

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche scientifique



**Université Abderrahmane Mira – Bejaia**  
**Faculté de Technologie**  
**Département Génie Electrique**



# MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

En vue de l'obtention d'un diplôme du Master en électromécanique  
Option : Electromécanique

## Thème

**Etude et commande d'une chaine  
de translation d'une Rubber Tired  
Gantry (RTG)**

Réalisé par :

Mr. MIMOUNE Smail

Mr. HEBBACHE Adel

Encadré par :

Mr. AOUZELLAG Djamel

Mr. BABOURI Rabah

Mr. BENATSOU Mohamed

2017/2018

# REMERCIEMENTS

*Nous remercions Dieu tout puissant, qui nous a protégés, et nous a donnés la force de faire ce travail.*

*Nous tenons à remercier dans un premier temps, toute l'équipe pédagogique de l'université de Bejaïa et les intervenants professionnels, responsables de département électrotechnique.*

*Nous voudrions également remercier Mr BENATSOU, Mr Khaled et Mr Salem, ainsi le service technique de B.M.T, pour nous avoir près en charge lors de notre stage, pour leur générosité, leur encouragement et leur suivi attentif, dans la réalisation de ce travail.*

*Nous tenons bien évidemment, à remercier nos promoteurs Mr AOUZELLAGE. Dj et Mr BABOURI. R, pour nous avoir encadrés pendant toute la période de confection de ce mémoire.*

*Nos remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté de juger ce travail*

*Pour terminer je tiens à remercier tous mes collègues et mes amis qui m'ont aidé et qui m'ont apporté leur soutien moral ainsi que tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

**M. Smail**

**Et**

**H. Adel**

# DEDICACES

*Louanges à Dieu, le seul et unique.*

*Je dédie ce modeste travail aux personnes les plus importantes à mes yeux :*

- ✓ **A** mon très cher père ;
- ✓ **A** la mémoire de ma mère ;
- ✓ **A** ma très chère belle-mère;
- ✓ **A** mes chères sœurs ;
- ✓ **A** mes chers frères;
- ✓ **A** tous les autres membres de ma famille et la famille de mon binôme ;
- ✓ **A** mes meilleurs amis ;
- ✓ **A** toute mes amis de la promotion 2016/2017 électromécanique
- ✓ Et surtout, à mon frère et binôme, **Adel**.

*Smail*

# DEDICACES

*Louanges à Dieu, le seul et unique.*

*Je dédie ce modeste travail aux personnes les plus importantes à mes yeux :*

- ✓ **A** mon très cher père ;
- ✓ **A** ma très chère mère;
- ✓ **A** mes chères sœurs ;
- ✓ **A** mes chers frères;
- ✓ **A** tous les autres membres de ma famille et la famille de mon binôme ;
- ✓ **A** mes meilleurs amis ;
- ✓ **A** toute mes amis de la promotion 2016/2017  
électromécanique
- ✓ Et surtout, à mon frère et binôme, **smail**.

**ADEL**

# Sommaire

# SOMMAIRE

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
-----------------------------------	----------

## CHAPITRE I: Présentation de l'entreprise BMT et Etude de la chaîne de translation de l'RTG

<b>I.1 INTRODUCTION.....</b>	<b>2</b>
<b>I.2 PRESENTATION DE LA BMT .....</b>	<b>2</b>
I.2.1 APERÇU HISTORIQUE.....	2
I.2.2 STRUCTURE DE L'ENTREPRISE.....	2
I.2.2.1 Direction générale (DG).....	2
I.2.2.2 Direction des ressources humaines (DRH) .....	3
I.2.2.3 Direction des opérations (DO) .....	3
I.2.2.4 Direction marketing (DM) .....	3
I.2.2.5 Direction des finances et de comptabilité(DFC).....	3
I.2.2.6 Direction technique(DT) .....	3
I.2.3 SITUATION GEOGRAPHIQUE.....	5
I.2.4 ACTIVITES PRINCIPALES ET LES MISSIONS DE LA BMT.....	5
I.2.4.1 Mission de la BMT .....	5
I.2.4.2 Opérations du terminal.....	5
I.2.4.3 Objectifs de BMT.....	6
I.2.5 EQUIPEMENTS DE BMT.....	6
I.2.5.1 Portiques de quai .....	6
I.2.5.2 Reach steaker .....	7
I.2.5.3 Empty Spraeader.....	7
I.2.5.4 Chariot élévateur .....	7
I.2.5.5 Tracteurs remorques.....	7
I.2.5.6 Grue portique mobile sur pneus RTG (grue portique mobile sur pneus en caoutchouc).....	7
<b>I.3 DEFINITION DE LA RTG KALMAR.....</b>	<b>7</b>
<b>I.4 DIFFERENTS FONCTIONNEMENTS D'UNE RTG.....</b>	<b>9</b>
I.4.1 LEVAGE (HOIST) .....	9
I.4.2 CHARIOTAGE (TROLLEY) .....	9
I.4.3 TRANSLATION (GANTRY) .....	9
<b>I.5 CHAINE DE TRANSLATION DE LA RTG EXISTANT.....</b>	<b>10</b>
I.5.1 GROUPE ELECTROGENE.....	10
I.5.1.1 Moteur diesel.....	11
I.5.1.2 Alternateurs .....	11
I.5.1.2.1 Constitution de l'alternateur .....	12
I.5.1.2.2 Mode fonctionnement.....	12
I.5.2 VARIATEUR DE VITESSE .....	12
I.5.2.1 Redresseur .....	13

I.5.2.2 Onduleur.....	13
I.5.3 MOTEUR D'ENTRAÎNEMENT DES ROUES .....	14
I.5.3.1 Constitutions d'une MAS à cage .....	14
I.5.4 CHAÎNE CINÉMATIQUE .....	14
I.5.4.1 Arbre de transmission (cadran).....	15
I.5.4.2 Roue motrice.....	15
I.5.4.3 Réducteur d'angle .....	15
<b>I.6 FONCTIONNEMENT DE LA CHAÎNE DE TRANSLATION DE L'RTG .....</b>	<b>15</b>
<b>I.7 CAPTURES DE LA CHAÎNE DE TRANSLATION DE L'RTG.....</b>	<b>15</b>
I.7.1 DISPOSITIF ANTICOLLISION .....	16
I.7.1.1 Capteur de distance .....	16
I.7.1.2 Interrupteurs de translation et d'anticollision "moustaches de chat" .....	16
I.7.2 CAPTURE DES MOTEURS D'ENTRAÎNEMENT.....	17
I.7.2.1 Capture de position (encodeur).....	17
I.7.2.2 Capture de température .....	17
<b>I.8 SYSTÈME DE FREINAGE .....</b>	<b>17</b>
I.8.1 DESCRIPTION DE SYSTÈME .....	17
I.8.2 FREINAGE .....	18
I.8.3 DEBLOCAGE DE SYSTÈME DE FREINAGE .....	18
I.8.4 FREINAGE DYNAMIQUE .....	18
<b>I.9 SYSTÈME DE DIRECTION.....</b>	<b>19</b>
I.9.1 CONSTITUTIONS DU SYSTÈME DE DIRECTION.....	19
<b>I.10 CONCLUSION.....</b>	<b>20</b>

## CHAPITRE II: Modélisation des différentes parties de la chaîne de translation

<b>II.1 INTRODUCTION .....</b>	<b>20</b>
<b>II.2 DESCRIPTION DE SYSTÈME A COMMANDER.....</b>	<b>21</b>
<b>II.3 MODELISATION DE L'ONDULEUR DE TENSION .....</b>	<b>21</b>
II.3.1 MODELISATIONS DES SEMI-CONDUCTEURS .....	22
II.3.1.1 Méthode à topologie variable .....	22
<b>II.4 MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE.....</b>	<b>23</b>
II.4.1 DESCRIPTION .....	24
II.4.2 EQUATIONS ELECTRIQUES DE LA MAS .....	24
II.4.2.1 Equations de tensions .....	24
II.4.2.2 Equations magnétiques .....	25
II.4.3 ENERGIE ELECTROMAGNETIQUE .....	26
II.4.4 EQUATION DE COUPLE ELECTROMAGNETIQUE .....	26
II.4.5 EQUATION MECANIQUE.....	26
II.4.6 SYSTÈME D'AXES LIE AU CHAMP TOURNANT ( $\mathbf{d}$ , $\mathbf{q}$ ).....	27
II.4.7 MODULE BIPHASE ( $\mathbf{d}$ , $\mathbf{q}$ ) DE LA MAS .....	27

II.4.7.1 Changement de base .....	27
II.4.7.2 Equations des tensions dans le repère ( $\mathbf{d}, \mathbf{q}$ ) .....	27
II.4.7.3 Equation de flux dans le repère ( $\mathbf{d}, \mathbf{q}$ ) .....	28
II.4.7.4 Equations finales de la MAS .....	29
II.4.8 SCHEMA EQUIVALENT EN REGIME PERMANANT DE LA MAS (MODELE A FUITES TOTALISE DE ROTOR RAMENE AU STATOR) .....	29
II.4.9 EXPRESSION DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE .....	30
<b>II.5 MODELISATION DE CHAINE MECANIQUE .....</b>	<b>30</b>
II.5.1 FORCE DUE A LA PENTE .....	30
II.5.2 FORCE RESISTANCE AU MOUVEMENT .....	31
II.5.3 FORCE DE RESISTANCE AERODYNAMIQUE .....	31
II.5.4 VITESSE DE ROTATION DE LA ROUE .....	32
II.5.5 REDUCTEUR D'ANGLE .....	33
<b>II.6 CONCLUSION .....</b>	<b>33</b>
<b>CHAPITRE III: Commande de la chaine de translation</b>	
<b>III.1 INTRODUCTION .....</b>	<b>34</b>
<b>III.2 COMMANDE SCALAIRE DE LA CHAINE DE TRANSLATION DE LA RTG .....</b>	<b>34</b>
III.2.1 PRINCIPE DE LA COMMANDE SCALAIRE .....	34
III.2.2 CONTROLE EN $\mathbf{Vf}$ DE LA MAS .....	34
III.2.3 REALISATION DE L'ASSERVISSEMENT DE LA VITESSE .....	35
<b>III.3 TECHNIQUE MLI DE L'ONDULEUR DE TENSION .....</b>	<b>36</b>
III.3.1 INDICE DE MODULATION $\mathbf{m}$ .....	36
III.3.2 TAUX DE REGLAGES $\mathbf{r}$ .....	36
<b>III.4 SIMULATION DE SYSTEME .....</b>	<b>37</b>
III.4.1 PRESENTATION DE SIMULINK .....	37
III.4.2 VISUALISATION DES COURBES DE LA COMMANDE SCALAIRE .....	37
III.4.3 INTERPRETATION DES RESULTATS .....	40
<b>III.5 COMMANDE VECTORIELLE A FLUX ORIENTE .....</b>	<b>41</b>
III.5.1 CHOIX DE L'ORIENTATION .....	41
III.5.2 DIFFERENTES METHODES DE LA COMMANDE VECTORIELLE .....	41
III.5.2.1 Commande vectorielle directe .....	41
III.5.2.2 Commande vectorielle indirecte .....	42
<b>III.6 COMMANDE VECTORIELLE INDIRECTE PAR ORIENTATION DE FLUX ROTORIQUE .....</b>	<b>42</b>
III.6.1 DETERMINATION DE LA POSITION DU FLUX ROTORIQUE .....	44
III.6.1.1 Détermination indirecte à partir du courant et de la mesure de vitesse .....	44
III.6.2 CONTROLE DES COURANTS .....	44
III.6.3 CONTROLE DE FLUX .....	46
III.6.4 CONTROLE DE COUPLE .....	46



---

III.6.5 LIMITE DU COUPLE EN REGIME PERMANENT .....	46
<b>III.7 VISUALISATION DES COURBES DE LA COMMANDE VECTORIELLE .....</b>	<b>46</b>
III.7.1 TEST POUR DES COUPLE VARIABLES .....	47
III.7.1.1 Interprétation des résultats.....	50
III.7.2 TEST POUR DES VITESSES VARIABLES .....	50
III.7.2.1 Interprétation des résultats.....	53
<b>III.8 TEST DE ROBUSTESSE.....</b>	<b>53</b>
III.8.1 INTERPRETATION DES RESULTATS .....	56
<b>III.9 CONCLUSION.....</b>	<b>56</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>57</b>

**Bibliographe**

**Annexe**

# Liste des figures

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b>	Structure de l'entreprise	4
<b>Figure I.2</b>	Situation géographique	5
<b>Figure I.3</b>	RTG	7
<b>Figure I.4</b>	Constitution de l'RTG	8
<b>Figure I.5</b>	Fonctionnements de l'RTG	9
<b>Figure I.6</b>	Chaîne de translation de la RTG	10
<b>Figure I.7</b>	Variateur de vitesse	12
<b>Figure I.8</b>	Redresseur MLI	13
<b>Figure I.9</b>	Constitution de la MAS	14
<b>Figure I.10</b>	Constitution de la chaîne cinématique	14
<b>Figure I.11</b>	Capteur de distance	16
<b>Figure I.12</b>	Capteur fin de course anticollision	16
<b>Figure I.13</b>	Constitution de système de freinage	17
<b>Figure I.14</b>	Freinage dynamique de moteur	18
<b>Figure I.15</b>	Différentes directions de l'RTG	19
<b>Figure I.16</b>	Constitution de système de direction	19
<b>Figure II.1</b>	Description de système à commandé	21
<b>Figure II.2</b>	Onduleur de tension	21
<b>Figure II.3</b>	Représentation schématique de la machine asynchrone	24
<b>Figure II.4</b>	Schéma équivalent en régime permanent de MAS	29
<b>Figure II.5</b>	Coefficient de forme pour des différentes formes	31
<b>Figure III.1</b>	Déplacement de la caractéristique couple- vitesse en fonction	34
<b>Figure III.2</b>	Caractéristiques de réglage par variation de la fréquence d'alimentation d'une MAS	35
<b>Figure III.3</b>	Asservissement de la vitesse d'une commande scalaire	36
<b>Figure III.4</b>	Allure de la vitesse de rotation de la MAS	38
<b>Figure III.5</b>	Allure de la vitesse de translation de la RTG	38
<b>Figure III.6</b>	Allure de couple électromagnétique	38

<b>Figure III.7</b>	Allure de courant $I_{sa}$	39
<b>Figure III.8</b>	Allure de la tension $V_{sa}$	39
<b>Figure III.9</b>	Allure d'une phase de flux statorique	39
<b>Figure III.10</b>	Allure de rapport $V/f$	40
<b>Figure III.11</b>	Allure de la puissance de la MAS	40
<b>Figure III.12</b>	Principe de la commande vectorielle à flux orienté	41
<b>Figure III.13</b>	Découplage par orientation de flux rotorique	43
<b>Figure III.14</b>	Estimation de $\varphi_r$ et $\theta_s$	44
<b>Figure III.15</b>	Contrôle des courants transformés avec découplage par retour d'état	45
<b>Figure III.16</b>	Allure de la vitesse de rotation de la MAS	47
<b>Figure III.17</b>	Allure de la vitesse de translation de la RTG	47
<b>Figure III.18</b>	Allure de couple électromagnétique	48
<b>Figure III.19</b>	Allure de courant $I_{sa}$	48
<b>Figure III.20</b>	Allure de flux $\psi_{rd}$	48
<b>Figure III.21</b>	Allure de flux $\psi_{rq}$	49
<b>Figure III.22</b>	Allure de la tension $V_{sa}$	49
<b>Figure III.23</b>	Allure de la puissance de la MAS	49
<b>Figure III.24</b>	Allure de la vitesse de rotation de la MAS	50
<b>Figure III.25</b>	Allure de la vitesse de translation de la RTG	51
<b>Figure III.26</b>	Allure de couple électromagnétique	51
<b>Figure III.27</b>	Allure de courant statorique $I_{sa}$	51
<b>Figure III.28</b>	Allure de flux $\psi_{rd}$	52
<b>Figure III.29</b>	Allure de flux $\psi_{rq}$	52
<b>Figure III.30</b>	Allure de la tension statorique $V_{sa}$	52
<b>Figure III.31</b>	Allure de la puissance de la MAS	53
<b>Figure III.32</b>	Allure de vitesse de rotation	54
<b>Figure III.33</b>	Allure du couple de MAS	54
<b>Figure III.34</b>	Allure de flux $\psi_{rd}$	54
<b>Figure III.35</b>	Allure de flux $\psi_{rq}$	55
<b>Figure III.36</b>	Allure de de courant statorique $I_{sa}$	55
<b>Figure III.37</b>	Allure de la puissance de la MAS	55

A decorative scroll effect with a light blue border and a grey shadow, framing the text.

# **Table des symboles**

**Table des symboles**

$p$  : Nombre de pair de pôles.

$v_{sn}$  : La tension d'une phase statorique, avec  $n = (a, b, c)$ .

$v_{rn}$  : La tension d'une phase rotorique, avec  $n = (a, b, c)$ .

$i_{sn}$  : Le courant d'une phase statorique, avec  $n = (a, b, c)$ .

$i_{rn}$  : Le courant d'une phase rotorique, avec  $n = (a, b, c)$ .

$\varphi_{sn}$  : Le flux d'une phase statorique, avec  $n = (a, b, c)$ .

$\varphi_{rn}$  : Le flux d'une phase rotorique, avec  $n = (a, b, c)$ .

$R_s$  : Résistance d'une phase statorique.

$R_r$  : Résistance d'une phase rotorique.

$l_s$  : Le coefficient d'inductance propre d'un enroulement statorique.

$l_r$  : Le coefficient d'inductance propre d'un enroulement rotorique.

$M_s$  : Le coefficient d'inductance mutuelle entre deux phases statorique.

$M_r$  : Le coefficient d'inductance mutuelle entre deux phases rotorique.

$M$  : Valeur maximale de la mutuelle inductance entre une phase statorique et rotorique.

$L_s$  : Inductance propre cyclique du stator.

$L_r$  : Inductance propre cyclique du rotor.

$L_m$  : Inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor (aussi entre le rotor et le stator).

$\omega_s$  : Pulsation statorique.

$\omega_r$  : Pulsation rotorique.

$\omega$  : Pulsation mécanique.

$g$  : Glissement.

$\theta$  : Position « électrique » du rotor par rapport au stator.

$\theta_s$  : Position « électrique » du référentiel tournant par rapport au stator.

$\theta_r$  : Position « électrique » du référentiel tournant par rapport au rotor.

$\sigma$  : Coefficient de dispersion de blondel.

$\tau_r$  : Constante du temps rotorique.

$W_e$  : Energie électromagnétique.

$C_{em}$  : Couple électromagnétique.

