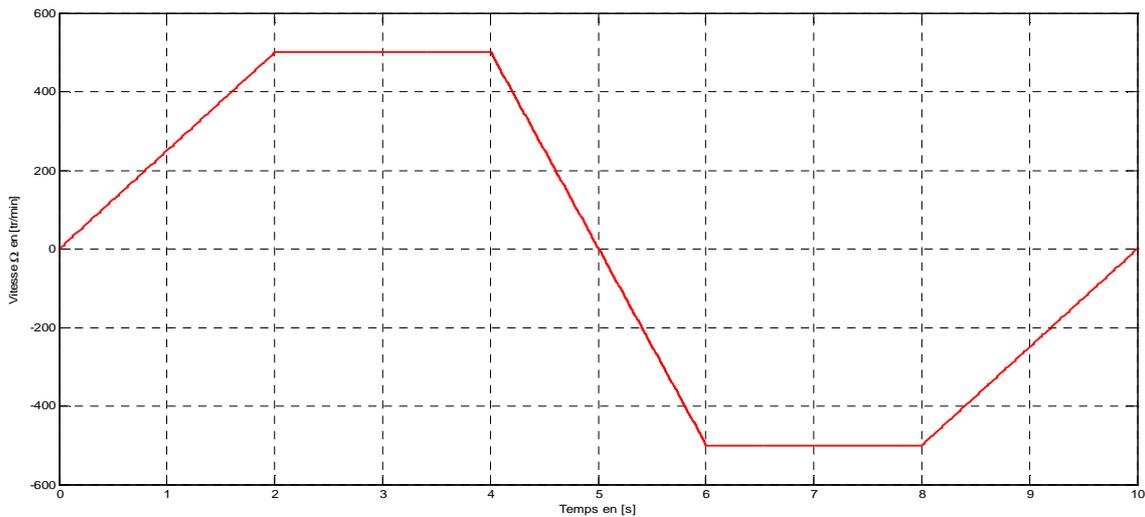


Figure III.2: Evolution de la vitesse de référence.

III.4. Commande par PI

La commande par PI est l'une des commandes conventionnelles les plus utilisée en industrie. Le régulateur assure, pour un point de fonctionnement donné, une régulation avec une erreur statique nulle. [7]

La loi de commande est donnée par l'expression suivante:

$$U = k_p (\Omega_{ref} - \Omega) + k_i \int_0^t (\Omega_{ref} - \Omega) d\tau \quad (\text{III.1})$$

Où: k_p et k_i sont, respectivement, les gains proportionnel et intégral du régulateur PI.

Le fonctionnement du système est testé dans trois situations différentes à savoir:

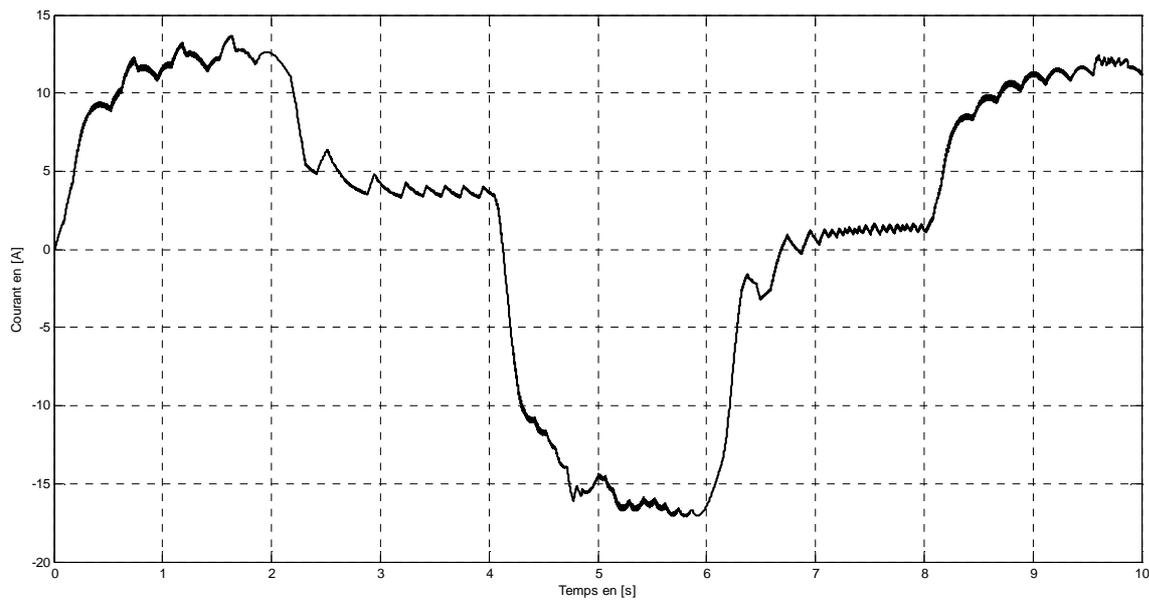
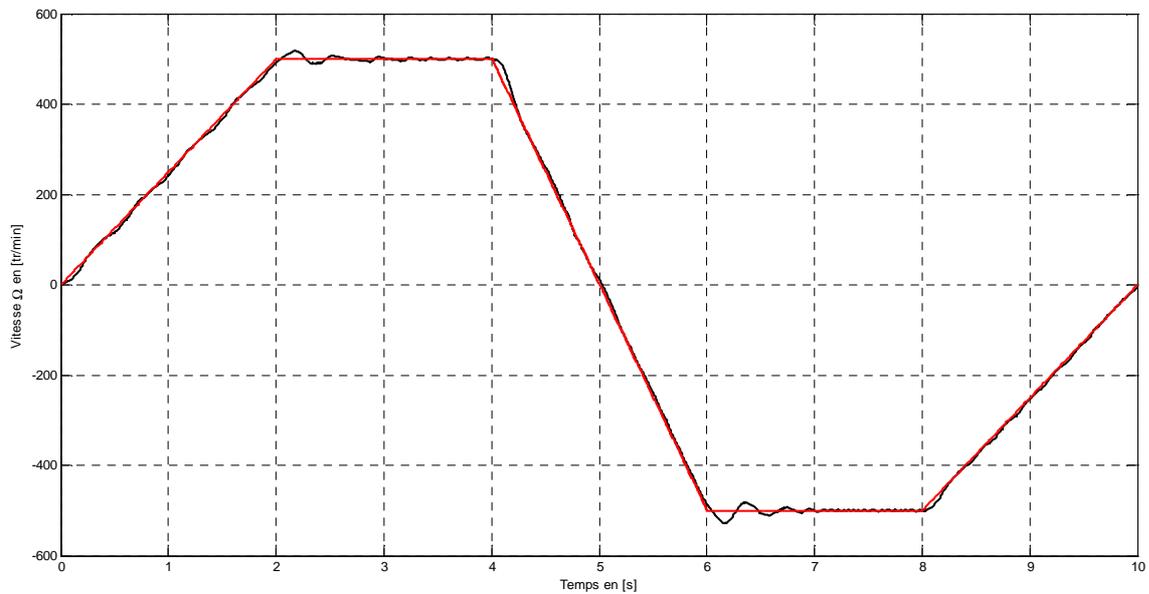
Situation 1: aucune perturbation n'est considérée.