$C_r$  : Couple résistant.

$\Omega$  : Vitesse de rotation de rotor

$f$  : Coefficient de frottement.

$R'_r$  : Résistance rotorique ramène au stator.

$N_r$  : Inductance de fuites totalisées au rotor.

$N'_r$  : Inductance de fuites totalisées au rotor ramène au stator.

$I'_r$  : Courant rotorique ramenée au stator.

$F_p$  : Force due à la pente.

$F_r$  : Force résistance au mouvement.

$g'$  : gravite.

$m$  : la masse de la RTG.

$f_r$  : Coefficient de résistance au roulement.

$F_v$  : Force résistance aérodynamique.

$K$  : Coefficient de forme.

$V$  : vitesse de vent.

$S$  : Surface de la RTG.

$C_{ch}$  : Couple de charge.

$R$  : Rayon de la roue.

$\omega_2$  : Vitesse de rotation de la roue.

$\omega_1$  : Vitesse de rotation de moteur d'entraînement.

$v$  : Vitesse de translation de la RTG.

$r$  : Rapport de réduction du réducteur d'angle.

$C_{chra}$  : Couple de charge ramenée au moteur.

$\eta$  : Rendement de réducteur

# **Acronymes**



## Acronymes

BMT: Bejaia Méditerranéen Terminal

EPB: Entreprise Portique Bejaia

RTG: Rubber Tired Gantry

MAS: Machine Asynchrone

E.E: Equipment Electrique

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor

MLI: Modulation Largeur d'Impulsion

API: Automate Programmable Industriel

PI: Proportionnel Intégrateur.

PID : Proportionnel Intégrateur dérivé.

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Le présent travail s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre l'université A. Mira de Bejaïa et l'entreprise portique de Bejaïa Méditerrané Terminal (BMT).

Le port est l'une des composantes essentielles dans la chaîne du transport maritime, il est considéré comme un espace économique, stratégique et un lieu de transit de diverses marchandises dans les meilleures conditions, coût, délais et sécurité. Dans ce cadre, l'entreprise BMT prend une place très importante dans l'accueil des conteneurs, c'est pour cela qu'elle doit être aménagée avec des installations spécialisées (dont la RTG fait partie) afin d'assurer la réception des navires adaptés à ce type de transport (transport conteneurisé) dans un espace appelé « Terminal à conteneur ».

Le but de ce travail est d'étudier la chaîne de translation d'une grue portique mobile sur pneus dite « RTG », en commençant par démontrer les différents éléments composant cette chaîne tel que le groupe électrogène, chaîne cinétique et le moteur électrique d'entraînement (machine asynchrone triphasée). Ce dernier sera modélisé via un onduleur triphasé de tension à Insulated Gate Bipolar Transistor IGBT, ensuite on fera la modélisation de la chaîne cinétique en présentant forces exercées sur la RTG tel que la force due à la pente, la force résistante au mouvement et la force de résistance aérodynamique.

La problématique rencontrée est la difficulté de contrôle de la RTG dans des endroits étroits et ceci revient au type de commande utilisé, donc nous avons l'obligation de trouver une solution plus appropriée et plus efficace pour rendre notre système plus souple et facile à commander.

La commande utilisée dans notre système est la commande scalaire. Dans ce qui suit nous modélisons cette commande puis la simulons sous logiciel « Simulink-MATLAB » afin de visualiser les résultats et de repérer les limites de la commande utilisée, et en partant de ça nous avons proposé une solution qui convient le plus à notre système.

Le présent mémoire comportera trois chapitres structurés comme suite :

- I. Le premier chapitre est consacré à la présentation de l'entreprise BMT et à l'étude de la chaîne de translation de la RTG ;
- II. Le deuxième chapitre présente la modélisation des différentes parties de la chaîne de translation ;
- III. Le troisième chapitre décrit la commande existante dans la chaîne de translation et la commande recommandée pour résoudre ou faire face aux problèmes.

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

# **Chapitre I**

**Présentation de l'entreprise BMT et  
Etude de la chaine de translation de  
la RTG**

## **I.1 Introduction**

Pour faire connaître l'entreprise prestataire de services nous évoquons tout d'abord, l'historique de Bejaia Méditerrané Terminale (BMT), en suite, la situation géographique de BMT. Enfin, la présentation des différentes structures de BMT.

Ensuite, on démontrera d'une façon générale les différents organes et fonctions de la RTG KALMER ainsi que la chaîne de translation en expliquant des différents éléments de cette dernière, son principe de fonctionnement, son système de direction, freinage, et enfin les différents capteurs utilisés.

## **I.2 Présentation de la BMT**

BMT est créée comme une société par actions, c'est une entreprise prestataire de services spécialisés dans le fonctionnement, l'exploitation et la gestion du terminal à conteneurs. Pour atteindre son objectif, elle s'est dotée d'un personnel compétant particulièrement formé dans les opérations de gestion du terminal.

Elle dispose d'équipements d'exploitation les plus perfectionnés pour les opérations de manutention et d'acconage afin d'offrir des prestations de services de qualité, d'efficacité et de fiabilité en des temps records et à des coûts compétitifs. BMT offre ses prestations quotidiennement 22h/24h [1].

Le niveau de la technologie mise en place, la qualité des infrastructures et les équipements performants (portiques de quai, portiques gerbeurs) font aujourd'hui du port de Bejaia et de BMT le premier terminal moderne d'Algérie avec une plate-forme portuaire très performante [1].

### **I.2.1 Aperçu historique**

Dans son plan de développement 2004-2006, l'entreprise portuaire de Bejaia avait inscrit à l'ordre du jour le besoin d'établir un partenariat pour la conception, le financement, l'exploitation et l'entretien d'un terminal à conteneurs au port de Bejaia [1].

Dès lors L'EPB s'est lancée dans la tâche d'identifier les partenaires potentiels et elle a arrêté son choix sur le groupe PORTEK qui est spécialisé dans le domaine de la gestion des terminaux à conteneurs. Le projet a été présenté au conseil de la participation de l'état (CPE) en février 2004, le CPE a donné son accord au projet en mai 2004 [1].

Sur l'accord du gouvernement, BMT a vu le jour avec la jointe venture de l'entreprise portuaire de Bejaia (EPB) à 51% et PORTEK une société singapourienne à 49%, PORTEK est un opérateur de terminaux spécialisé dans les équipements portuaires, elle est à présent dans plusieurs ports dans le monde. Aujourd'hui BMT est une SPA avec un capital de 500 000 000DA [1].

### **I.2.2 Structure de l'entreprise**

#### **I.2.2.1 Direction générale (DG)**

A sa tête le directeur générale qui a le pouvoir de décider, d'administrer l'entreprise, d'assigner des directives pour les différentes structures entre les directions de l'entreprise.

**I.2.2.2 Direction des ressources humaines (DRH)**

La direction des ressources humaines est constituée de plusieurs services [1]:

➤ **Service personnel**

Mettre en œuvre des systèmes de gestion intégrés à la stratégie de l'entreprise et qui traduit une adéquation entre les impératifs économiques et les attentes du personnel.

➤ **Service des moyens généraux**

Charger des achats et de la gestion des stocks de l'entreprise.

➤ **Service d'hygiène et de sécurité**

Assure la sécurité de la marchandise, du parc à conteneurs et la propreté de l'entreprise et de son environnement.

➤ **Service des stocks**

L'objectif de service des stocks est de réduire les coûts et les risques, ce qui nécessite la réduction du volume des stocks pour éviter l'immobilisation des fonds. Gérer un stock consiste à le maintenir à un niveau acceptable (ni trop élevé, ni trop bas).

**I.2.2.3 Direction des opérations (DO)**

Assure la planification des escales, de parc à conteneurs et la planification des ressources (humaines et matérielles). Elle prend en charge les opérations de manutentions comme la réception des navires porte-conteneurs et leurs chargement et déchargement, elle suit aussi les opérations de l'aconage tel que : le suivi des livraisons, les dépotages, la mise à disposition des conteneurs vides, le traitement des conteneurs frigorifiques [1].

**I.2.2.4 Direction marketing (DM)**

Veille à la marque de l'entreprise en se préoccupant en permanence d'entretenir des relations avec les clients. Elle vise à faire connaître ses missions, ses programmes, ses orientations et ses performances auprès de ses clients. Elle amène son environnement externe à prendre conscience de l'importance des démarches qu'elle entreprend dans le développement et de l'amélioration de la qualité des services, et elle est divisée en deux services [1] :

➤ **Service commercial**

Suit la facturation, la gestion de portefeuille client et le recouvrement des créances.

➤ **Département informatique**

Assure le bon fonctionnement du CTMS, la maintenance du parc informatique de l'entreprise et le développement de nouvelles applications aux différentes structures.

**I.2.2.5 Direction des finances et de comptabilité(DFC)**

Procède à l'enregistrement de toutes les opérations effectuées par l'entreprise au cours de l'année. Elle est constituée de deux services [1]:

➤ **Service de comptabilité**

Procède au contrôle et l'enregistrement de toutes les factures d'achat, de prestation et d'investissement.

➤ **Service des finances**

Procède au règlement de toutes les factures et à l'encaissement de toutes les créances de l'entreprise émises à la banque.

**I.2.2.6 Direction technique(DT)**

Assure une maintenance préventive et curative des engins du parc à conteneurs [1]

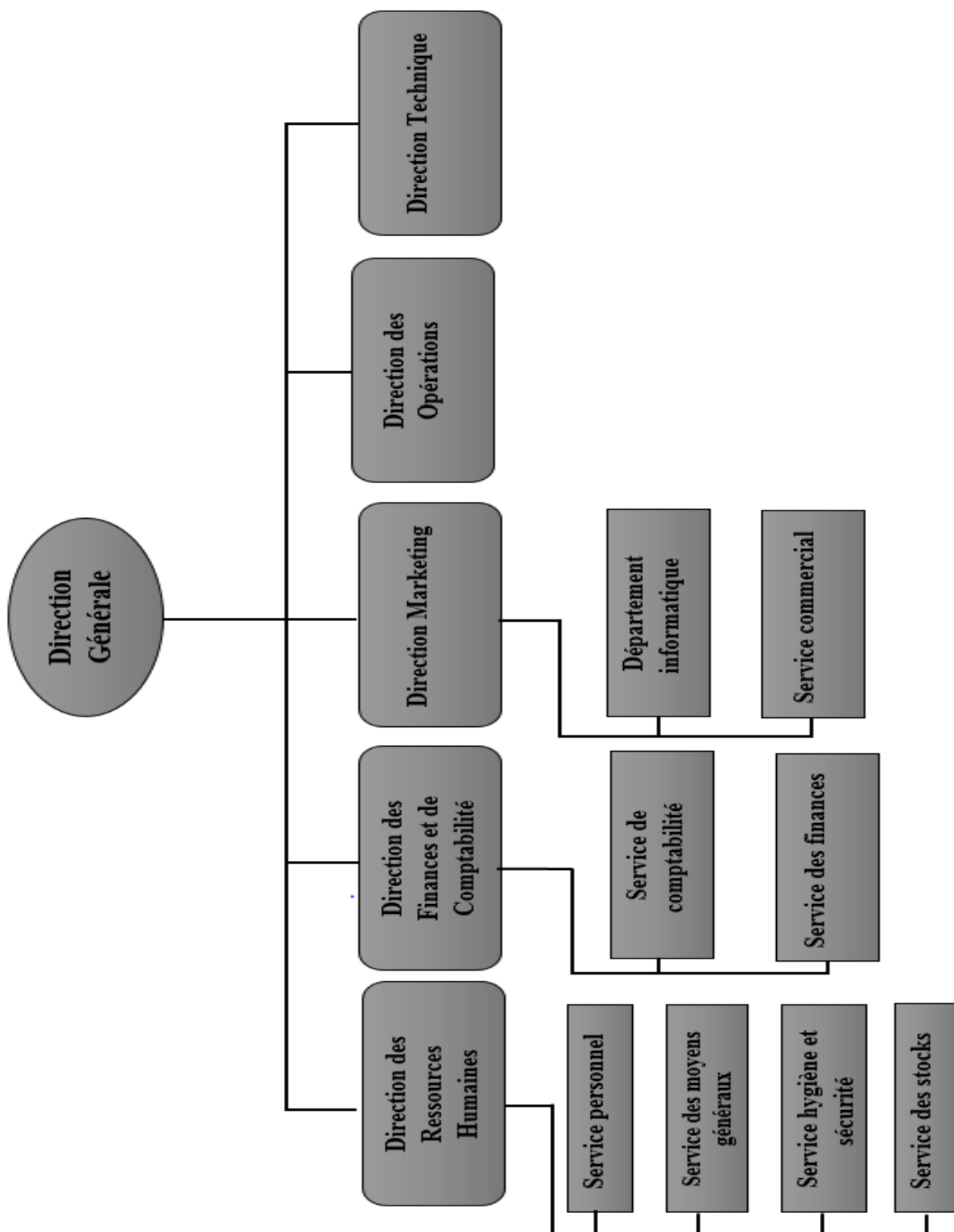


Figure (I.1) : Structure de l'entreprise

### I.2.3 Situation géographique

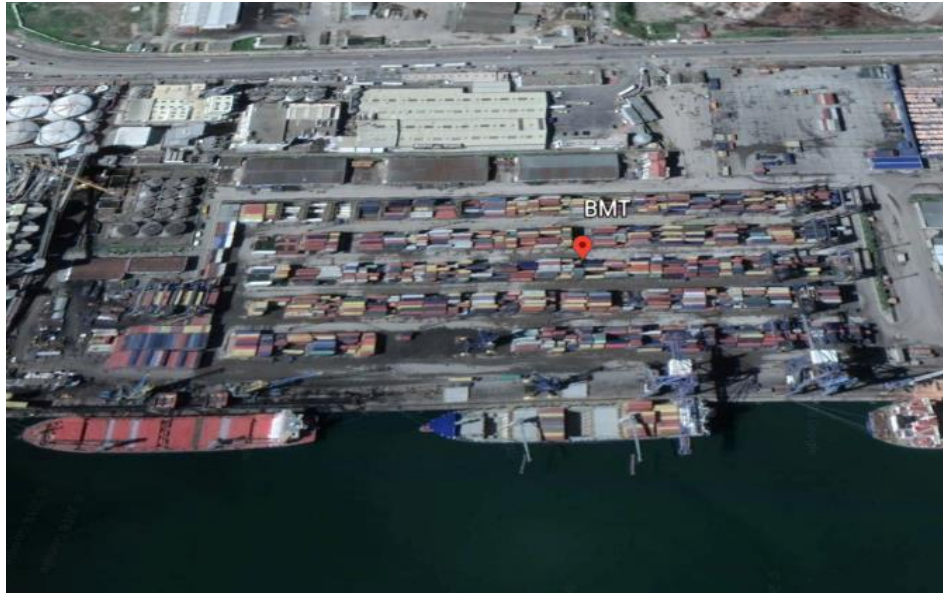
BMT se situe au niveau du port de Bejaia, ce dernier est implanté au centre de littorale et possède une situation géographique stratégique.

Elle se trouve à proximité de la gare ferroviaire, pas loin de l'aéroport de Bejaia et reliée au réseau routier national qui facilite le transport des marchandises conteneurisé de tous genres vers l'arrière-pays et vers d'autres destinations telle que la banlieue d'Alger.

Elle se situe dans le nouveau quai du port de Bejaia précisément dans le quai n 24.

Position GPS :

- Latitude nord : 36° 45' 24".
- Longitude est : 05° 05' 50



**Figure (I.2) :** Situation géographique

### I.2.4 Activités principales et les missions de la BMT

#### I.2.4.1 Mission de la BMT

L'activité principale de la BMT est la gestion de l'exploitation de terminale à conteneurs. BMT a pour missions principales [2]:

- Traiter dans les meilleures conditions les délais, les coûts et la sécurité, l'ensemble des navires porte-conteneurs et des conteneurs
- La manutention sur navire, le chargement et le déchargement des conteneurs et leurs entreposages dans les zones du stockage.
- Le service d'accordage sur les aires spécialisées ainsi que leurs livraisons

#### I.2.4.2 Opérations du terminal

BMT reçoit annuellement un grand nombre de navires pour lesquels elle assure les opérations de planification, de manutention et d'acconage avec un suivi et une traçabilité des opérations, et on peut classer les opérations du terminal en trois spécialistes [1] :

- **Opérations de planification**
  - Planification des escales : programmation des accostages et des postes à quai.



- Planification du parc à conteneurs (la visite, le dépotage, l'enlèvement des conteneurs vides au parc).
- Planification déchargement/chargement.
- Planification des ressources : équipes et moyens matériels.

➤ **Opérations de manutention**

- l'embarquement et le débarquement des conteneurs.
- La réception des navires porte-conteneurs.

Elle est opérationnelle jour et nuit, répartie en shifts de 06h à 12h et de 12h à 18h, de 18h00 à 00h00, à partir de minuit c'est un over time jusqu'à 04h00 de matin.

➤ **Opérations d'acconage**

- Transfert des conteneurs vers les zones d'entreposage.
- Transfert des conteneurs frigorifiques vers les zones « référées ».
- Suivi des visites du conteneur par les services concernés.
- Changement de position des conteneurs.
- Suivi des livraisons et des dépotages.
- Suivi des restitutions et des mises à quai.
- Mise à disposition des conteneurs vides pour empotage.

### **I.2.4.3 Objectifs de BMT**

Faire du terminal à conteneurs de BMT une infrastructure moderne a pour but de répondre aux exigences les plus sévères en matière de qualité dans le traitement des conteneurs. La mise à disposition d'une nouvelle technologie dans le traitement des conteneurs pour [1]:

- Un gain de productivité.
- Une réduction des coûts d'escale.
- Une fiabilité de l'information.
- Un meilleur service.
- Sauvegarder la marchandise des clients.
- Faire face à la concurrence nationale et internationale.
- Propulser le terminal au stade international.
- Gagner des parts du marché.
- Le passage de 20 à 30 conteneurs à l'heure.
- La création et la gestion d'un centre de formation.

### **I.2.5 Equipements de BMT**

On ci-dessous les équipements de BMT par ordre de priorité :

#### **I.2.5.1 Portiques de quai**

Nombre : 04

**QC1** de marque REGGIANE

**QC2** de marque IHI

Grue mobile sur roue (gottwold)

Grue mobile sur roue (liebheer)

Caractéristiques :

Ils soulèvent les conteneurs par une grue qui est adaptée dans un chariot et peuvent se déplacer horizontalement sur un rail ou une paire de rails adaptés sous un faisceau. Leur capacité de levage est de 70 tonnes.

#### **I.2.5.2 Reach steaker**

Nombre : 06

Caractéristiques :

Ils soulèvent le conteneur (vide ou plein), leur capacité de levage est de 45 tonnes, Ils ne peuvent pas accéder à certaine position.

#### **I.2.5.3 Empty Spreader**

Nombre : 04

Caractéristiques :

Ils soulèvent le conteneur (vide), ils prennent le conteneur par deux cotés

#### **I.2.5.4 Chariot élévateur**

Nombre : 11

Caractéristiques :

Ils sont faits pour le stockage, leur capacité de levage est variée de 3 et 5 tonnes, ils peuvent entrer dans le conteneur et soulever des marchandises.

#### **I.2.5.5 Tracteurs remorques**

Nombre : 22

Tonnage : 45 tonnes

Caractéristiques :

Ils transportent le conteneur du quai jusqu'au terminal et vice versa, leur capacité de levage est de 45 tonnes.

#### **I.2.5.6 Grue portique mobile sur pneus (RTG)**

Nombre: 10

Notre étude s'est focalisée sur cet équipement (RTG) ou plus précisément sur sa chaîne de translation, qu'on définira dans la suite du chapitre.



**Figure (I.3):** Grue portique mobile sur pneus(RTG)

### **I.3 Définition de la RTG Kalmar**

La RTG (Rubber Tired Gantry) Kalmar est une grue portique mobile sur pneus en caoutchouc, dotée d'un palonnier télescopique capable de manipuler et empiler des conteneurs ISO sur 20ft, 40ft ainsi que APL 45ft. Elle est conçue pour empiler jusqu'à six conteneurs les uns sur les autres [2,5,6].

RTG Kalmar est constituée de plusieurs organes qui sont [7] :

➤ **Ossature**

C'est le squelette de l'RTG sur laquelle les autres organes se fixent ou se déplacent.

➤ **Source d'alimentation**

Dans notre cas, c'est un groupe électrogène. Il est au-dessus de la traverse d'un portique sur pneus à empattement court. Le réservoir de carburant se trouve à l'intérieur de la traverse avant.

➤ **Salle EE**

C'est la cabine des armoires électriques située au-dessus de la traverse avant, elle abrite la plupart des équipements électriques des entraînements électriques. Cette salle est climatisée.

➤ **Système de translation sur roues**

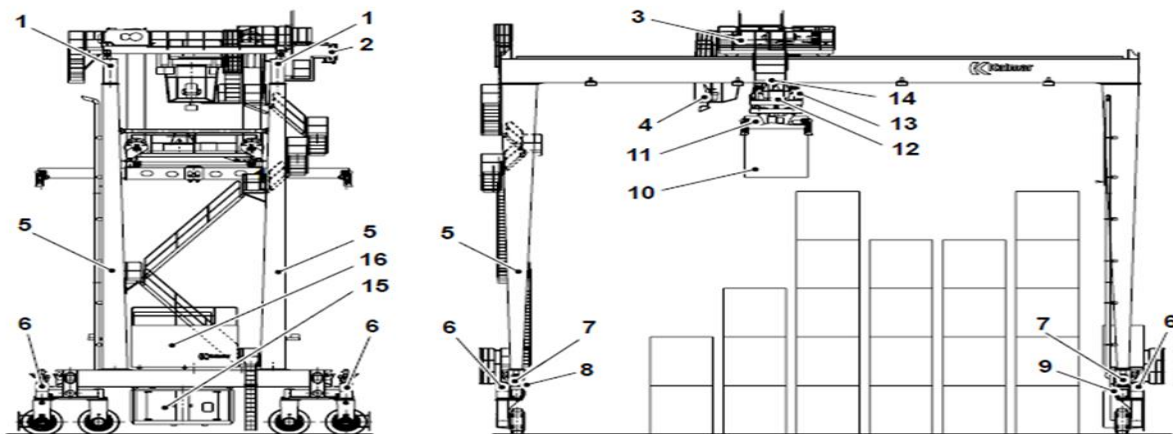
Il assure le déplacement de l'RTG sur des roues pneumatiques.

➤ **Chariot et cabine**

Le chariot de levage se déplace sur des rails placés sur des traverses principales. La cabine fait partie du chariot qui offre à l'utilisateur une excellente vue sur l'ensemble de l'aire de travail.

➤ **Palonnier**

Est la partie de la RTG qui entre en contact avec le conteneur. Il est lié directement aux câbles du système de levage et commandé électriquement. Le palonnier possède un système télescopique qui le rend adaptable aux différentes longueurs standards des conteneurs. Le palonnier est souvent affronté aux chocs dus aux contacts permanents avec le conteneur. L'opérateur de l'RTG est donc appelé à vérifier l'état général de la structure du palonnier avant chaque démarrage des opérations d'une part, et d'éviter les atterrissages brutaux du palonnier sur le conteneur lors des opérations d'une autre part.



- |                                      |                         |
|--------------------------------------|-------------------------|
| 1. Traverses principales             | 9. Traverse avant       |
| 2. Chaîne de puissance               | 10. Conteneur           |
| 3. Chariot avec équipement de levage | 11. Palonnier           |
| 4. Cabine de l'opérateur             | 12. Tête d'accrochage   |
| 5. Colonnes                          | 13. Poulie              |
| 6. Moteurs d'entraînement            | 14. Enrouleur de câble  |
| 7. Moteurs de rotation des roues     | 15. Groupe de puissance |
| 8. Traverse arrière                  | 16. Salle de contrôle   |

Figure (I.4) : Constitution de l'RTG

## I.4 Différents fonctionnements d'une RTG

Les différents fonctionnements d'une RTG sont représentés dans la figure (I.5) :



**Figure (I.5) :** Fonctionnements de l'RTG

### I.4.1 Levage (Hoist)

Le système de levage (situé sur le chariot) est constitué principalement d'un moteur électrique couplé à un réducteur de vitesse avec un système de freinage à disque. Le réducteur transmet le mouvement à un tambour enrouleur de câbles de levage liés au palonnier. Ce système permet donc de soulever ou de faire descendre le palonnier lors de la rotation du tambour. Le système de levage fournit un système rigide à l'aide de mouvements à balancement minimal du palonnier, la stabilité du système s'obtient à l'aide des câbles spéciaux [2,6,7].

### I.4.2 Chariotage (Trolley)

Le mécanisme de ce système est installé sur le châssis de la plateforme du chariot, il assure le mouvement avant et arrière du chariot sur rails le long des deux transversales de la RTG. Le système est composé pour chaque côté d'un moteur électrique couplé à un frein à disque et à un réducteur de vitesse. Ce dernier transmet le mouvement à un galet guidé sur le rail [5-7].

### I.4.3 Translation (gantry)

Le système de translation est constitué principalement de quatre moteurs électriques chaque moteur couplé à un réducteur avec un système de freinage à disque. Le réducteur transmet le mouvement aux roues qui permettent de déplacer la RTG [5-7].

**Remarque :** vu que notre étude sera faite sur le système de translation, les éléments constituant de ce système seront mieux détaillés dans la suite du travail.

### I.5 Chaîne de translation de la RTG existant

La chaîne de translation de la RTG est représentée dans la figure (I.6), elle est constituée des éléments suivants :



Figure (I.6) : Chaîne de translation de la RTG.

#### I.5.1 Groupe électrogène

Le groupe électrogène est l'un des plus importantes machines de l'énergie, il présente une gamme diversifiée de produit énergétique, c'est un dispositif autonome capable de produire de l'électricité à des durées de fonctionnement importantes d'une façon permanente, il est composé d'un moteur diesel qui actionne un alternateur [21].

Nous citons les caractéristiques de groupe électrogène utilisées dans le tableau (I.1) :

Table (I.1) : Caractéristiques du groupe électrogène

Fabricant	Cummins
Modèle	QSX15G6
Nombre de cylindres et construire	6 cylindres en linge
Capacité du réservoir de carburant	850 L
Consommation de carburant à pleine charge	95.9 L/h
Admission d'air - Moteur	33 m <sup>3</sup> /min
Débit de gaz d'échappement	82.2 m <sup>3</sup> /min
Puissance de sortie	459 KW
Tension	400/230 V
Courant	662 A
Fréquence	50 Hz
Vitesse de rotation	1500 tr/min
Classe de protection	IP 55
Masse	7300 kg



### I.5.1.1 Moteur diesel

Le moteur diesel est un organe qui transforme l'énergie primaire en énergie mécanique. Il doit son nom à son créateur allemand RUDOLF DIESEL (1853-1913), qui avait l'idée d'inventer le premier moteur à combustible.

Le moteur diesel fonctionne différemment d'un moteur à essence. Même s'il possède les principaux éléments qui sont identiques l'un à l'autre, et qu'il respecte le même cycle à quatre temps, un moteur diesel est un moteur à explosion auto-inflammable, présentant de différentes sensibilités tel que la manière du mélange (air/gazole), en revanche le moteur à essence s'enflamme par une étincelle électrique [21,24].

#### ➤ Mode de fonctionnement d'un moteur diesel

Le moteur diesel est un moteur à combustion interne dont l'allumage n'est pas commandé plutôt spontané par phénomène d'auto-allumage (auto-inflammation). Pendant le temps de compression, l'air est comprimé à une pression comprise entre 30 et 55 bar (moteurs atmosphériques), ou entre 80 et 110 bar (moteurs suralimentés par turbocompresseur), et simultanément chauffé à une température comprise entre 700 et 900 °C. Cette température suffit pour provoquer l'auto-inflammation du carburant injecté avant la fin de la compression au voisinage du point mort haut du piston.

Le transfert de carburant s'effectue à partir du réservoir de carburant par une pompe d'alimentation. Celle-ci démarre dès la mise en service de l'alimentation principale. Le carburant circule vers la pompe à carburant du moteur en passant par des filtres, le trop-plein du moteur retourne au réservoir. Le cycle d'un moteur diesel est caractérisé par quatre temps ou mouvements linéaires du piston représentés comme suite : admission, compression, explosion, détente et échappement [23].

### I.5.1.2 Alternateurs

L'alternateur est une machine synchrone, qui a un rôle prépondérant dans la conversion électromécanique de l'énergie, du fait que la quasi-totalité des machines tournantes produisant l'énergie électrique à partir de l'énergie mécanique sont des machines synchrones, les raisons de cette utilisation préférentielle résident surtout dans les possibilités de construire des machines synchrones de grande puissance unitaire.

Une machine synchrone est une machine à champ tournant, qui se caractérise par le fait que la vitesse de rotation est un sous-multiple entier de fréquence des courants alternatifs polarisés, parcourant l'enroulement de l'une des armatures. Si cet enroulement est conçu de façon à former les (p) paires de pôles si  $\omega$  en (rad/s) est une pulsation des courant qui le parcourent, la vitesse de rotation angulaire  $\Omega$  en (rad/s) est liée à ( $\omega$ ) et (p) par la relation [9]:

$$\Omega = p\omega \quad (I.1)$$

#### I.5.1.2.1 Constitution de l'alternateur

Comme toutes les machines tournantes, l'alternateur contient deux parties principales, une partie fixe stator (inducteur) et une partie mobile rotor (induit) :

##### ➤ Stator

Le stator comprend un circuit magnétique constitué par un empilage de tôles, isolées les unes des autres pour limiter les courants de Foucault, le circuit magnétique comporte des encoches uniformément réparties dans lesquelles vient se loger l'enroulement triphasé du stator.

Le bobinage du stator triphasé comprend trois bobines décalées l'une par rapport à l'autre de 120°, les deux extrémités de l'enroulement aboutissent chacune à une borne à la plaque de bornes de la machine. Elles constituent l'entrée et la sortie de l'enroulement [12].

**➤ Rotor**

Le rotor c'est la partie qui tourne à l'intérieur du stator immobile. Il existe trois grandes familles de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique. Les rotors bobinés à pôles lisses, les rotors bobinés à pôles saillants ainsi que les rotors à aimants. Pour les rotors bobines, les encoches disposées à sa périphérie, un enroulement parcouru par un courant continu.

Le rotor excité, en tournant, produit un champ tournant avec lui. Ce champ tournant engendre des forces électromotrices dans chacune des phases de l'enroulement du stator [12].

L'excitation de notre alternateur s'effectue en utilisant un autre alternateur de petite puissance en combinaison avec un pont redresseur pour excite le rotor.

**I.5.1.2.2 Mode fonctionnement**

L'alternateur exploite un phénomène physique appelé induction, selon lequel un aimant en mouvement fait naître une tension aux bornes d'une bobine située à proximité, quand le rotor se fait tourner (excitation en courant continu) par une machine auxiliaire (dans notre cas c'est un moteur diesel), le champ correspondant crée dans les enroulements du stator des f.c.é.m. de vitesse périodique, dont la fréquence dépend de la vitesse d'entraînement et du nombre de paires de pôles, un système de régulation permet de délivrer un courant, sous une tension fixe, en fonction des charges demandées par les consommateurs.

**I.5.2 Variateur de vitesse**

Le variateur est installé dans la salle des Equipement Electrique (salle E.E), il est constitué de deux éléments :



**Figure(I.7) :** Variateur de vitesse

**I.5.2.1 Redresseur**

C'est un convertisseur statique qui converti le courant alternatif en courant continu. Dans notre système le redresseur est utilisé pour une raison majeure qui est la variation de la vitesse des moteurs d'entrainements (variation indirecte).

Le fonctionnement des redresseurs à commutation naturelle est non linéaire en nature, et par conséquent, le faible facteur de puissance résultant de la charge, causent un certain nombre de problème dans le système de distribution d'énergie.

Le redresseur triphasé à IGBT (ou redresseur à MLI) est le plus populaire, il a l'avantage d'utiliser un module triphasé peu couteux avec la possibilité d'écoulement bidirectionnel de l'énergie, qui permet à l'énergie cinétique d'une charge à réinjecter à la source d'alimentation.

Mais il a des inconvénients comme : estimation élevée du courant par unité, pauvre immunité contre les défauts et pertes élevée de commutation [14].

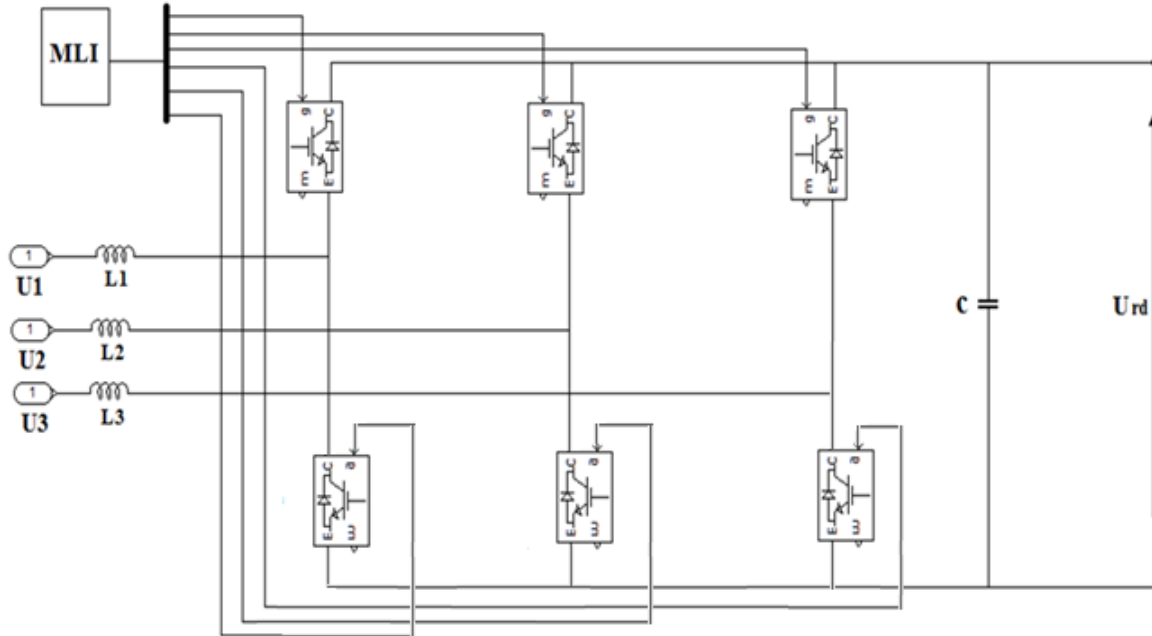


Figure (I.8) : Redresseur MLI

**I.5.2.2 Onduleur**

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques d'énergie électrique continue en alternative, ils permettent d'obtenir une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace à partir d'une tension continue donnée.

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué de cellules de commutation à semi-conducteur associées aux diodes en antiparallèle. Le type d'onduleur utilisé est un onduleur de tension triphasé à IGBT.

**I.5.3 Moteur d'entraînement des roues**

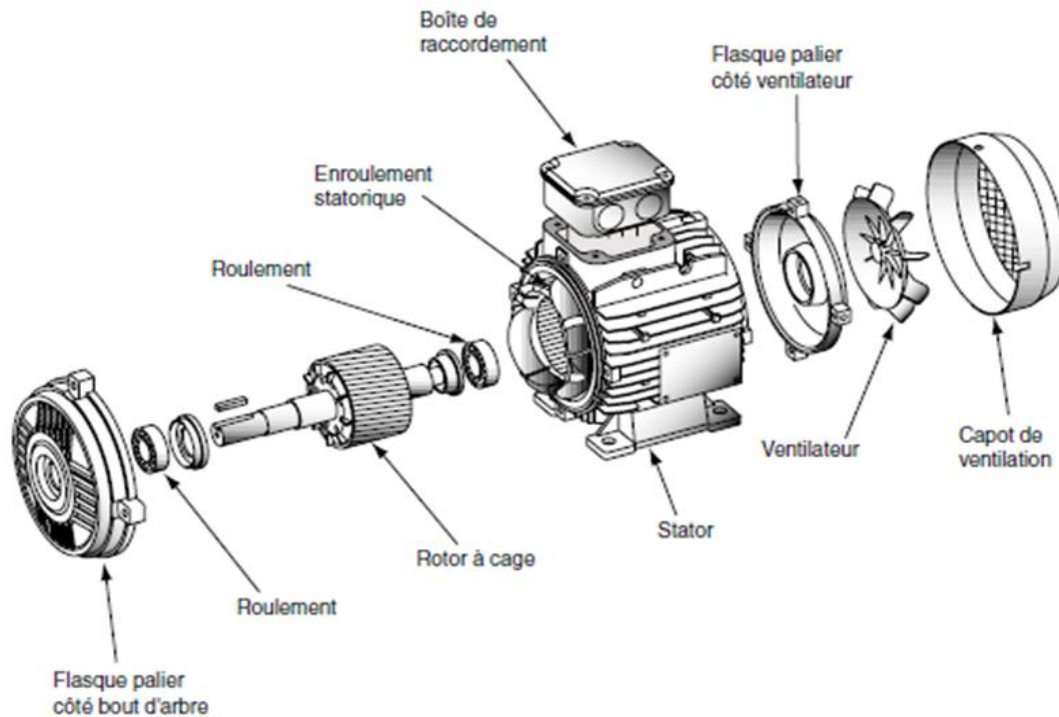
Les roues utilisées dans notre système sont entraînées par un moteur asynchrone à cage d'écureuil. Le moteur asynchrone (MAS) est le moteur le plus utilisé dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de son faible coût, de son faible encombrement, de son bon rendement et de son excellente fiabilité. Son seul point noir est l'énergie réactive, toujours consommée pour magnétiser l'entrefer.