Situation 2: le couple de charge (résistant) atteint une valeur de 10 N.m entre les instants: 2.2 s et 3.5 s.

Situation 3: des incertitudes de modélisation de 30% sur la résistance et l'inductance de l'induit sont considérées.

Dans le cas de la commande PI, les résultats de simulation sont donnés aux figures III.3, III.4 et III.5.

Les gains qui ont donné satisfaction sont tels que : $k_p = 5$ et $k_i = 500$.



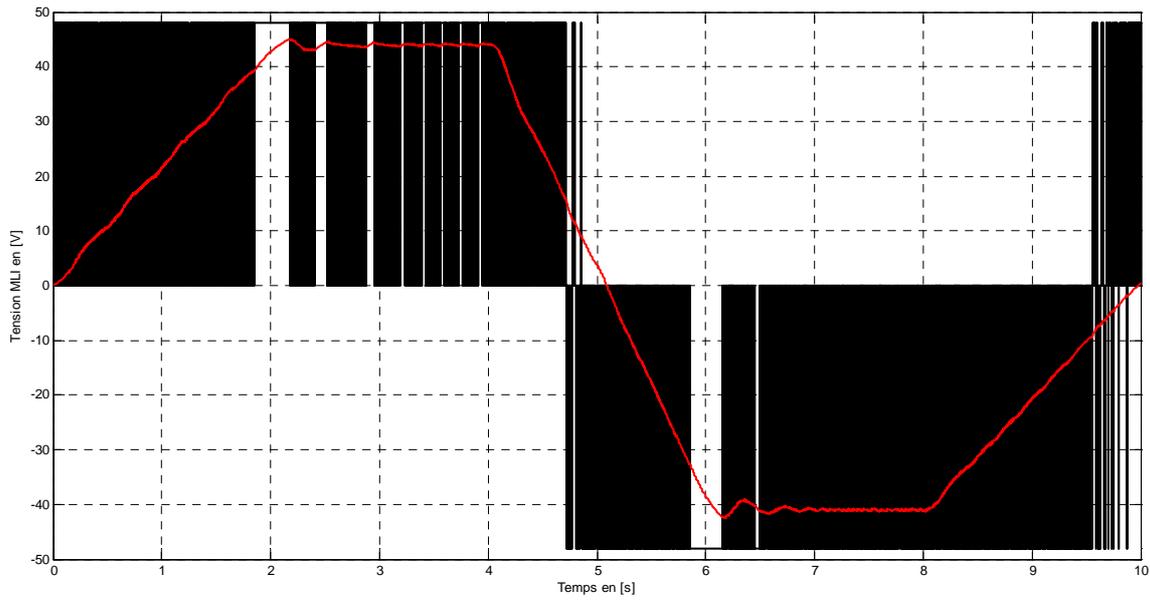
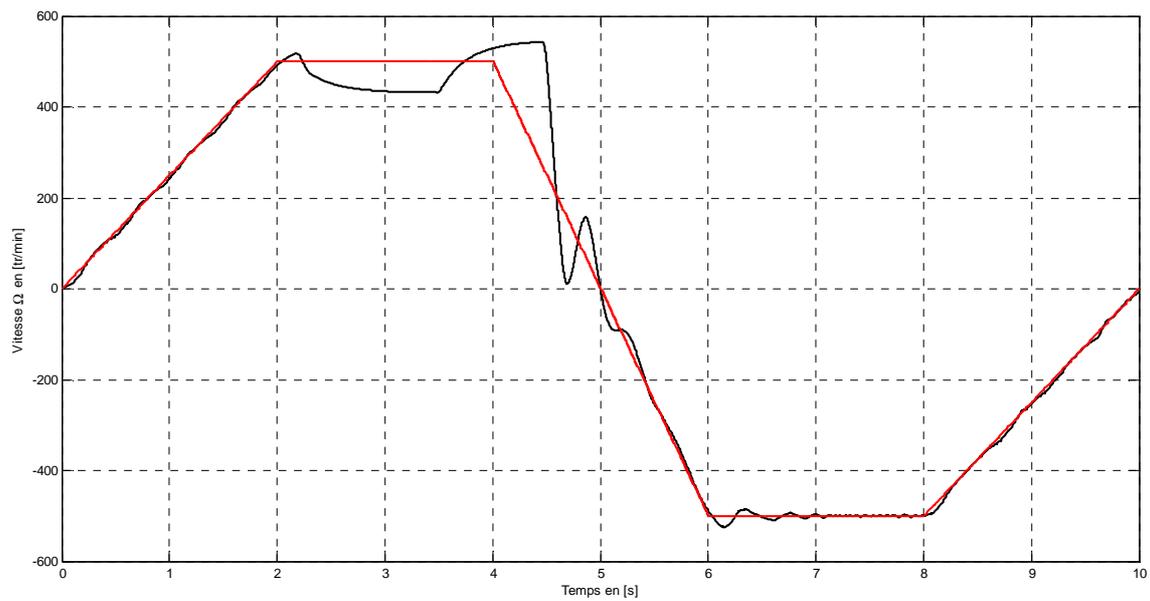


Figure III.3: Réponse du système commandé par PI en situation 1.