**I.5.3.1 Constitutions d'une MAS à cage**

La MAS se présente sous la forme d'un carter entourant les circuits magnétiques, il comprend deux parties principales : Un inducteur fixe nommé stator et un induit mobile nommé rotor, qui est un rotor à cage et il est constitué de barres de cuivre (ou d'aluminium) nues introduites dans les encoches, ces barres sont soudées ou rivetées à chaque extrémité à deux anneaux qui les court-circuitent. Afin d'éviter l'affaiblissement du champ magnétique statorique, le rotor est rempli de disque de tôles d'acier de faible



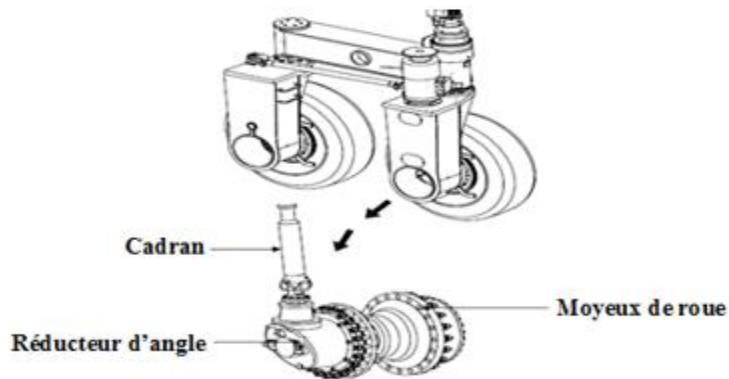
épaisseur (pour minimiser les pertes par courant de Foucault) et isoler électriquement. Et la constitution de la MAS est représentée dans la figure (I.9) [12]:



**Figure (I.9) :** Constitution de la MAS

**I.5.4 Chaîne cinématique**

Elle est constituée des éléments suivants :



**Figure (I.10) :** Les constituants de la chaîne cinématique

**I.5.4.1 Arbre de transmission (cadran)**

C'est un arbre de transmission à cadran, il transmet la puissance des moteurs d'entraînement électrique au réducteur d'angle sur le moyeu de la roue [3].

### **I.5.4.2 Roue motrice**

L'essieu comprend les moyeux de roue et le réducteur d'angle sur les moyeux des roues motrices, la puissance est transmise à la roue à travers le réducteur d'angle et l'engrenage planétaire intégré au moyeu de roue [4].

### **I.5.4.3 Réducteur d'angle**

Le réducteur d'angle réduit la vitesse de rotation transmise par les moteurs, et il impose un couple très important pour faire tourner la roue et changer l'angle de transmission [3].

## **I.6 Fonctionnement de la chaîne de translation de l'RTG**

La chaîne de translation commence par le groupe électrogène ou le moteur diesel fait tourner la génératrice à une vitesse constante de  $\Omega = 1500$  tr/min, la génératrice produit une tension triphasée de valeurs 400 V avec une fréquence de 50 Hz, l'énergie électrique est utilisée afin de tourner les moteurs d'entraînement électrique.

Pour que cette énergie puisse alimenter les moteurs électriques, elle doit passer par un redresseur commandé. Pour transformer les courants alternatifs aux courants continus. L'onduleur transforme encore les courants continus aux courants alternatifs variables pour varier la vitesse de rotation des moteurs d'entraînement.

Les moteurs d'entraînement tournent à des vitesses variables, pour répondre aux exigences du conducteur et de la sécurité, la puissance mécanique fournie par les moteurs d'entraînement est transmise au réducteur d'angle à travers l'arbre de transmission (cadran), le réducteur d'angle fait tourner la roue à une vitesse réduite à un couple important.

## **I.7 Captures de la chaîne de translation de la RTG**

La translation du portique ne peut se réaliser que si l'API reçoit un signal correct des capteurs de direction et d'entraînement. S'il n'apparaît pas une position correcte durant le temps réglé, un message de défaut s'affichera à l'écran de l'utilisateur et la RTG s'arrêtera automatiquement [3].

### **I.7.1 Dispositif anticollision**

C'est un système de sécurité active, conçu pour réduire la gravité des accidents, il dispose de deux capteurs :

#### **I.7.1.1 Capteur de distance**

L'appareil utilise un laser pour mesurer la distance et la vitesse d'approche de la RTG à un objet, ce qui permet d'alerter le conducteur et de freiner la RTG afin d'éviter la collision, le dispositif anticollision se trouve devant les cadres latéraux et il peut mesurer à une distance de 6 m avec un angle de  $120^\circ$ .

Et si le capteur détecte un obstacle, la RTG changera sa vitesse de translation à  $v = 15$  m/min pour que elle s'approche de cette obstacle.



Figure (I.11) : Capteur de distance

### I.7.1.2 Interrupteurs de translation et d'anticollision "moustaches de chat"

L'interrupteur de translation et d'anticollision est un capteur de fin de course (capteur digital normalement fermé), situé aux deux bouts de la roue de translation, son rôle est d'éviter les accidents avec tout engin à la proximité de la RTG.

On trouve huit capteurs en général positionnés aux quatre coins de chaque côté de la RTG



Figure (I.12) : Capteur fin de course anticollision

## I.7.2 Capture des moteurs d'entraînement

### I.7.2.1 Capture de position (encodeur)

Un encodeur est un dispositif électromécanique qui génère un signal électrique en fonction de la position ou du déplacement de l'élément mesuré, un encodeur permet d'obtenir une information en quasi-temps réel sur la position et la vitesse du moteur pour appliquer les corrections (boucle de contrôle), il envoie un signal de 6 bits à l'API [3].

La plupart des encodeurs utilisent des capteurs optiques (codeur incrémental). L'idée est de placer un disque alternant des zones transparentes et opaques devant un capteur de lumière, et de mettre le disque solidaire à l'axe de rotation de la roue. La fréquence d'apparition des zones blanches et noires (ou de tout autre principe offrant un contraste suffisant) devant le capteur de lumière qui indique la vitesse de rotation.

**I.7.2.2 Capture de température**

La température d'un objet détermine la sensation de chaud ou de froid ressentie en le touchant La température est une mesure de l'énergie cinétique moyenne des particules d'un échantillon de matière, exprimée en unités de degrés sur une échelle standard.

Le capture se trouve dans le moteur, il permet de mesuré la température dans le moteur d'entraînement et de l'envoyer à la API, et si elle dépasse une température de 50°C, l'API affichera un message de défaut et arrêtera la RTG.

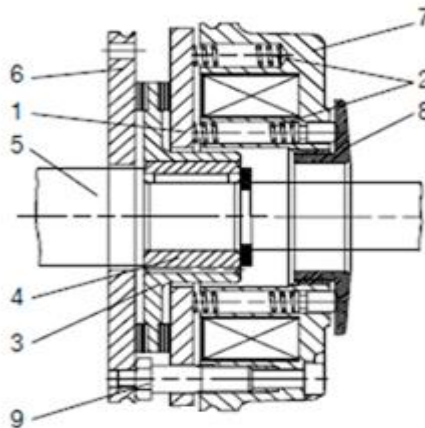
**I.8 Système de freinage**

Le système de freinage est assuré par un frein à ressorts à manque de courant, qui est un frein mono disque à deux faces de friction. Le couple de freinage est généré par une friction produite par plusieurs ressorts. Le frein est débloqué par un champ électromagnétique [2].

Le frein à ressorts à manque de courant est conçu pour la transformation d'un travail mécanique ainsi que l'énergie cinétique en énergie thermique, pour des vitesses de fonctionnement. Le couple de freinage statique permet de tenir différentes charges sans vitesse différentielle [3].

**I.8.1 Description de système**

La constitution du système de freinage est donnée dans la figure(I.13) :



- |                         |                     |
|-------------------------|---------------------|
| 1. Disque d'armature    | 6. Bride            |
| 2. Ressorts de pression | 7. Corps inducteur  |
| 3. Rotor                | 8. Bague de réglage |
| 4. Moyeu                | 9. Vis creuses      |
| 5. Arbre                |                     |

**Figure (I.13) :** Constitution de système de freinage

**I.8.2 Freinage**

Lors du freinage, le rotor mobile translate sur le moyeu par l'action des ressorts intérieurs et extérieurs, il est poussé contre la face de friction via le disque d'armature. Les garnitures de friction sans amiante assurent un couple de freinage élevé et usure minimale. La transmission du couple de freinage du moyeu au rotor s'effectue par des cannelures [2].

**I.8.3 Déblocage de système de freinage**

En position de freinage, un entrefer apparaît entre le corps inducteur et le disque d'armature, pour débloquent le frein, on excite la bobine du corps inducteur par une tension adéquate, le champ magnétique ainsi généré attire le disque d'armature contre le corps inducteur, en s'opposant à la force exercée par les ressorts. Le rotor n'est plus soumis au couple de freinage et le frein est libéré.

Pour débloquent momentanément le frein en l'absence de tension électrique, un déblocage manuel est disponible en option. Ce dispositif peut être monté ultérieurement [3].

**I.8.4 Freinage dynamique**

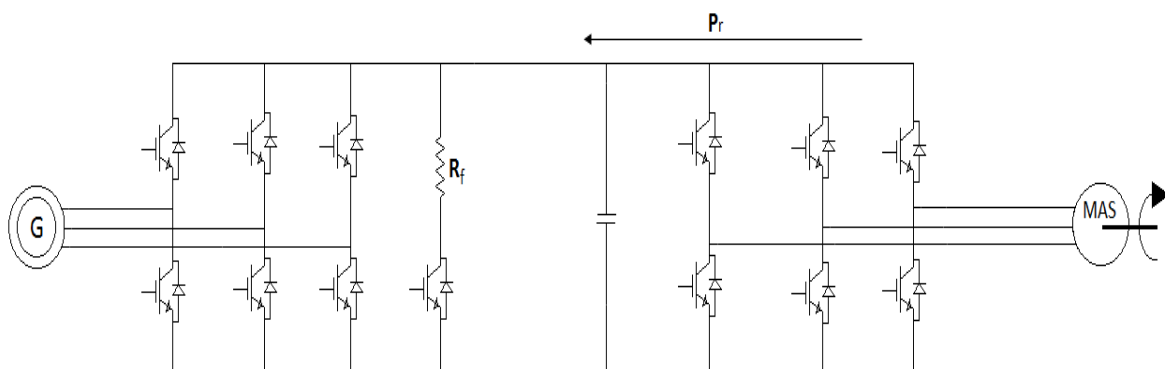
Si le moteur est entraîné par une force extérieure, une quantité considérable d'énergie régénérative est dirigée vers le circuit intermédiaire.

Pour des raisons de coût et d'espace, les condensateurs ne peuvent pas stocker beaucoup d'énergie. Par conséquent, l'énergie électrique est convertie en chaleur dans une résistance (résistance de freinage), cette résistance est active par un transistor qui fonctionne comme un commutateur à deux points (la résistance est activée/désactivée entre deux valeurs de tensions) [13].

L'avantage de freinage rhéostatique est que le comportement de freinage défini :

- Pas d'échauffement supplémentaire du moteur ;
- Couple de freinage constant.

Et l'inconvénient de ce freinage est qu'une résistance est requise, et la puissance génératrice est dissipée sous forme de chaleur.



**Figure (I.14) : Freinage dynamique de moteur**

Avec :

$P_r$  : Puissance générée par le freinage de la MAS ;

$R_f$  : La résistance de freinage.



### I.9 Système de direction

La rotation des roues s'effectue par un moteur électrique sans mécanismes de blocage de position de roue distinct, les modes de direction multiples commandées depuis la cabine du conducteur.

Les différentes directions de la RTG sont comme suite [2]:

- Transversal 0° (Mode de translation normal ou mode conteneur normal) ;
- Carrousel ~23° (tourne autour du point central du portique), mais se mode n'est pas utilisé à BMT ; à cause de manque de surface pour effectuer ce mode ;
- Longitudinal 90° (Mode transversal ou rotation des roues de 90°) ;
- Roues en position de stationnement (mode parking).

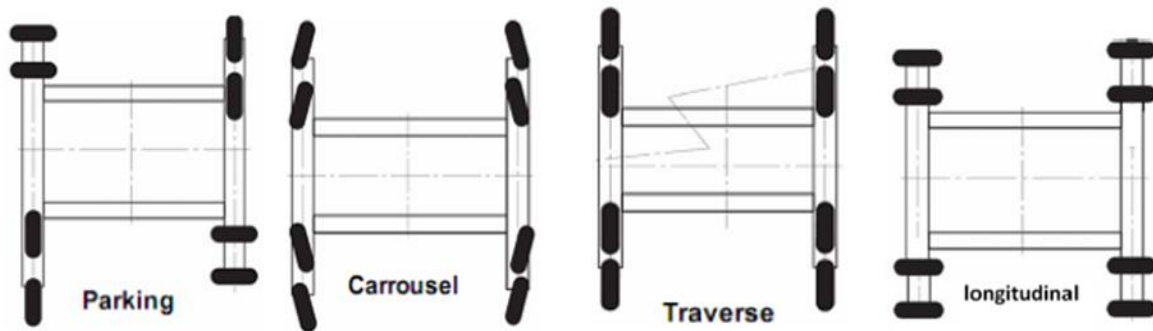
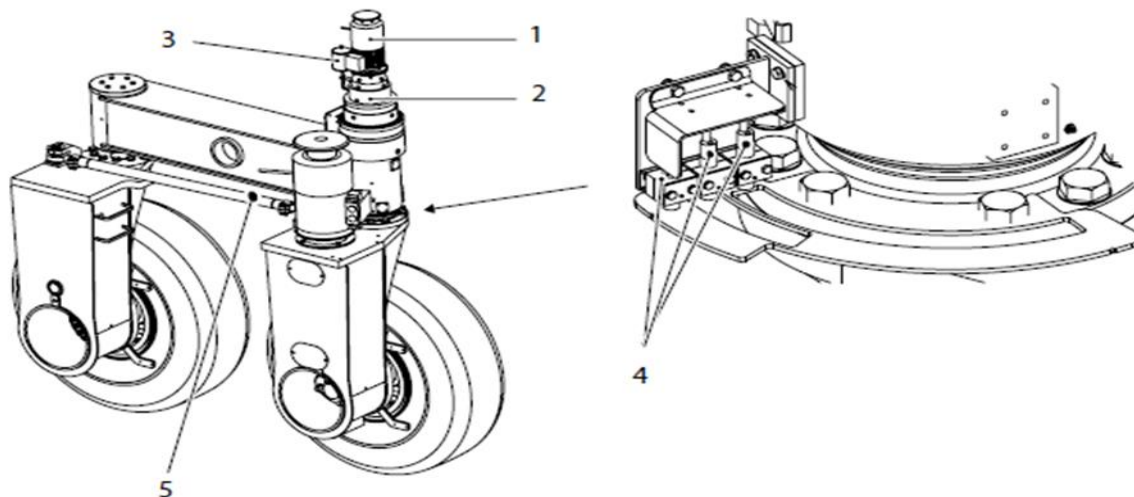


Figure I.15 : Différentes directions de la RTG

#### I.9.1 Constitutions du système de direction

La constitution de système de direction est donnée dans la figure(I.16) :



- |   |                           |
|---|---------------------------|
| 1. Moteur de rotation dans notre cas c'est un MAS | 3. Réservoir d'huile      |
| 2. Engrenage planétaire                           | 4. Commutateurs inductifs |
|   | 5. Bielle de direction    |

Figure (I.16) : Constitution de système de direction

**I.10 Conclusion**

Après avoir présenté l'entreprise et le lieu où s'est déroulé notre travail de recherche et notre stage de fin d'étude, on a pu rassembler les informations nécessaires pour étudier la RTG.

Dans ce chapitre nous avons montré les différentes fonctions de la RTG tel que levage, chariotage et la chaîne de translation. Ce dernier étant le sujet de notre étude, donc on a défini les différents organes constituants de cette chaîne ainsi le rôle de chacun d'eux.

Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation des différentes parties de la chaîne de translation.

# **Chapitre II**

**Modélisation des différentes  
parties de la chaîne de  
translation**



## II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons modéliser la MAS qui entraîne la chaîne de translation de la RTG, ainsi que son onduleur, et la chaîne mécanique pour calculer le couple de charge de la RTG que la MAS doit entraine.

## II.2 Description de système à commander

Le système contient une roue entraînée par une MAS à travers un système cadron/réducteur d'angle, la MAS est alimenté par une génératrice par l'intermédiaire d'un onduleur/redresseur, comme représenter sur la figure(II.1) :

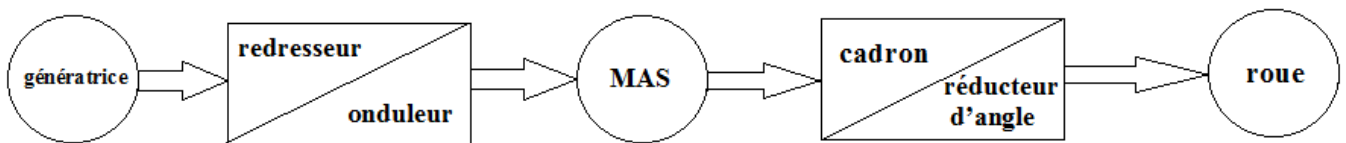


Figure (II.1) : Description de système à commander

## II.3 Modélisation de l'onduleur de tension

Pour modéliser l'onduleur, nous émet des hypothèses, qui nous permettent de modéliser l'onduleur,

Dans ce qui suit, on négligera les imperfections du convertisseur et de la commande, et on prendra en compte les considérations suivantes [16] :

- La source placée du coté continu est parfaite
- Les interrupteurs sont parfaits

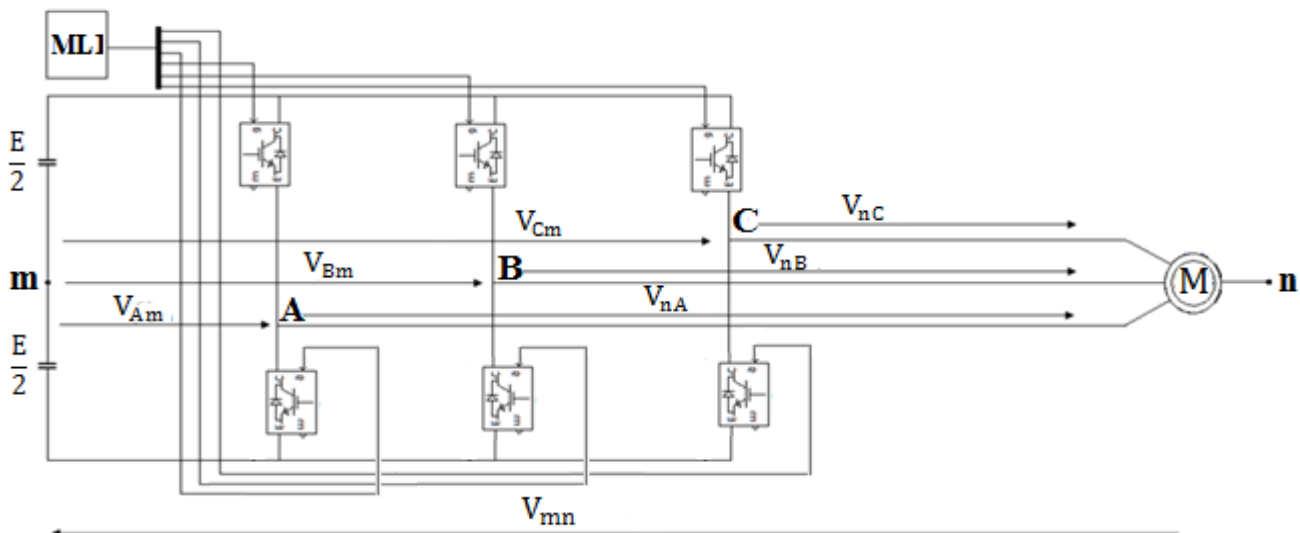


Figure (II.2) : Onduleur de tension.

C'est la relation liant les tensions de sortie ( $V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$ ) aux tensions de référence ( $V_{sa}^*, V_{sb}^*, V_{sc}^*$ ), ce sont des valeurs moyennes est donnée par [17] :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = G_0 \begin{bmatrix} V_{sa}^* \\ V_{sb}^* \\ V_{sc}^* \end{bmatrix} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$$G_0 = \frac{E}{2 \cdot v_p} \quad (\text{II.2})$$

Où :

$v_p$  : Valeur crête de la porteuse ;

$E$  : Tension continue à l'entrée de l'onduleur.

### II.3.1 Modélisations des semi-conducteurs

Il existe deux méthodes de simulation d'un système comportant un convertisseur en électronique de puissance :

- Méthode à topologie fixe
- Méthode à topologie variable

Nous utilisons la méthode à topologie variable dans notre étude.

#### II.3.1.1 Méthode à topologie variable

Dans ce type de méthode, on peut présenter les semi-conducteurs sous la forme d'interrupteurs idéaux. Dans ces conditions, le convertisseur apparait comme une matrice de connexion entre le générateur et le récepteur.

Nous avons choisi la méthode de la topologie variable, car elle nous permet d'assimiler les semi-conducteurs à des interrupteurs parfaits, une résistance nulle à l'état passant, une résistance infinie à l'état bloqué, et une réaction instantanée aux signaux de commande [16,14].

Donc le convertisseur sera modélisé par une matrice qui présente les états logiques des semi-conducteurs :

$$[T_R] = \begin{bmatrix} T_{R1} & T_{R4} \\ T_{R2} & T_{R5} \\ T_{R3} & T_{R6} \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

$T_{Ri}=1$  si le semi-conducteur est passant

$T_{Ri}=0$  si le semi-conducteur est bloqué

Nous définissons aussi la matrice de connexion  $[D]$  qui caractérise les différents états des diodes :

$$[D] = \begin{bmatrix} D_1 & D_4 \\ D_2 & D_5 \\ D_3 & D_6 \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Avec :  $D_i=1$  si la diode est conducteur

$D_i=0$  si la diode est bloqué

Donc l'onduleur sera modélisé par une matrice de connexion [T] :

On pose :

$$T_i = T_{Ri} + D_i \tag{II.5}$$

Ce que nous donne :

$$[T] = \begin{bmatrix} T_1 & T_4 \\ T_2 & T_5 \\ T_3 & T_6 \end{bmatrix} \tag{II.6}$$

Donc les tensions imposées sur chaque bras de l'onduleur :

$$\begin{bmatrix} V_{mA} \\ V_{mB} \\ V_{mC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 & T_4 \\ T_2 & T_5 \\ T_3 & T_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{U_{red}}{2} \\ \frac{U_{red}}{2} \end{bmatrix} \tag{II.7}$$

On a aussi :

$$\begin{cases} V_{mA} = V_{An} + V_{nm} \\ V_{mB} = V_{Bn} + V_{nm} \\ V_{mC} = V_{Cn} + V_{nm} \end{cases} \tag{II.8}$$

Pour un système équilibré, on a :

$$\begin{cases} I_A + I_B + I_C = 0 \\ V_{An} + V_{Bn} + V_{Cn} = 0 \end{cases} \tag{II.9}$$

Ce qui nous permettra de déduire le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} V_{An} = \frac{2}{3}V_{mA} - \frac{1}{3} \cdot (V_{mB} + V_{mC}) \\ V_{Bn} = \frac{2}{3}V_{mB} - \frac{1}{3} \cdot (V_{mA} + V_{mC}) \\ V_{Cn} = \frac{2}{3}V_{mC} - \frac{1}{3} \cdot (V_{mA} + V_{mB}) \end{cases} \tag{II.10}$$

On peut écrire ces équations sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{An} \\ V_{Bn} \\ V_{Cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{mA} \\ V_{mB} \\ V_{mC} \end{bmatrix} \tag{II.11}$$

## II.4 Modélisation de la machine asynchrone

Pour établir des relations entre les tensions d'alimentation du moteur et ses courants primaires et secondaires, ainsi les relations entre les flux et les courants, il est nécessaire d'adopter des hypothèses suivantes [9,12,15] :

- 1) La symétrie et l'équilibre de la machine
- 2) Une répartition sinusoïdale le long de l'entrefer
- 3) Négligence de la saturation du circuit magnétique et les pertes fer
- 4) La variation des résistances des enroulements ne dépend pas de la variation de la température est négligé l'effet de peau

### II.4.1 Description

La présentation schématiquement de la machine asynchrone illustre dans la figure(II.3) :

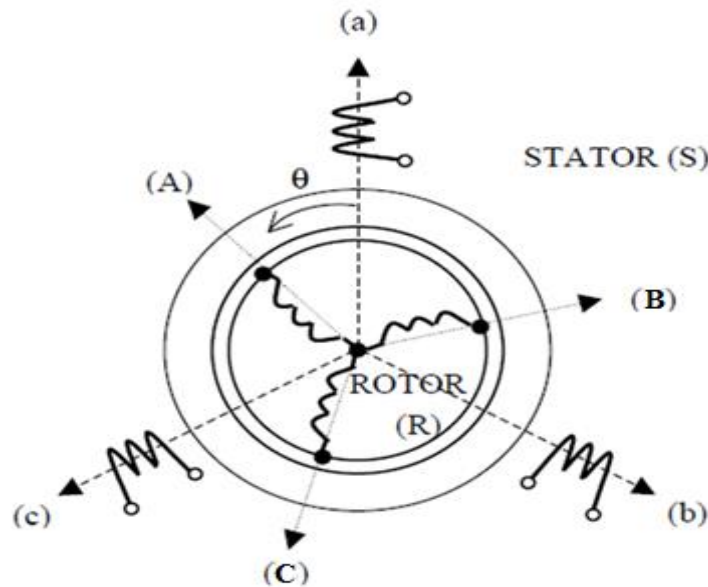


Figure (II.3) : Représentation schématique de la machine asynchrone.

### II.4.2 Equations électriques de la MAS

#### II.4.2.1 Equations de tensions

➤ Pour le stator

$$\begin{cases} v_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d}{dt}(\varphi_{sa}) \\ v_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d}{dt}(\varphi_{sb}) \\ v_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d}{dt}(\varphi_{sc}) \end{cases} \quad (II.12)$$

➤ Pour le rotor

$$\begin{cases} v_{ra} = 0 = R_r i_{ra} + \frac{d}{dt}(\varphi_{ra}) \\ v_{rb} = 0 = R_r i_{rb} + \frac{d}{dt}(\varphi_{rb}) \\ v_{rc} = 0 = R_r i_{rc} + \frac{d}{dt}(\varphi_{rc}) \end{cases} \quad (II.13)$$

Les tensions rotoriques sont nulles car le rotor est court-circuité.

La forme matricielle est détaillée par les expressions (II.14) et (II.15) :

➤ Le stator

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad (II.14)$$

➤ Le rotor

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} \quad (II.15)$$

II.4.2.2 Equations magnétiques

Les hypothèses (1), (2) et (3) nous conduisent à des relations linéaires entre les flux et les courants.

L'écriture matérielle ci-dessous résume les équations des flux statoriques et rotoriques :

➤ Pour le stator

$$[\varphi_s] = [L_s] \cdot [i_s] + [M_{sr}] \cdot [i_r] \quad (II.16)$$

- La matrice des inductances statorique :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad (II.17)$$

- La matrice des inductances mutuelles stator-rotor :

$$[M_{sr}] = M \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (II.18)$$

➤ Pour le rotor

$$[\varphi_r] = [L_r] \cdot [i_r] + [M_{rs}] \cdot [i_s] \quad (II.19)$$

- la matrice des inductances rotorique :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

- la matrice des inductances mutuelles rotor-stator:

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^T = M \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

Pour l'ensemble stator et rotor, on écrira en notation matricielle :

$$\begin{bmatrix} [\varphi_s] \\ [\varphi_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

D'après les équations précédentes, en obtiendra finalement :

$$\begin{cases} [v_{sabc}] = [R_s] \cdot [i_{sabc}] + \frac{d}{dt} \{ [L_s][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}] \} \\ [v_{rabc}] = [R_r] \cdot [i_{rabc}] + \frac{d}{dt} \{ [L_r][i_{rabc}] + [M_{rs}][i_{sabc}] \} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

### II.4.3 Energie électromagnétique

Nous la calculons par l'expression (II.24) :

$$W_e = \frac{1}{2} ([i_s]^t [\varphi_s] + [i_r]^t [\varphi_r]) \quad (\text{II.24})$$

### II.4.4 Equation de couple électromagnétique

Le couple électromagnétique s'exprime par la dérivée partielle d'énergie électromagnétique, nous obtenons alors :

$$C_{em} = p [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}] \frac{d}{d\theta} ([M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}) \quad (\text{II.25})$$

### II.4.5 Equation mécanique

L'équation fondamentale de rotation du rotor est décrite par les relations suivantes :

$$C_{em} - C_r - f \cdot \Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II.26})$$

On a :

$$\Omega = \frac{\omega}{p} \tag{II.27}$$

Avec :

$\Omega$  : vitesse de rotation mécanique;

$J$  : Inertie totale des parties tournantes ramenées au moteur;

$f$  : Coefficient des frottements;

$\omega$  : vitesse électrique.

### II.4.6 Système d’axes lié au champ tournant (d, q)

Le champ tournant est créé par le bobinage statorique, il tourne en régime permanent à la vitesse de synchronisme. Il est symbolisé par le vecteur flux statorique, qui permet de donner une idée visuelle de la phase et du module de l’amplitude du flux.

Ce système d’axe est immobile par rapport au champ électromagnétique créé par les enroulements statoriques donc :

$$\theta_s = \int_0^t \omega_s dt \tag{II.28}$$

### II.4.7 Module biphasé (d, q) de la MAS

#### II.4.7.1 Changement de base

Afin de modéliser la machine dans le repère(d, q), nous effectuons une série de transformation qui nous permettent de passer d’un repère triphasé en repère biphasé tournant.

Nous effectuons une transformation de Clark ou de Concordia qui nous permet de passer au repère biphasé( $\alpha, \beta$ ), après nous utilisons la transformation de Park pour faire une rotation au repère(d, q).

Dans notre cas nous avons utilisé la transformation de Concordia qui conserve la puissance et non les amplitudes.

Le passage du repère fixe ( $\alpha, \beta$ ) au repère tournant (d, q) se fait par une application de la transformation de rotation d’angle  $\theta$ , qui s’appelle la transformation de Park.

La matrice de changement de base est  $[P(\theta)]$  définie par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \tag{II.29}$$

#### II.4.7.2 Equations des tensions dans le repère(d, q)

- Pour le stator

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{so} \end{bmatrix} = [P(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \tag{II.30}$$

Ce que nous donne :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \varphi_{sd} - \omega_s \varphi_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \varphi_{sq} + \omega_s \varphi_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

- Pour le rotor

$$\begin{bmatrix} v_{rd} \\ v_{rq} \\ v_{ro} \end{bmatrix} = [P(\theta - \theta_r)] \cdot \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

Ce que nous donne :

$$\begin{cases} v_{rd} = 0 = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \varphi_{rd} - \omega_r \varphi_{rq} \\ v_{rq} = 0 = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \varphi_{rq} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

### II.4.7.3 Equation de flux dans le repère (d, q)

- Pour le stator

On pose :

$$L_s = l_s - M_s \quad (\text{II.34})$$

Et on appliquant la transformation de Park on aura :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

$$\overline{\varphi}_s = L_s \overline{i}_s + L_m \overline{i}_r \quad (\text{II.36})$$

Avec :

$$L_m = \frac{3}{2} M$$

- Pour le rotor

On pose :

$$L_r = l_r - M_r \quad (\text{II.37})$$

Nous appliquons la transformation de Park nous aurons :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

$$\overline{\varphi}_r = L_r \overline{i}_r + L_m \overline{i}_s \quad (\text{II.39})$$



II.4.7.4 Equations finales de la MAS

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + L_s \frac{d}{dt} i_{sd} + L_m \frac{d}{dt} i_{rd} - \omega_s (L_s i_{sq} + L_m i_{rq}) \\ v_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + L_s \frac{d}{dt} i_{sq} + L_m \frac{d}{dt} i_{rq} + \omega_s (L_s i_{sd} + L_m i_{rd}) \\ v_{rd} = 0 = R_r i_{rd} + L_r \frac{d}{dt} i_{rd} + L_m \frac{d}{dt} i_{sd} - \omega_r (L_r i_{rq} + L_m i_{sq}) \\ v_{rq} = 0 = R_r i_{rq} + L_r \frac{d}{dt} i_{rq} + L_m \frac{d}{dt} i_{sq} + \omega_r (L_r i_{rd} + L_m i_{sd}) \end{cases} \quad (II.40)$$

On pose :

$$\begin{cases} \bar{v}_s = v_{sd} + jv_{sq} \\ \bar{v}_r = v_{rd} + jv_{rq} \end{cases} \quad (II.41)$$

Donc, on aura :

$$\begin{cases} \bar{v}_s = R_s \bar{i}_s + L_s \frac{d}{dt} \bar{i}_s + L_m \frac{d}{dt} \bar{i}_r + j\omega_s (L_s \bar{i}_s + L_m \bar{i}_r) \\ \bar{v}_r = R_r \bar{i}_r + L_r \frac{d}{dt} \bar{i}_r + L_m \frac{d}{dt} \bar{i}_s + j\omega_r (L_r \bar{i}_r + L_m \bar{i}_s) \end{cases} \quad (II.42)$$

Avec :

$$\begin{cases} \bar{i}_s = i_{sd} + ji_{sq} \\ \bar{i}_r = i_{rd} + ji_{rq} \end{cases} \quad (II.43)$$

II.4.8 Schéma équivalent en régime permanent de la MAS (modélé à fuites totalisé de rotor ramené au stator)

Le régime permanent du moteur asynchrone correspond à celui d'une alimentation statorique sinusoïdale triphasé équilibrée, lorsque la vitesse de rotation et donc le glissement sont devenus constants [9].

Le schéma équivalent en régime permanent de la MAS est donné par le schéma représenté dans la figure (II.4) :

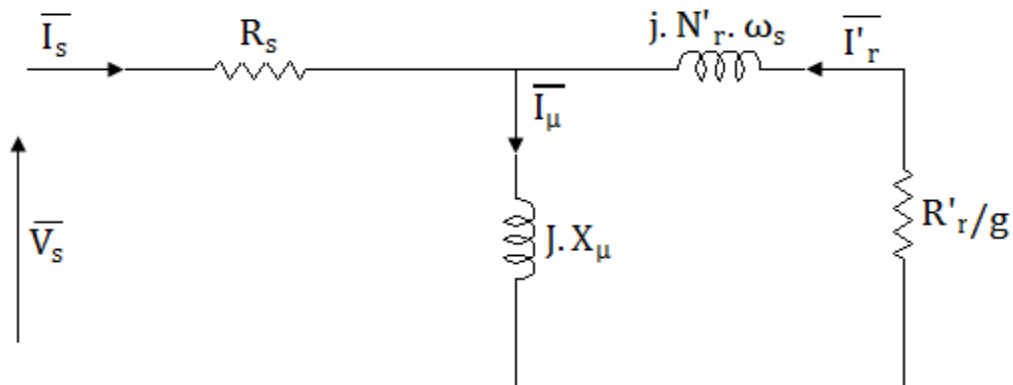


Figure (II.4) : Schéma équivalent en régime permanent de MAS

D'après le schéma dans la figure (II.4), nous pouvons avoir les équations suivantes :

$$\begin{cases} \bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + jX_\mu \bar{I}_\mu \\ \bar{V}_r = 0 = \frac{R'_r}{g} \bar{I}'_r + j\omega_s N'_r \bar{I}'_r + jX_\mu \bar{I}_\mu \end{cases} \quad (II.44)$$

Avec :

$$R'_r = R_r \left(\frac{L_s}{L_m}\right)^2 ; N'_r = N_r \left(\frac{L_s}{L_m}\right) ; \bar{I}'_r = \bar{I}_r \left(\frac{L_m}{L_s}\right) ; X_\mu = L_s \omega_s.$$

• **Le couple électromagnétique**

$$C_{em} = 3 \frac{p R'_r}{g \omega_s} \frac{V_s^2}{\left(\omega_s^2 N'^2_r + \frac{R'^2_r}{g^2}\right)} \quad (II.45)$$

Pour :  $g_M = \frac{R_r}{N_r \omega_r}$

Avec :

$g_M$  : C'est la valeur de glissement pour avoir le couple maximal

Nous aurons le couple maximal :

$$C_{em_{Max}} = \frac{3p}{2N'_r} \left(\frac{V_s}{\omega_s}\right)^2 \quad (II.46)$$

**II.4.9 Expression du couple électromagnétique**

Il existe plusieurs formes du couple, nous donnons l'expression du couple que nous utilisons pour la commande :

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_r} (\varphi_{rd} i_{sq} - \varphi_{rq} i_{sd}) \quad (II.47)$$

**II.5 Modélisation de la chaîne mécanique**

Afin de commander la chaîne de translation de la RTG, nous commençons par calculer le couple de charge de la chaîne de translation. La RTG suit le même principe qu'une voiture, les forces exercées sur la RTG sont de nombre de trois, la force due à la pente, la force résistante au mouvement et enfin la force de résistance aérodynamique.