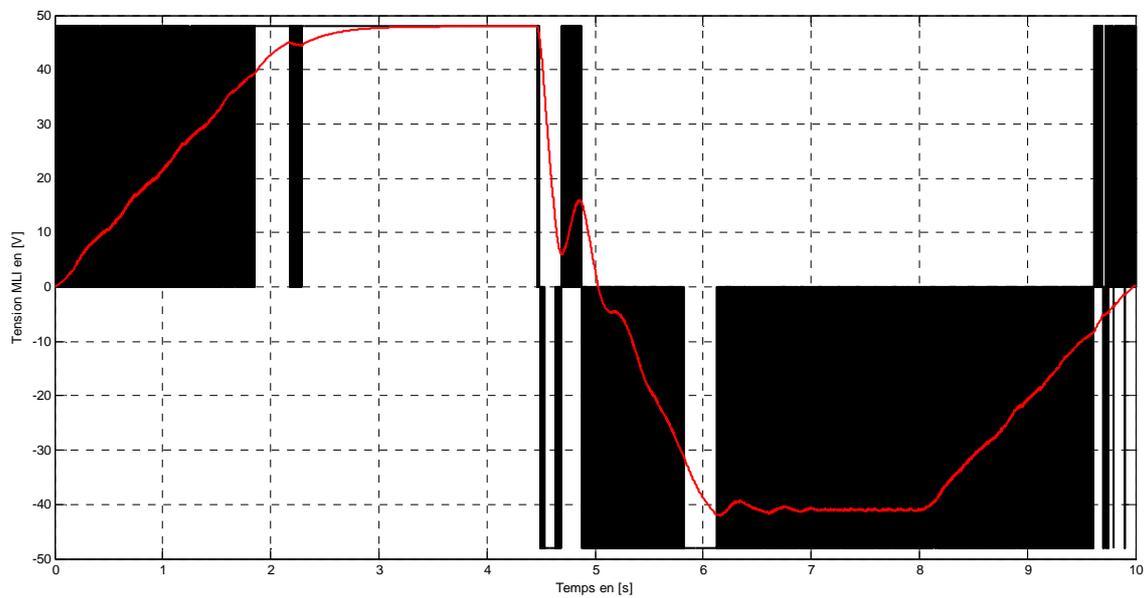
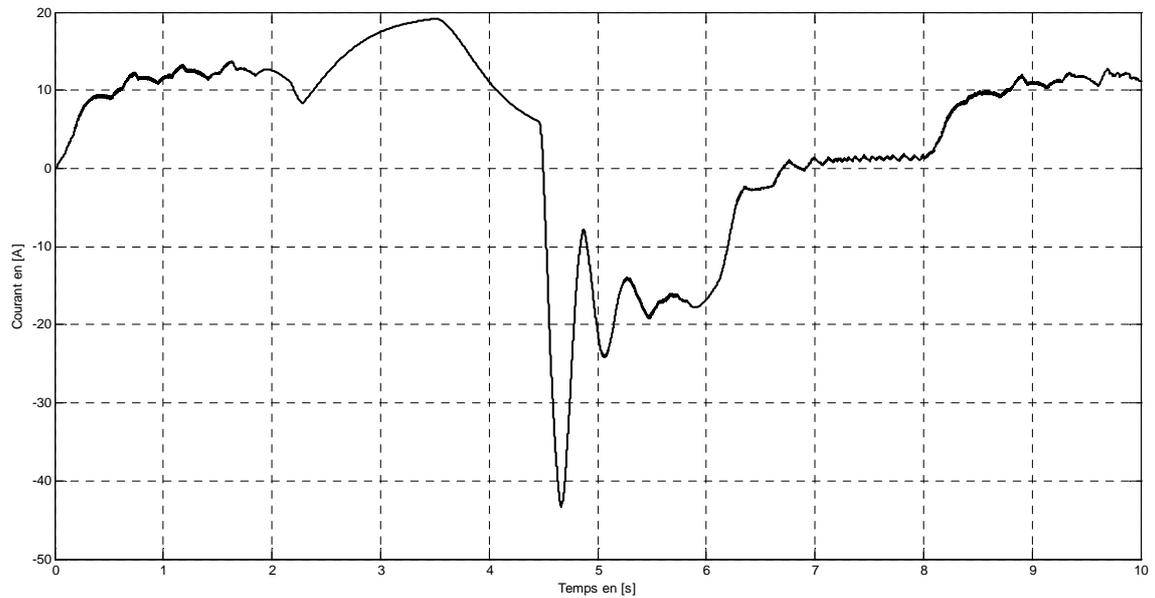


Figure III.4: Réponse du système commandé par PI en situation 2.

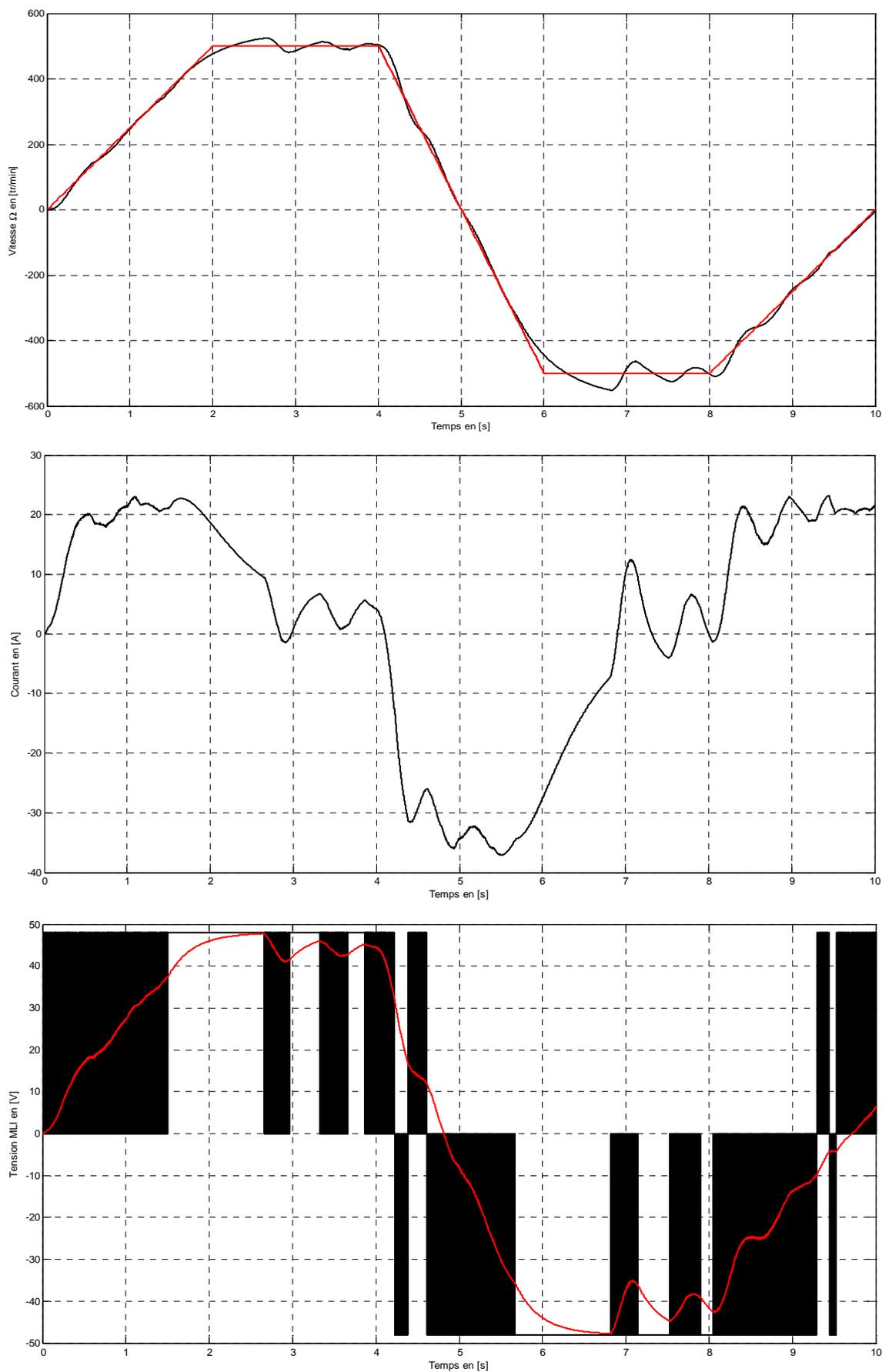


Figure III.5: Réponse du système commandé par PI en situation 3.

III.5. Commande par modes glissants

Les modes glissants est un mode de fonctionnement particulier des systèmes à structure variable. La théorie de ces systèmes a été étudiée et développée en ex Union Soviétique, tout d'abord par le professeur Emelyanov, puis par d'autres collaborateurs également Utkin, en s'inspirant des résultats des études du mathématicien Filipov sur les équations différentielles à second membre discontinu. Ensuite, les travaux ont été repris aux Etats-Unis par Slotine, et au Japon par Young, Harashima et Hashimoto. Ce n'est qu'à partir des années quatre-vingt que la commande par modes de glissants des systèmes est devenue intéressante et attractive. Elle est considérée comme l'une des approches les plus simples pour la commande des systèmes non linéaires et les systèmes ayant un modèle imprécis. [12]

En se basant sur le modèle du système donné au chapitre précédent, et d'après le cahier des charges, la surface de glissement peut être choisie comme suit:

$$s = \dot{e} + \lambda e \quad (\text{III.2})$$

Où: e est l'erreur de poursuite en vitesse. Elle est définie par l'expression:

$$e = (x_{1ref} - x_1) \quad (\text{III.3})$$

La condition d'attractivité et d'invariance peut s'écrire:

$$\dot{s} = -k_s \text{sign}(s) - k_d s \quad (\text{III.4})$$

Où: k_d et k_s sont des gains de conception positifs.

L'exploitation des équations (III.2) et (III.4) entraîne:

$$\ddot{e} = -\lambda \dot{e} - k_s \text{sign}(s) - k_d s \quad (\text{III.5})$$

En posant $d = -\frac{1}{J} C_r$ qui représente le terme de perturbation. Cette dernière est supposée être bornée. De plus, sa dérivée aussi est supposée bornée. Autrement dit, il existe deux réels d_1 et d_2 strictement positifs tels que:

$$\begin{cases} |d| < d_1 \\ |\dot{d}| < d_2 \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

L'équation (II.8) peut se réécrire comme suit:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{f}{J}x_1 + \frac{K}{J}x_2 + d \\ \dot{x}_2 = -\frac{K}{L}x_1 - \frac{R}{L}x_2 + \frac{1}{L}U \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Les expressions (III.3) et (III.6) conduisent à

$$\ddot{e} = \ddot{x}_{1ref} - \left(\frac{f^2}{J^2} - \frac{K^2}{JL} \right) x_1 + \left(\frac{fK}{J^2} + \frac{KR}{JL} \right) x_2 + \left(\frac{f}{J}d - \dot{d} \right) - \frac{K}{JL}U \quad (\text{III.8})$$