**II.5.1 Force due à la pente**

La force due à la pente est donnée par l'expression (II.48) :

$$F_{pente} = mg \sin \theta \quad (II.48)$$

La surface d'opération de la RTG est horizontale, donc l'angle d'inclinaison  $\theta$  est nul, ce que nous donnée :

$$F_{pente} = 0 \text{ N}$$

**II.5.2 Force résistance au mouvement**

Les forces de résistance au roulement recouvrent des effets provenant de différentes sources, comme le travail de déformation des pneumatiques, le frottement des roulements, le travail de la suspension et les défauts d’alignements.

De manière générale, les forces de résistance qui sont rassemblées sous le terme des forces de résistance au roulement ont en commun le pouvoir qui s’exprime par l’expression (II.49) :

$$F_r = f_r \cdot m \cdot g \cdot \cos \theta \tag{II.49}$$

Avec :

$f_r$  : Coefficient de résistance au roulement ( $f_r = 0.01$  m) ;

$m$  : elle varie en fonction de la charge portée par la RTG ( $39250 \text{ kg} < m < 49250 \text{ kg}$ ) ;

$g$  : gravite ( $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ).

La RTG à quatre moteurs d’entraînement, il suffit de calculer le couple résistant pour un seul moteur. Il sera le même pour les autres. Donc nous devons diviser la masse de notre RTG en quatre parties symétriques de sorte que les quatre moteurs subissent les mêmes contraintes sur chaque côté.

**II.5.3 Force de résistance aérodynamique**

L’écoulement de l’air autour du véhicule en mouvement donne naissance à des forces aérodynamiques, qui peuvent s’exprimer comme suit :

$$F_v = KSV^2 \tag{II.50}$$

Avec :

$K$  : Coefficient de forme ( $K = 0.9$ ) ;  $S$  : Surface ( $S = 14.7\text{m}^2$ ) ;  $V$  : vitesse de vent ( $0 \text{ m/s} < V < 25 \text{ m/s}$ ).

Nous suivons le même principe que la masse pour la surface et nous divisons la surface en quatre parties symétriques.

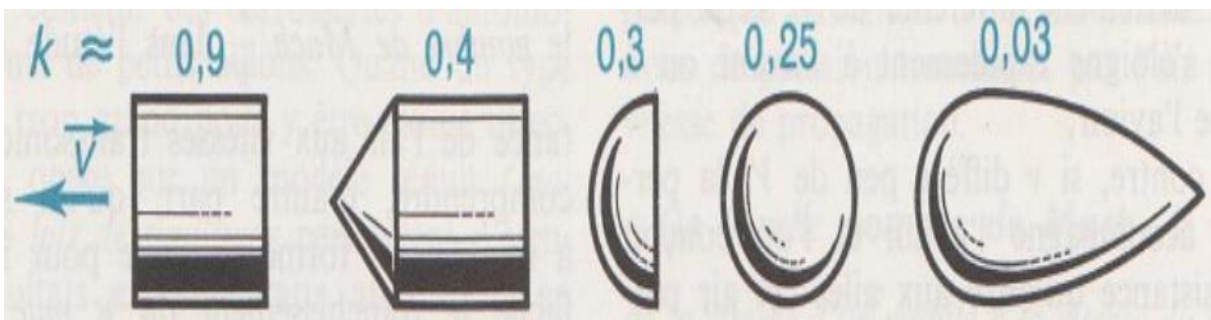


Figure (II.5) : Coefficient de forme pour des différentes formes

Donc la force résistante totale et la somme des différentes forces exercent sur la RTG :

$$F_T = F_{\text{pente}} + F_r + F_v \quad (\text{II.51})$$

Le couple de charge est calculé à partir de la somme des forces :

$$C_{\text{ch}} = F_T R \quad (\text{II.52})$$

Avec :

R : Rayon de la roue (R = 0.825 m).

#### II.5.4 Vitesse de rotation de la roue

La vitesse de rotation de la roue est calculée à partir de vitesse de translation de la RTG :

$$\omega_2 = \frac{v}{R} \quad (\text{II.53})$$

Avec :

v : Vitesse de translation de la RTG (m/s);

R : Rayon de la roue (R = 0.825 m).

#### II.5.5 Réducteur d'angle

Le réducteur d'angle est caractérisé par son rapport de réduction et son rendement, nous pouvons calculer son rapport de réduction à partir de la vitesse de rotation de la roue et de moteur :

$$r = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (\text{II.54})$$

Avec :

$\omega_1$  : Vitesse de rotation du moteur d'entraînement ( $\omega_1 = 153.3$  rad/s).

Nous pouvons calculer le couple charge ramené au moteur, qui est donné dans l'expression (II.55) :

$$C_{\text{chramene}} = \frac{C_{\text{ch}}}{\eta r} \quad (\text{II.55})$$

Avec :

$\eta$  : Rendement de réducteur ( $\eta = 0.9$ ).

**II.6 conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons modélisé les différentes parties (onduleur, moteur et la chaîne mécanique) de notre système, ainsi nous avons calculé le couple de charge ramené au moteur. Cette modélisation est indispensable dans le chapitre suivant, où nous à fait référence à ces modèles lors de l'élaboration et la simulation numérique de nos algorithmes de commande.

# **Chapitre III**

## **Commande de la chaine de translation**

### III.1 Introduction

La commande existante dans la chaine de translation est la commande scalaire, et vu le fonctionnement de la RTG cette commande ne convient pas à ce système.

Dans ce chapitre, en premier temps nous étudions la commande scalaire puis la simuler sur MATLAB afin de visualiser les différentes grandeurs de la machine telle que la vitesse, le couple, le courant.

En Deuxième cas, nous exposera les principes du contrôle vectoriel à flux orienté en se limitant plus particulièrement à la commande à flux rotorique orienté. Ensuite, nous introduira la structure du la commande, suivi d'une simulation. Afin d'interpréter les résultats obtenus pour comparer et proposer une solution convenable.

### III.2 Commande scalaire de la chaine de translation de la RTG

#### III.2.1 Principe de la commande scalaire

La commande scalaire d'un MAS est de garder le flux constant dans la machine et de régler la fréquence (pulsation) d'alimentation statorique. Plusieurs commandes scalaires peuvent être envisagées selon que l'on agit sur le courant ou sur la tension. Elles dépendent de la topologie de l'actionneur utilisé (onduleur de tension ou de courant). L'onduleur de tension étant maintenant le plus utilisé en petite et moyenne puissance, c'est la commande en  $V/f$  qui est la plus utilisé [9].

#### III.2.2 Contrôle en $V/f$ de la MAS

Le principe de la commande scalaire est de garder le flux constant et de faire variée la pulsation statorique. Pour maintenir le flux statorique constant, il faut que la fréquence d'alimentation statorique répond à la relation :

$$\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s} = \text{cst} \tag{III.1}$$

Chaque fois qu'on fait varier  $\omega_s$ , on varie au même temps  $V_s$  afin de garder le flux nominal constant. Le couple électromagnétique est donné par la relation (II.45) et le couple maximal est donné par l'expression (II.46).

Donc pour contrôler le couple, on agit sur le glissement, et on voit que le couple maximal est directement proportionnel au rapport  $(\frac{V_s}{\omega_s})^2$ .

Nous maintenons ce rapport constant et en jouons sur la fréquence statorique, et déplaçons la courbe du couple électromagnétique de la MAS tout en gardant le couple maximal constant [18].

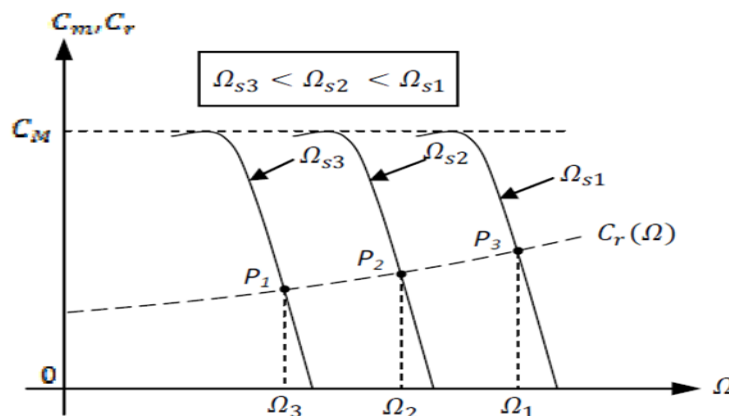


Figure (III.1) : Déplacement de la caractéristique couple- vitesse en fonction de la fréquence d'alimentation

Dans cette commande il y a des constatations qui doivent être signalées ici [9] :

- Pour des valeurs faibles de pulsation statorique  $\omega_s$ , une correction (compensation) est nécessaire pour tenir compte de terme  $R_s I_s$ , représentant la chute de tension dans les enroulements statoriques. Nous réalisons une compensation par augmentation de l'amplitude des tensions statoriques aux faibles valeurs de  $\omega_s$ , alors nous ajoutons un terme de tension  $V_{s0}$ .
- Pour des grandes valeurs de pulsation statorique (en régime de survitesse), l'augmentation de la pulsation ne peut pas être accompagnée par une augmentation de la valeur de la tension au-delà de sa valeur nominale, le flux  $\varphi_s$  est diminué (défluxage), ce que provoque une diminution de couple.

Ces deux constatations sont interprétées schématiquement par la figure (III.2) :

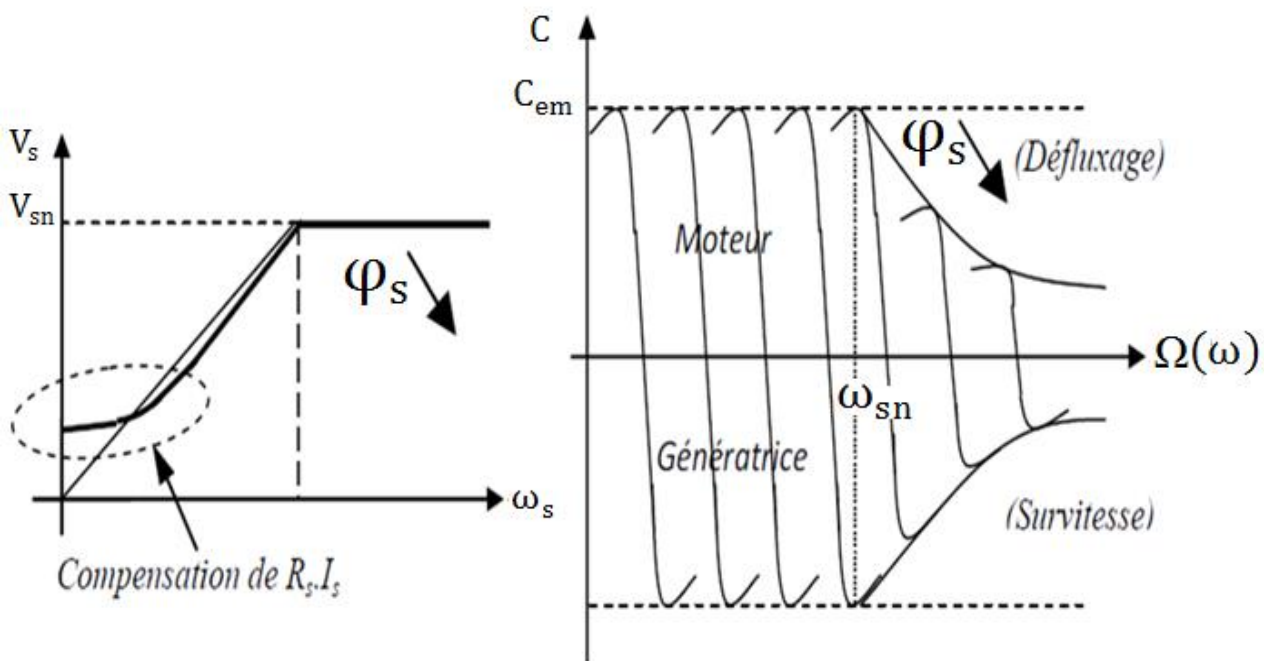


Figure (III.2) : Caractéristiques de réglage par variation de la fréquence d'alimentation d'une MAS

### III.2.3 Réalisation de l'asservissement de la vitesse

Le schéma de commande dans la figure (III.3), présente la manière de réguler la vitesse de la machine en reconstituant la pulsation statorique à partir de la vitesse mesurée et de la pulsation rotorique. Cette dernière, qui est l'image du couple de la machine est issue du régulateur de vitesse. Si la machine est chargée, la vitesse a tendance de baisser, le régulateur fournit plus de couple (donc plus de glissement) afin d'assurer cet équilibre. La pulsation statorique est donc modifiée pour garder cet équilibre. La tension est calculée de manière à garantir le mode de contrôle en  $V/f = \text{cst}$  de la machine [18].



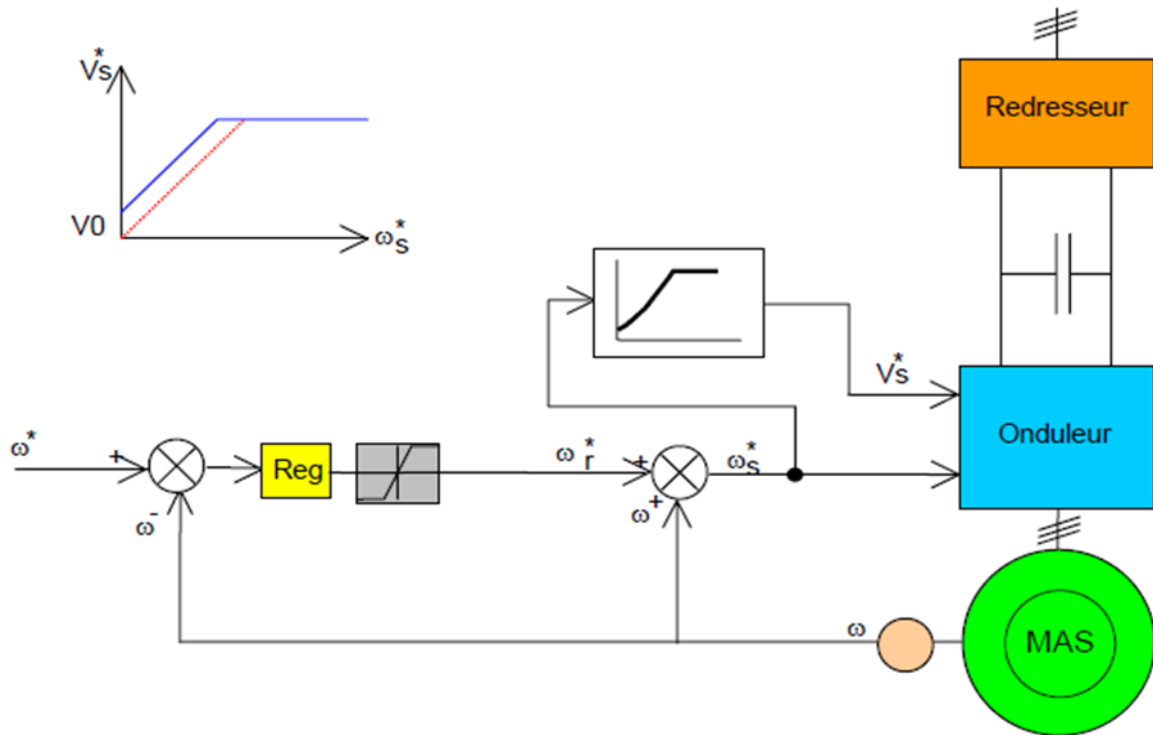


Figure (III.3) : Asservissement de la vitesse d’une commande scalaire.

### III.3 Technique MLI de l’onduleur de tension

Le principe de fonctionnement de la MLI est de comparer une tension sinusoïdale « modulatrice » à une tension triangulaire « porteuse » de fréquence plus élevée par rapport à la fréquence de modulation ( $f_p \gg f_{ref}$ ). Nous réduisons ainsi le taux d’harmonique et le filtrage devient plus simple [19].

Cette technique est caractérisée par deux paramètres :

#### III.3.1 Indice de modulation m

L’indice de modulation (m) Égal à la fréquence de modulation sur la fréquence de référence :

$$m = \frac{f_p}{f_{ref}} \tag{III.2}$$

#### III.3.2 Taux de réglages r

Le taux de réglages (r) Égal à l’amplitude de la tension de référence sur la valeur de crête de l’onde de modulation :

$$r = \frac{V_{ref}}{V_p} \tag{III.3}$$

Le signal de sortie est composé d’une suite d’impulsions dans la durée est modulée sinusoïdalement ce qui permet de déterminer la tension de sortie de l’onduleur. Le fondamental de tension de sortie d’onduleur est proportionnel au taux de modulation, par conséquent, en jouant sur  $r$  on peut contrôler l’amplitude du fondamental, de la tension de sortie de l’onduleur.

Dans la pratique, nous nous arrangeons toujours à avoir un taux de modulation inférieur à l'unité, de façon à éviter les rates de commutation qui pourront entraîner des discontinuités de fonctionnement, et en particulier dans les applications à vitesse variable où l'on fait varier l'amplitude de la tension de référence.

La valeur de l'indice de modulation est sujette à un compromis entre un bon rejet des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur qui se détériore à cause des pertes de commutations [20].

Les équations des tensions de référence :

$$\begin{cases} v_{\text{ref1}} = V_{\text{mref}} \sin(\omega_{\text{sref}} t) \\ v_{\text{ref2}} = V_{\text{mref}} \sin(\omega_{\text{sref}} t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_{\text{ref3}} = V_{\text{mref}} \sin(\omega_{\text{sref}} t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

### III.4 Simulation de système

#### III.4.1 présentation de Simulink

MATLAB est un logiciel destiné principalement au calcul scientifique, à la modélisation et à la simulation. Le noyau de calcul est associé à l'environnement SIMULINK, permettant une modélisation basée sur des schémas-blocs.