En remplaçant \ddot{e} dans (III.8) par son expression (III.5), on obtient l'expression suivante:

$$U = \frac{JL}{K} \left(\ddot{x}_{1ref} - \left(\frac{f^2}{J^2} - \frac{K^2}{JL} \right) x_1 + \left(\frac{fK}{J^2} + \frac{KR}{JL} \right) x_2 + \left(\frac{f}{J}d - \dot{d} \right) + \lambda \dot{e} + k_s \text{sign}(s) + k_d s \right) \quad (\text{III.9})$$

La loi de commande est donnée par l'expression suivante:

$$U = \frac{JL}{K} \left(\ddot{x}_{1ref} - \left(\frac{f^2}{J^2} - \frac{K^2}{JL} \right) x_1 + \left(\frac{fK}{J^2} + \frac{KR}{JL} \right) x_2 + \lambda \dot{e} + k_s \text{sign}(s) + k_d s \right) \quad (\text{III.10})$$

Où: le gain robuste k_s vérifie la condition de robustesse suivante:

$$k_s \geq \frac{f}{J}d_1 + d_2 \quad (\text{III.11})$$

Afin de prouver la stabilité et la robustesse de la loi de commande (III.10), on choisit la fonction de Lyapunov définie positive F suivante:

$$F = \frac{1}{2}s^2 \quad (\text{III.12})$$

Sa dérivée par rapport au temps est donnée par:

$$\dot{F} = s\dot{s} \quad (\text{III.13})$$

Ou encore,

$$\dot{F} = s(\ddot{e} + \lambda\dot{e}) \quad (\text{III.14})$$

En utilisant (III.8) et (III.9), il en résulte

$$\dot{F} = s \left(\left(\frac{f}{J} d - \dot{d} \right) - k_s \text{sign}(s) - k_d s \right) \quad (\text{III.15})$$

La dérivée \dot{F} peut être majorée comme suit:

$$\dot{F} \leq \left(\frac{f}{J} d_1 + d_2 - k_s \right) |s| - k_d s^2 \quad (\text{III.16})$$

Comme k_s vérifie la condition (III.11), l'inégalité (III.16) conduit à

$$\dot{F} \leq -k_d s^2 \quad (\text{III.17})$$

Ou alors,

$$\dot{F} \leq -2k_d F \quad (\text{III.18})$$

L'intégration de l'inéquation différentielle (III.17) donne:

$$F(t) \leq F(0) \cdot e^{-2k_d t} \quad (\text{III.19})$$

Ce qui implique que:

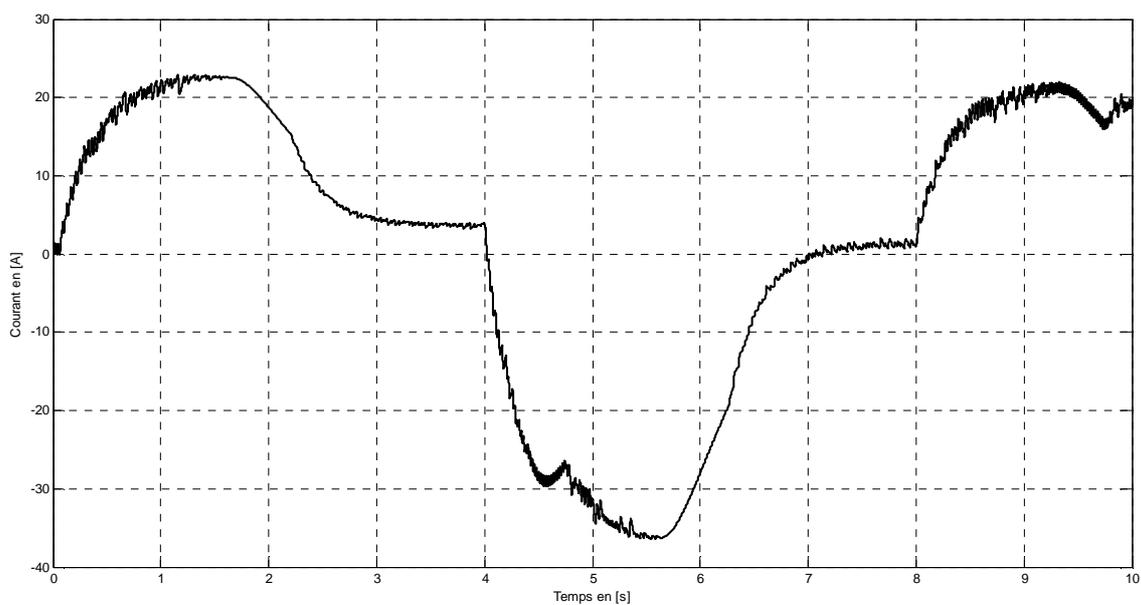
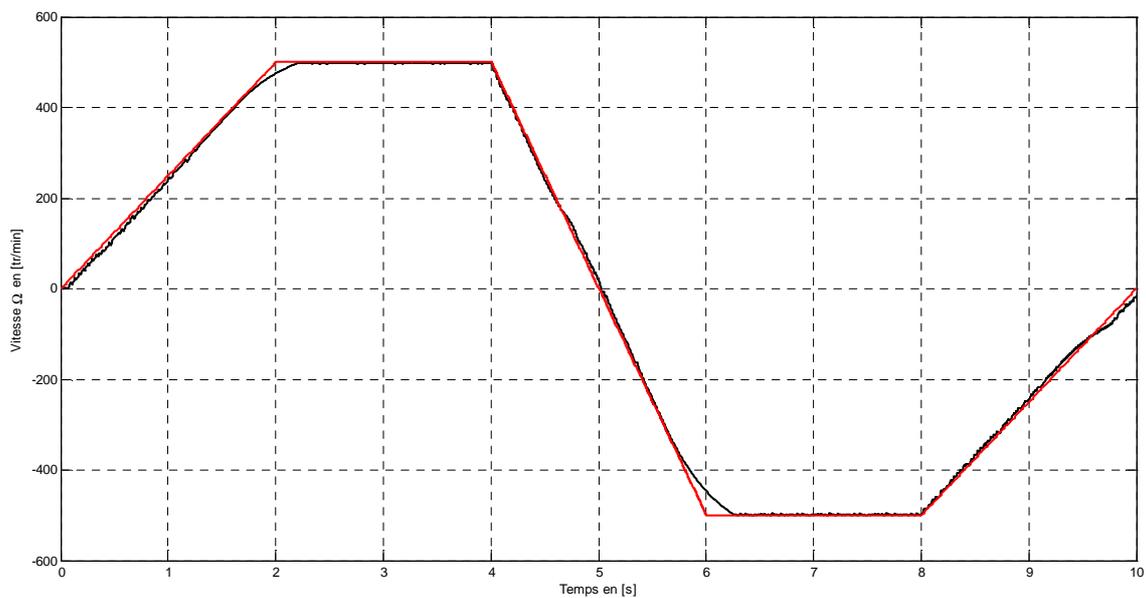
$$\lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = 0 \quad (\text{III.20})$$