Des bibliothèques spécialisées sont disponibles (les « Toolboxes ») pour la plupart des domaines scientifiques nécessitant des moyens de calcul importants [32].

La simulation proposée est réalisée sous l'environnement Simulink/MATLAB version R2013a. Les paramètres de simulation sont donnés dans l'annexe.

#### III.4.2 Visualisation des courbes de la commande scalaire

On procède à la simulation numérique du système (convertisseur, commande, moteur et charge) pour des différentes valeurs de couple de charge et pour une petite consigne de rampe de vitesse pour visualiser le comportement de la commande scalaire de la MAS à base vitesse.

Le couple de charge imposé dans notre commande est variable en fonction de la charge imposée à ce système et il est réparti sur des intervalles de temps comme suite :

[0 3.5]s:  $C_r = 57 \text{ N.m}$

[3.5 6.5]s:  $C_r = 202 \text{ N.m}$

[6.5 9]s:  $C_r = 101 \text{ N.m}$

Et pour une valeur de vitesse :

[0 1]s : une rampe

[1 9]s :  $\Omega = 8 \text{ rad/s}$

Nous lance la simulation sur un intervalle de temps de 9s puis on relève les différentes grandeurs de la MAS :

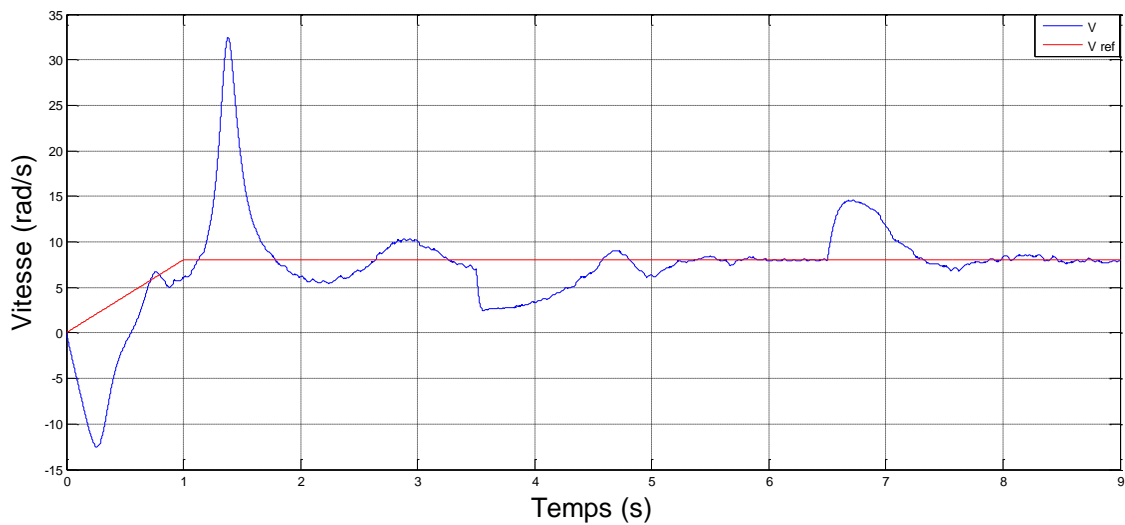


Figure (III.4) : Allure de la vitesse de rotation de la MAS

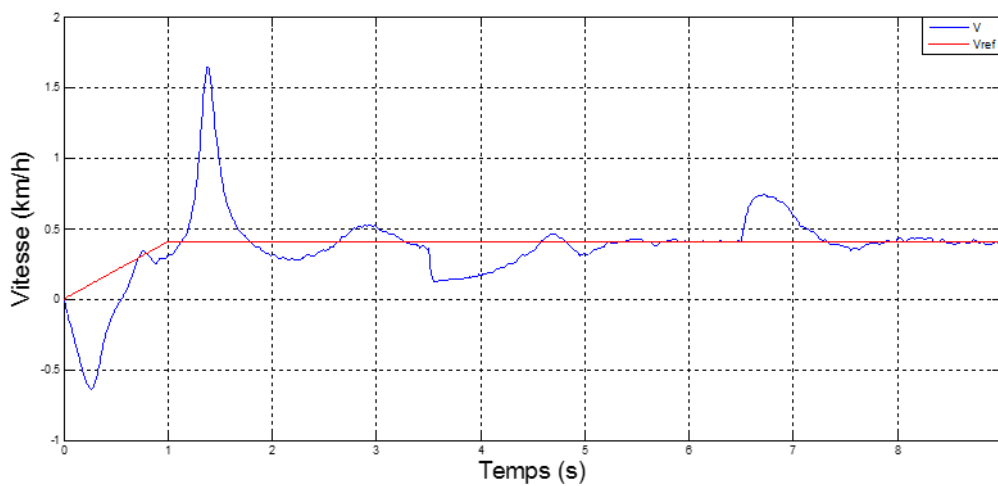


Figure (III.5) : Allure de la vitesse de translation de la RTG

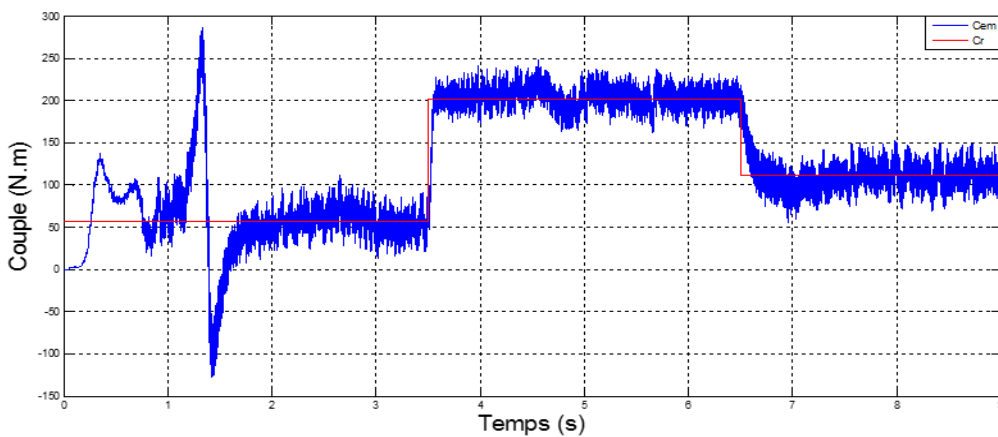


Figure (III.6) : Allure de couple électromagnétique

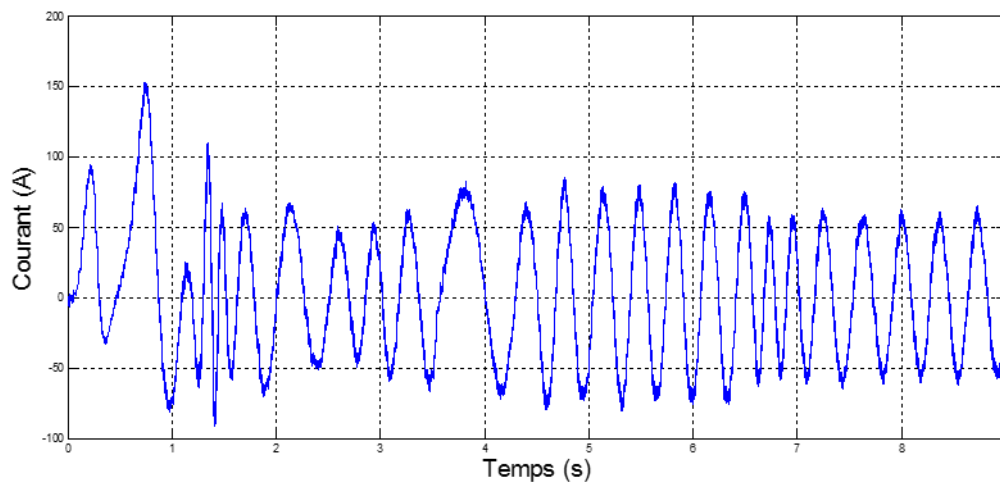


Figure (III.7) : Allure de courant  $I_{sa}$

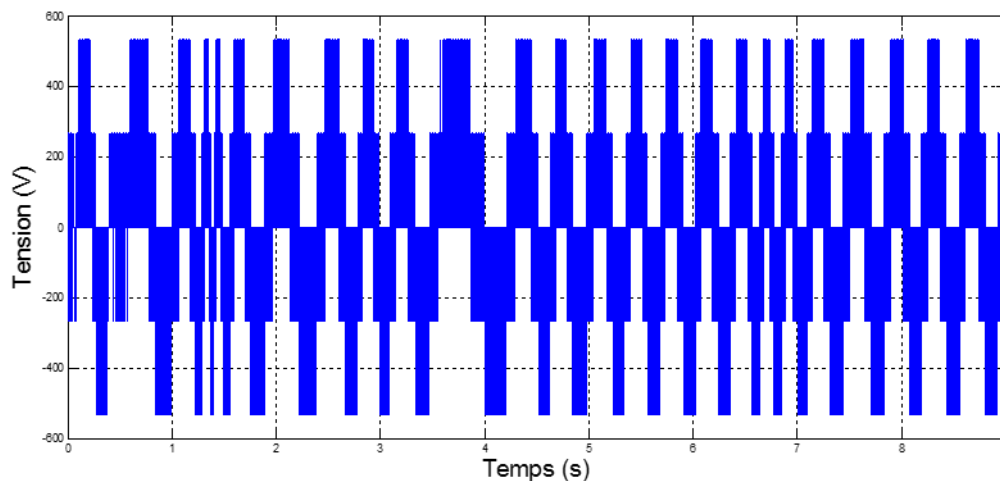


Figure (III.8) : Allure de la tension  $V_{sa}$

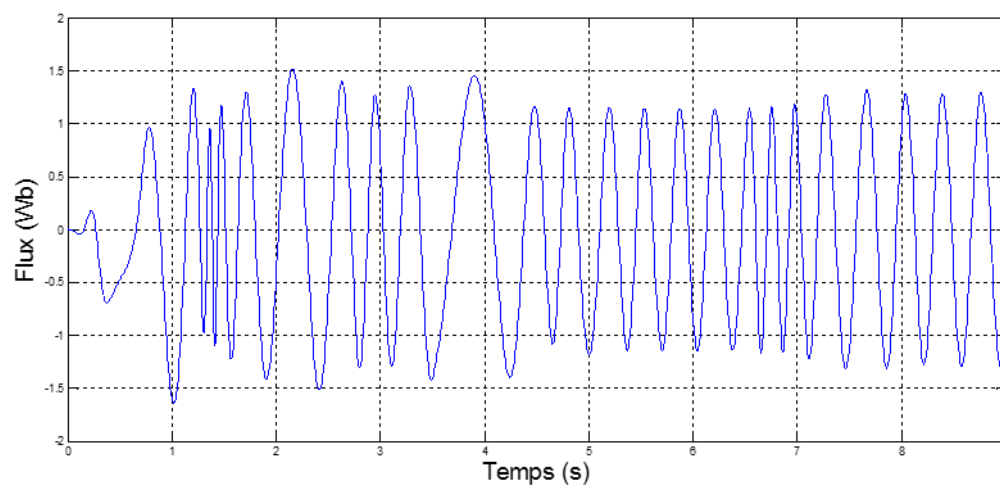


Figure (III.9) : Allure d'une phase de flux statorique

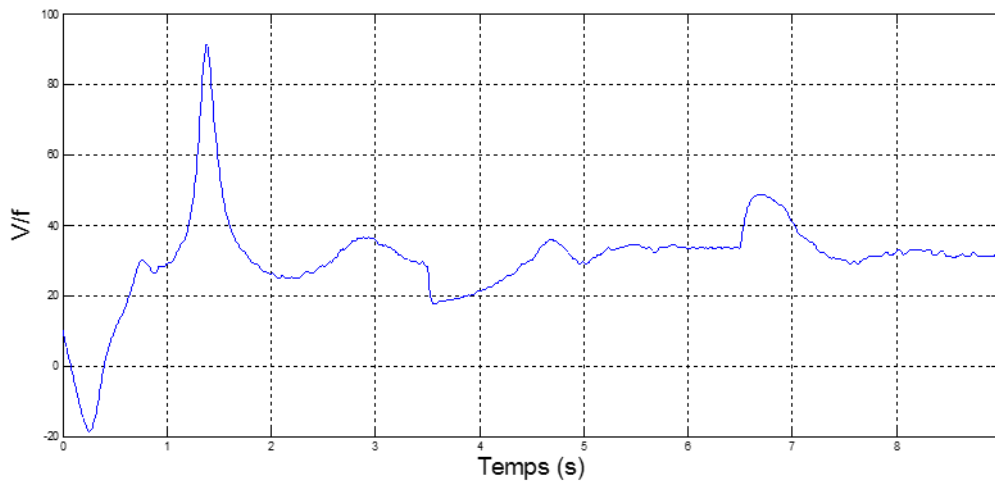


Figure (III.10) : Allure de rapport V/f

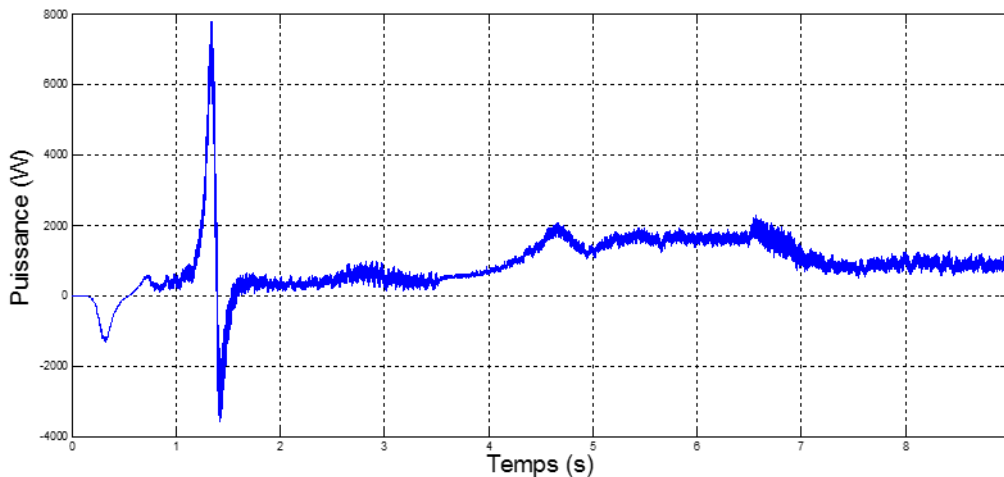


Figure (III.11) : Allure de la puissance de la MAS

### III.4.3 Interprétation des résultats

On remarque d'après les résultats obtenues que :

- La vitesse de rotation et la vitesse de translation suit la vitesse de référence mais avec un grand dépassement et une précision insuffisante, et que les vitesses présentent des perturbations à chaque fois que le couple électromagnétique change de valeur, mais il maintient toujours sa valeur en régime permanent.
- Le couple électromagnétique suit le couple de charge avec une légère différence à cause des frottements de la MAS, et que le couple électromagnétique au régime transitoire n'est pas maîtrisé et que il présente des perturbations, et nous remarquons aussi des harmoniques dans le couple électromagnétique à cause de l'onduleur et on peut minimiser ces harmoniques par un filtre passe-bas à la sortie de l'onduleur.
- Les courants statoriques varient en fonction du couple électromagnétique.
- La tension statorique change de fréquence à chaque fois que la vitesse de valeur.
- Le flux est presque maintenu constant.

- Le rapport  $v/f$  est presque maintenu constant au régime permanent et en remarque aussi la compensation pour la chute de tension à la résistance statorique.
- La puissance de la MAS varie en fonction de couple électromagnétique.

D'après les résultats obtenus nous constatons que la commande scalaire n'est pas performante pour les commandes à base vitesse à cause de ce manque de précision et de rapidité et qu'elle ne maîtrise pas le couple instantané surtout dans le régime transitoire, et que la commande scalaire a besoin d'une compensation pour les contrôles à base vitesse, et si la compensation est trop grande, la tension après la résistance statorique va être trop grande par rapport à la tension acceptée et la machine va saturer, entraînant une augmentation du courant magnétisant et, pour conclure, une dégradation prématurée.

Et à cause des inconvénients de la commande scalaire on propose la commande vectorielle à flux rotorique orienté pour mieux contrôler notre système.

### III.5 Commande vectorielle à flux orienté

La commande par orientation de flux consiste à régler le flux par une composante de courant et le couple par l'autre composante, pour cela, il faut choisir un système d'axe  $(d, q)$  et une loi de commande assurant le découplage du couple et du flux. Ceci permet de ramener le comportement de la machine asynchrone à celui de la machine à courant continu à excitation séparée [26,28].

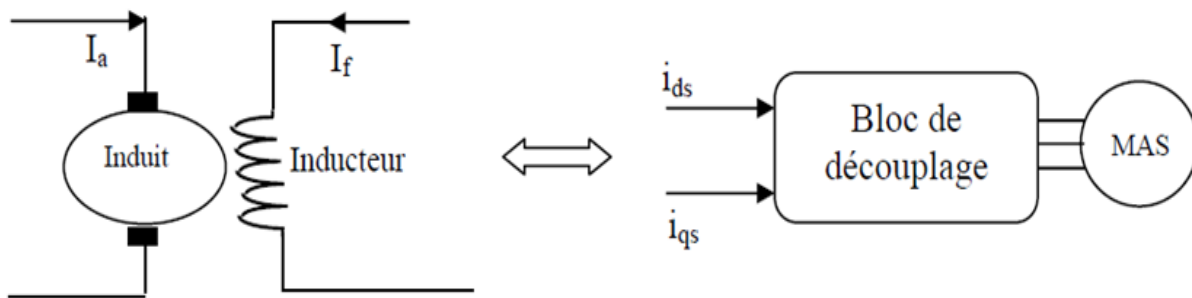


Figure (III.12) : Principe de la commande vectorielle à flux orienté

#### III.5.1 Choix de l'orientation

Il existe trois choix possibles pour l'orientation du flux [27] :

- orientation du flux statorique :  $\varphi_{sd} = \varphi_s$  et  $\varphi_{sq} = 0$
- orientation du flux rotorique :  $\varphi_{rd} = \varphi_r$  et  $\varphi_{rq} = 0$
- orientation du flux magnétisant :  $\varphi_{md} = \varphi_m$  et  $\varphi_{mq} = 0$

#### III.5.2 Différentes méthodes de la commande vectorielle

Il existe deux méthodes :

##### III.5.2.1 Commande vectorielle directe

Cette méthode nécessite une bonne connaissance du module de flux et de sa position quelque soit le régime transitoire effectué, il faut donc procéder à une série de mesures aux bornes du système, et traiter ses valeurs pour obtenir le flux global. Ce mode de commande garantit un découplage correct entre le flux et le couple quel que soit le mode de fonctionnement. L'inconvénient principal de cette technique, réside

dans la fragilité des capteurs installés pour effectuer les mesures nécessaires, et de fiabilité due à sa sensibilité aux variations des paramètres de la machine [20].