Cela veut dire que $\lim_{t \rightarrow \infty} s(t) = 0$, par conséquent, l'erreur de poursuite en vitesse $e(t)$ converge asymptotiquement vers zéro.

N.B: afin d'adoucir la commande et réduire le broutement, la fonction $sign(s)$ peut être remplacée par la fonction tangente hyperbolique $\tanh(s)$.

Dans le cas de la commande par modes glissants, les résultats de simulation sont donnés aux figures III.6, III.7 et III.8.

Les gains qui ont donné satisfaction sont tels que: $\lambda = 100$, $k_s = 12$ et $k_d = 1000$.



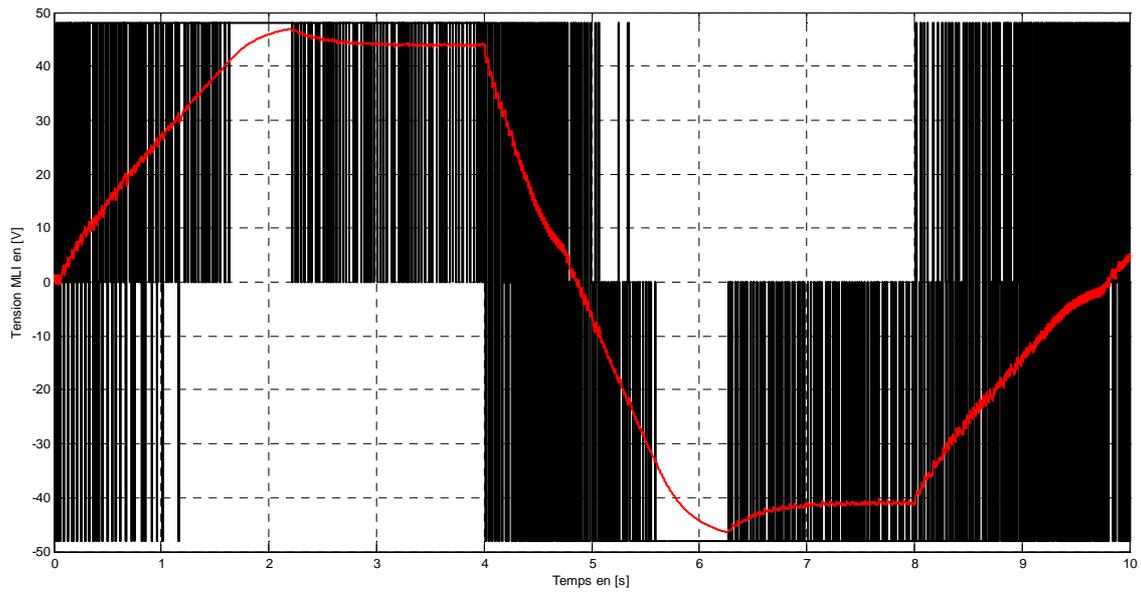
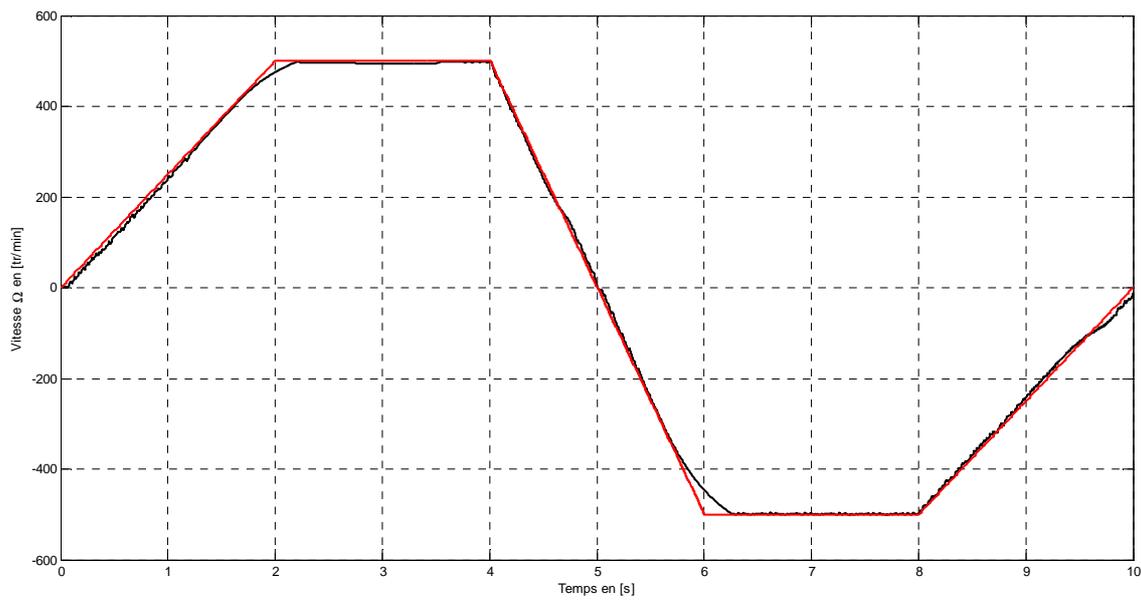


Figure III.6: Réponse du système commandé par modes glissants en situation 1.



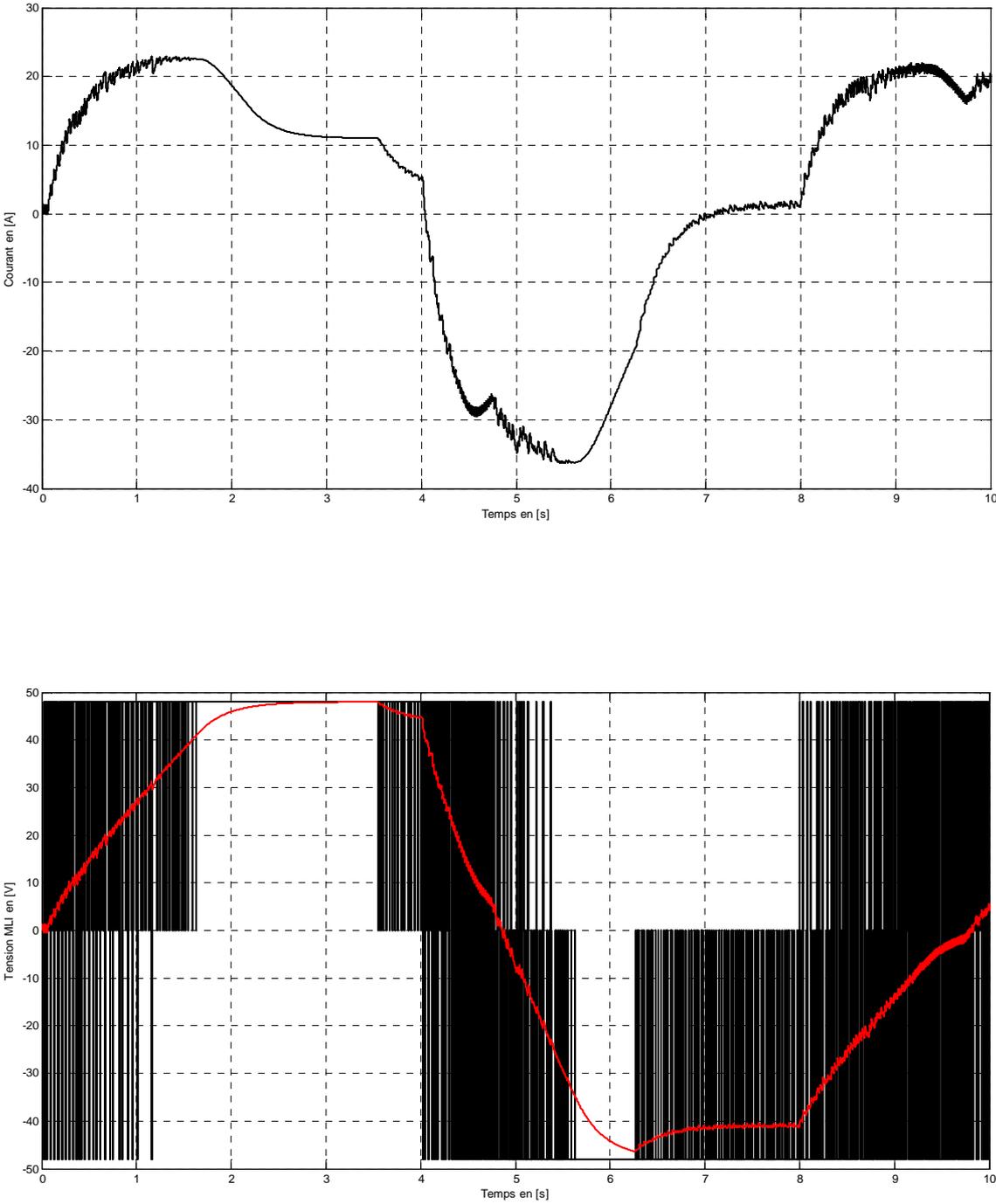


Figure III.7: Réponse du système commandé par modes glissants en situation 2.

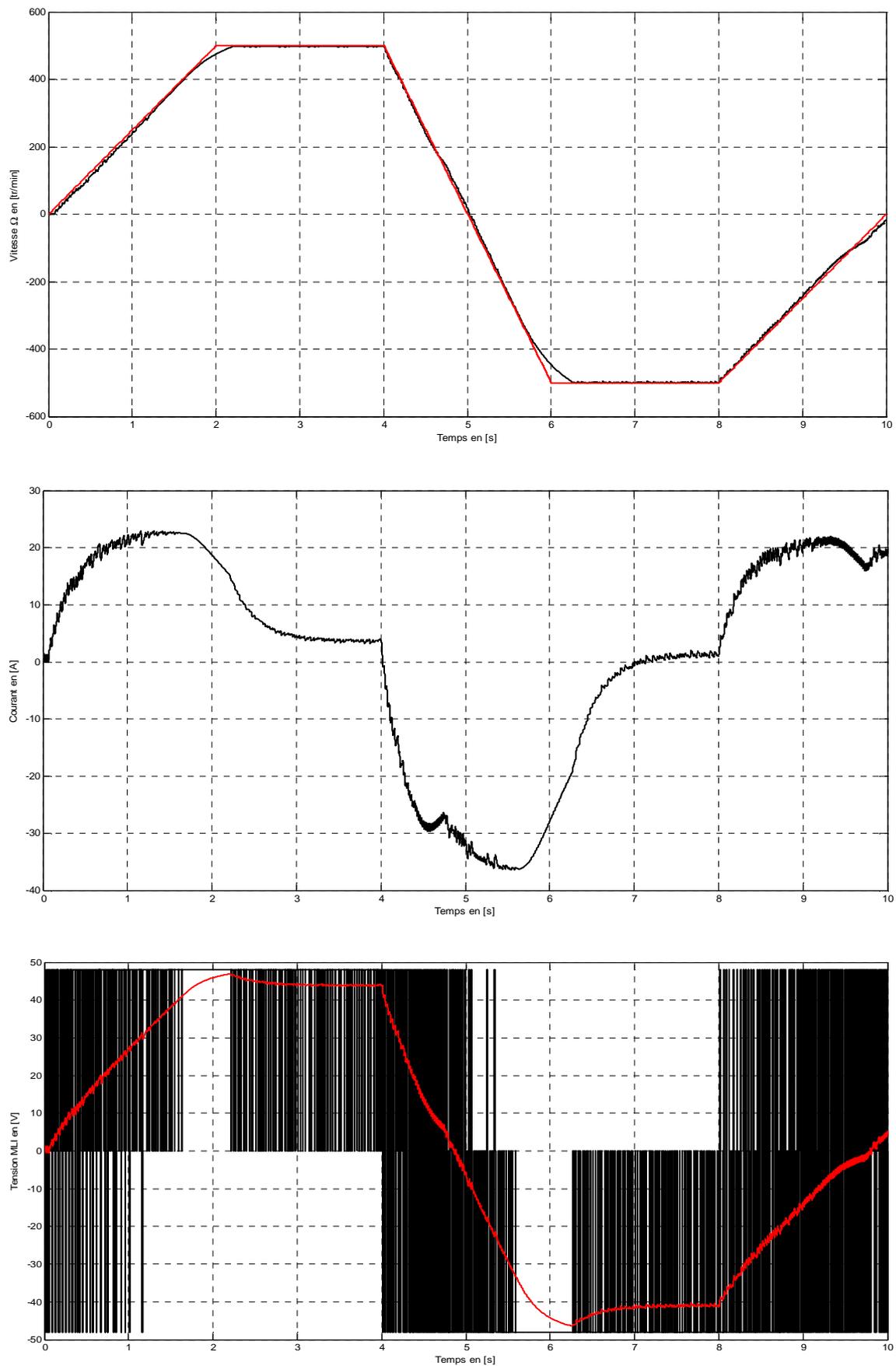


Figure III.8: Réponse du système commandé par modes glissants en situation 3.

III.6. Analyse des résultats

A la lumière des résultats de simulation donnés par les figures de III. 3 jusqu'à III.8, on peut dire que les signaux utiles sont admissibles, pour les deux techniques de commande. Néanmoins, les réponses du système commandé par la technique des modes glissants sont meilleures que celles du système commandé par PI. En effet, les réponses du PI sont moins précises et plus lentes.

En termes de robustesse, encore une fois, la commande par modes glissants se révèle plus robuste.

III.7. Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons traité la commande du système en vitesse. Pour cela, nous avons donné le cahier des charges, généré la référence de vitesse. Ensuite, nous avons testé, par simulation, le fonctionnement du système commandé par deux techniques de commande à savoir: la commande PI et la commande par les modes glissants.

L'application des deux techniques à la commande du système dans trois situations différentes, montre que la commande par les modes glissants est meilleure.

Conclusion générale

L'étude que nous avons menée dans ce mémoire, concerne le problème de la commande d'un moteur à courant continu ainsi que son dispositif d'alimentation concrétisé par un hacheur à modulation de largeur d'impulsion (MLI). En effet, on s'est intéressé à la poursuite de vitesse de l'arbre du moteur.

En premier lieu, des généralités sur les différents types de moteurs à courant continu, leur constitution, leurs caractéristiques statiques ainsi que leurs avantages ou inconvénients quand ils sont utilisés en industrie, ont été donnés, en particulier, ceux relatifs au moteur à excitation séparée, objet de notre étude.

Afin d'établir un modèle de commande du système composé du moteur et sa source d'alimentation (hacheur), nous avons exploité tour à tour les schémas équivalents de ceux-ci et appliqué les équations de Kirchhoff en courant continu. Le modèle obtenu est linéaire temps invariant ayant une entrée de commande (tension hachée délivrée par le hacheur), une sortie (vitesse de rotation) et deux variables d'état (vitesse de rotation et courant d'induit).

Pour ce qui est du pilotage du système et dans le l'objectif de suivre une référence de vitesse variable dictée par le cahier des charge, deux lois de commande ont été synthétisées. La première concerne la technique standard proportionnelle-intégrale (PI). Quand à la seconde, elle utilise la technique des modes glissants.

A travers les résultats de simulation obtenus, dans le cas où ces deux méthodes de commande sont appliquées au réglage de vitesse du système, il y a lieu de dire que les performances de réglage sont meilleures dans le cas de la commande par les modes glissants. De plus, cette dernière s'avère robuste aux incertitudes de modélisation.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] B. BALAYA « Moteur à courant continu » ; cours, édition 2010.
- [2] Lycée JACQUES PREVERT « Convertir l'énergie machines à courant continu », cours, Sciences de l'ingénieur.
- [3] Résumé sur moteur à courant continu page 4, document propose sur le site, « Sciences physique en BTS » chapitre 17.
- [4] Lycée polyvalent Louis couffignal « Moteur à courant continu », cours, C.P.I ,2006.
- [5] L.P .Chauvinière « moteur à courant continu » , cours, communication technique.
- [6]L.P LACHANVINAIRE « commande d'un moteur à courant continu », cours, Sciences de l'ingénieur.
- [7] T.HANS P.GUGENOT « Régulation et asservissement », BTS.
- [8]F.BRUNO « la machine à courant continu », cours d'électricité.
- [9] J.CROS « Hacheurs réversibles et onduleur-redresseur MLI », 2010.
- [10] A.AMIN « étude et réalisation d'une MLI pilotant un hacheur », magister en électrotechnique Université Abou BekrBelkaid Tlemcen.
- [11] G.BERTHONE « Les hacheurs » Lycée Mireille Grenet, Compiègne.
- [12]M.SAOUDI « Contrôle par mode glissant deux de la machine asynchrone », mémoire magister, université Biskra, 2014.
- [13] N.HAMDI, « Amélioration des performances des aérogénérateurs », Magister en électrotechniques de Constantine, 2013.