### III.5.2.2 Commande vectorielle indirecte

A cause des inconvénients cités dans la méthode précédente, la commande vectorielle indirecte est considérée plus pratique. Cette méthode représente pourtant un inconvénient qui est la sensibilité de l'estimation envers la variation des paramètres de la machine due à la saturation magnétique et la variation de température, de plus elle utilise un circuit de commande considérablement compliqué. Cette méthode n'a pas besoin d'estimer le flux mais elle a besoin d'un capteur de position pour le rotor [20].

### III.6 Commande vectorielle indirecte par orientation de flux rotorique

Notre choix est porté sur la commande par l'orientation de flux rotorique, parce qu'elle nous permet d'obtenir un couple de démarrage important et un haut degré de découplage entre les axes (d, q) dans le référentiel du champ tournant [30].

La commande vectorielle par orientation du flux rotorique consiste à souhaiter qu'il n'existe qu'une composante sur l'axe  $d$ , on aura donc comme objectif d'annuler  $\varphi_{rq}$  :

$$\varphi_{rd} = \varphi_r \text{ et } \varphi_{rq} = 0$$

Les équations électriques rotoriques de la MAS deviennent :

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \varphi_r \\ 0 = R_r i_{rq} + \omega_r \varphi_r \end{cases} \quad (III.5)$$

Les équations magnétiques rotoriques de la MAS deviennent :

$$\begin{cases} \varphi_r = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\ 0 = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \end{cases} \quad (III.6)$$

L'expression de couple devienne :

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_r} (\varphi_r i_{sq}) \quad (III.7)$$

D'après l'équation du flux rotorique, nous avons :

$$\bar{i}_r = \frac{1}{L_r} (\overline{\varphi_r} - L_m \bar{i}_s) \quad (III.8)$$

Nous remplaçons  $\bar{i}_r$  dans l'équation de flux statorique, nous aurons donc :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \frac{L_m}{L_r} \varphi_r + \sigma L_s i_{sd} \\ \varphi_{sq} = \frac{L_m}{L_r} \varphi_r + \sigma L_s i_{sq} \end{cases} \quad (III.9)$$

Avec :

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \tag{III.10}$$

Nous remplaçons  $i_{rd}, \varphi_{sd}$  et  $\varphi_{sq}$  dans les équations des tensions statoriques et rotoriques, nous aurons :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \sigma L_s \frac{d}{dt} i_{sd} - \omega_s \sigma L_s i_{sq} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d}{dt} \varphi_r \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \sigma L_s \frac{d}{dt} i_{sq} + \omega_s \sigma L_s i_{sd} + \omega_s \frac{L_m}{L_r} \varphi_r \end{cases} \tag{III.11}$$

$$\begin{cases} L_m i_{sd} = \varphi_r + \tau_r \frac{d}{dt} \varphi_r \\ L_m i_{sq} = \omega_r \tau_r \varphi_r \end{cases} \tag{III.12}$$

Avec :

$$\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$$

Lorsque  $\varphi_r$  est constant, donc  $\frac{d\varphi_r}{dt} = 0$ , le système se simplifie encore, nous obtenons finalement :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \sigma L_s \frac{d}{dt} i_{sd} - \omega_s \sigma L_s i_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \sigma L_s \frac{d}{dt} i_{sq} + \omega_s \sigma L_s i_{sd} + \omega_s \frac{L_m}{L_r} \varphi_r \end{cases} \tag{III.13}$$

$$\begin{cases} L_m i_{sd} = \varphi_r \\ L_m i_{sq} = \omega_r \tau_r \varphi_r \end{cases} \tag{III.14}$$

D'après l'équation (III.14) nous remarquons que :

- La composante  $i_{sd}$  détermine seule l'amplitude de  $\varphi_r$
- La composante  $i_{sq}$  détermine seule l'amplitude du couple lorsque  $\varphi_r = C^{est}$

Les courants  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$  sont calculés à partir des courants réels ( $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$ ) de la transformation de Park.

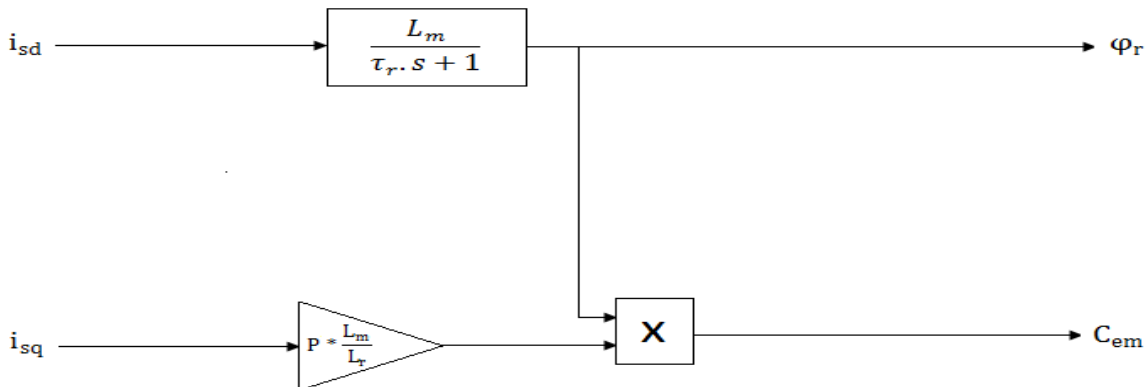


Figure (III.13) : Découplage par orientation de flux rotorique



### III.6.1 Détermination de la position du flux rotorique

La détermination de la position du flux rotorique consiste à situer précisément la position de  $\varphi_r$  par rapport au stator, toute erreur dans l'estimation de l'angle  $\theta_s$ . Dans le calage du référentiel tournant entraîne une erreur dans la commande [29].

#### III.6.1.1 Détermination indirecte à partir du courant et de la mesure de vitesse

Le flux  $\varphi_r$  est obtenu à partir de l'équation :

$$\varphi_r + \tau_r \frac{d}{dt} \varphi_r = L_m i_{sd} \tag{III.15}$$

La pulsation statorique  $\omega_s$  est obtenue à partir du calcul de  $\omega_r$  et de la mesure de vitesse  $\Omega$  :

$$\omega_r = \frac{L_m}{\tau_r \varphi_r} i_{sq} \approx \frac{i_{sq}}{\tau_r i_{sd}} \tag{III.16}$$

$$\omega_s = p\Omega + \omega_r \tag{III.17}$$

La position de  $\varphi_r$  (angle( $\theta_s$ )) est alors obtenue à partir de l'intégration du  $\omega_s$  :

$$\theta_s = \int_0^t \omega_s dt \tag{III.18}$$

Avec :

$$\theta_s(0) = 0$$

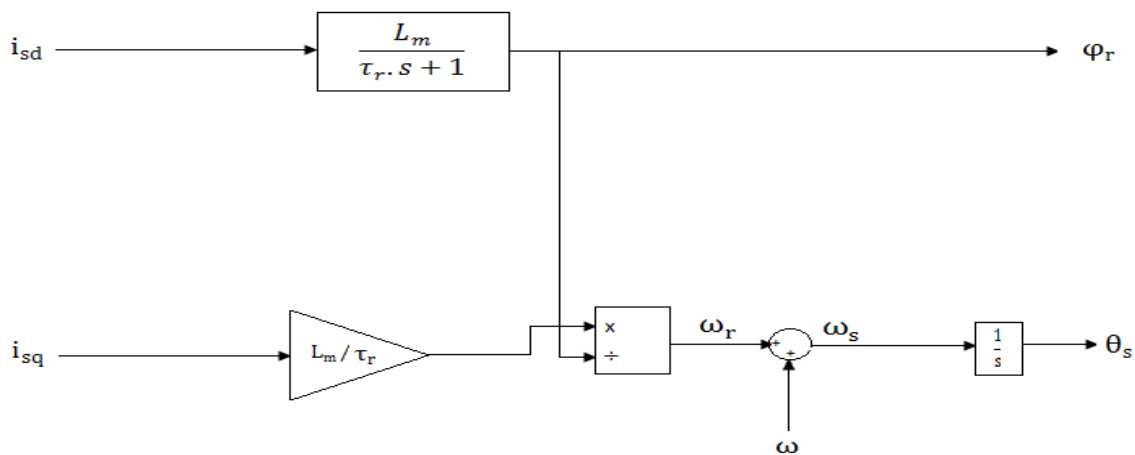


Figure (III.14) : Estimation de  $\varphi_r$  et  $\theta_s$

### III.6.2 Contrôle des courants

Pour s'assurer que les courants réels suivent les courants de références  $i_{sd_{ref}}$  et  $i_{sq_{ref}}$ , élaborés à partir des consignes du flux  $\varphi_{r_{ref}}$  et de couple  $C_{em_{ref}}$ , des régulateurs de courants agissant sur les tensions de

commande sont indispensables (si nous considérons une alimentation en tension), nous nous intéressons au dimensionnement des régulateurs qui sera basé sur l'annulation des pôles dominants et zéro du système. Le régulateur que nous utilisons est du type proportionnel-intégral (PI).

Cependant comme nous l'avons vu précédemment les équations de la tension statorique sont couplées :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \sigma L_s \frac{d}{dt} i_{sd} - \omega_s \sigma L_s i_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \sigma L_s \frac{d}{dt} i_{sq} + \omega_s \sigma L_s i_{sd} + \omega_s \frac{L_m}{L_r} \varphi_r \end{cases} \quad (III.19)$$

Avec :

$\omega_s \sigma L_s i_{sd}$  ,  $\omega_s \sigma L_s i_{sq}$ : Couplage entre l'axe d et q

$\omega_s \frac{L_m}{L_r} \varphi_r$  : f.c.é.m.

Les équations (III.19) montrent les perturbations introduites par les couplages et la f.c.é.m., ces perturbations sont de type continu en régime permanent, et proportionnelles à  $\omega_s$ .

Pour simplifier l'étude des correcteurs et transformer le système variable des équations statoriques en deux systèmes mono variables indépendants, nous utilisons des méthodes de compensation des effets des perturbations.

La méthode utilisée, consiste en un découplage par « retour des variables d'états »  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$ . Les termes de découplage et de compensation se déduisent directement des équations des tensions statoriques.

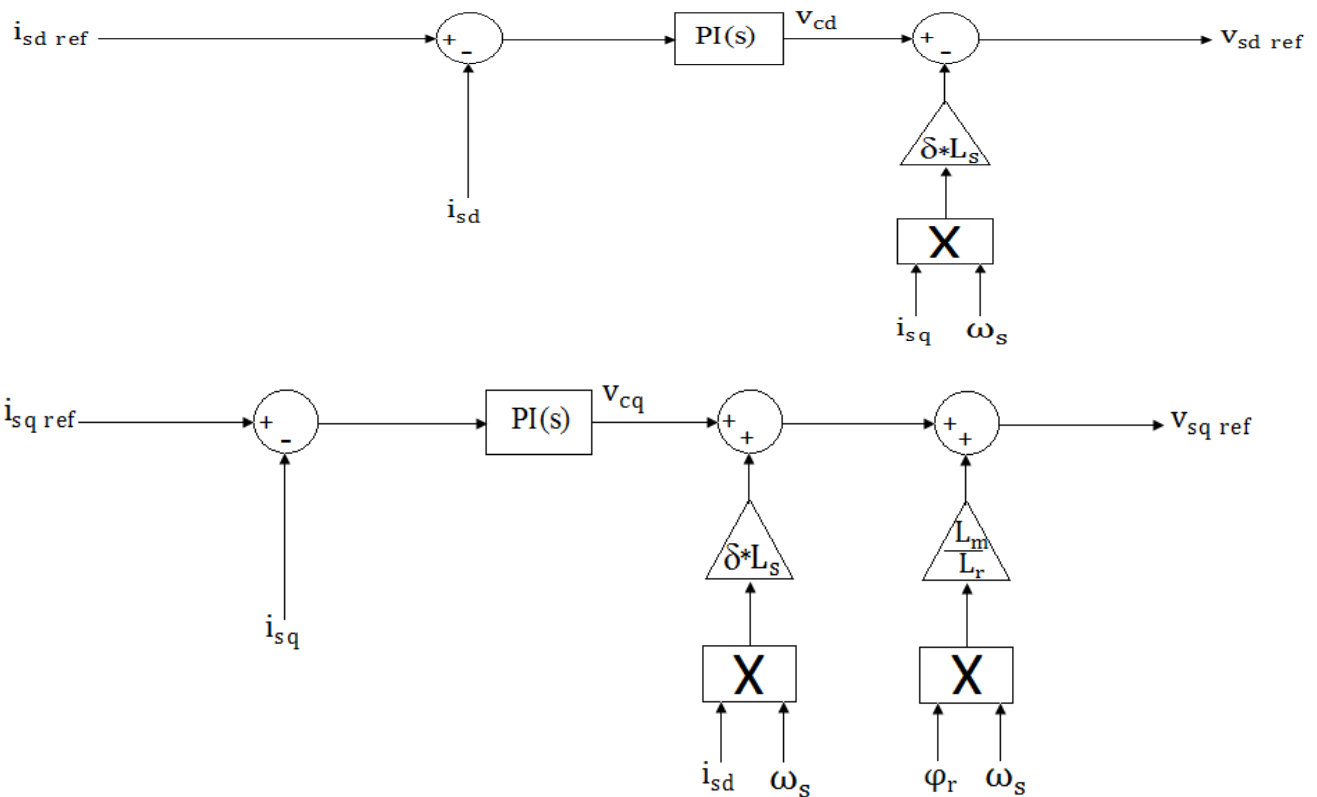


Figure (III.15) : Contrôle des courants transformés avec découplage par retour d'état

Les sorties des correcteurs s'appliquent aux systèmes mono variables suivants :

$$\begin{cases} v_{cd} = R_s i_{sd} + \sigma L_s \frac{d}{dt} i_{sd} \\ v_{cq} = R_s i_{sq} + \sigma L_s \frac{d}{dt} i_{sq} \end{cases} \quad (III.20)$$

### III.6.3 Contrôle de flux

Sa fonction est de fournir  $i_{sq_{ref}}$  à partir de la consigne du flux  $\varphi_{r_{ref}}$  demandée. Nous utilisons la commande indirecte (ou boucle ouverte) pour laquelle  $i_{sd_{ref}}$  est directement obtenu à partir de [29] :

$$i_{sd_{ref}} = \frac{1}{L_m} \varphi_{r_{ref}} \quad (III.21)$$

Il existe une autre commande (commande directe) pour lesquelles le module du flux est contrôlé par un correcteur de flux avec contre réaction.

### III.6.4 Contrôle de couple

Le contrôle de couple à pour but de délivrer une consigne  $i_{sq_{ref}}$  à partir du couple demandé  $C_{em_{ref}}$ . Le contrôle est généralement effectué en boucle ouverte à partir de [29] :

$$i_{sq_{ref}} = \frac{L_r}{p L_m \varphi_{r_{ref}}} C_{em_{ref}} \quad (III.22)$$

### III.6.5 Limite du couple en régime permanent

Dans ce paragraphe, nous étudions la caractéristique du couple en régime permanent pour l'orientation de flux rotorique.

Pour obtenir des relations du couple électromagnétique en régime permanent, nous faisons abstraction des termes dérivés par rapport au temps dans les équations relatives au modèle de l'orientation du flux rotorique [30].

$$\omega_r = \frac{L_m}{\tau_r \varphi_r} i_{sq} \quad (III.23)$$

$$C_{em} = (p \frac{L_m}{L_r} \varphi_r) i_{sq} \quad (III.24)$$

Les équations (III.23) et (III.24) montrent qu'il y a une proportionnalité entre la composante en quadrature du courant statorique  $i_{sq}$  et la pulsation  $\omega_r$  d'une part et le couple  $C_{em}$  d'autre part, et que la commande avec orientation du flux rotorique ne tend pas vers une valeur critique, sauf qu'il faut tenir compte de la limitation imposée par le convertisseur. Contrairement à la commande avec l'orientation du flux statorique et magnétique qu'ils tendent vers une valeur critique.

## III.7 Visualisation des courbes de la commande vectorielle

On procède à la simulation numérique du système (convertisseur, commande, moteur et charge) pour des différents tests de simulations pour visualise le comportement de la commande vectorielle de la MAS.

III.7.1 Test pour des couple variables

Pour une petite valeur de vitesse, Le couple de charge imposé dans la commande est repartiés sur des intervalles de temps comme suit :

[0 3.5]s:  $C_r = 57 \text{ N. m}$

[3.5 6.5]s:  $C_r = 202 \text{ N. m}$

[6.5 9]s:  $C_r = 101 \text{ N. m}$

Et pour la vitesse :

[0 1]s : une rampe

[1 9]s :  $\Omega = 8 \text{ rad/s}$

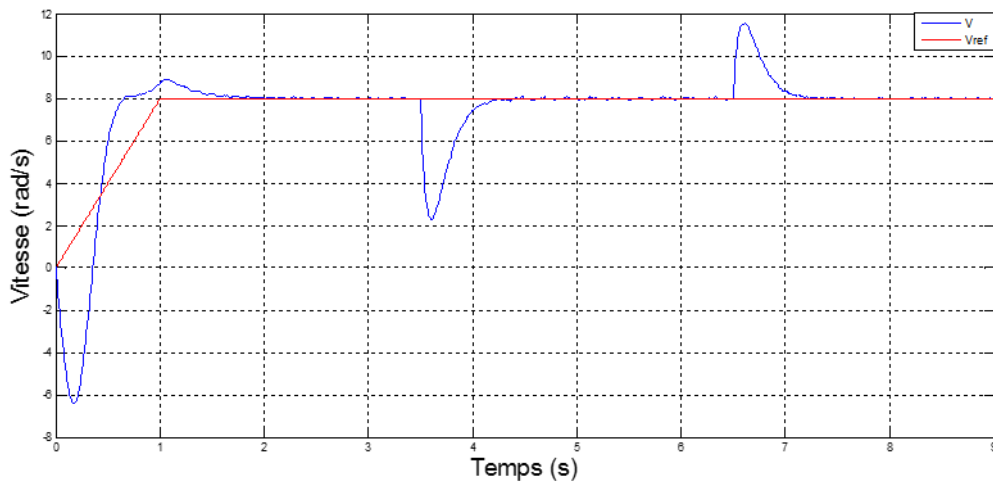


Figure (III.16) : Allure de la vitesse de rotation de la MAS

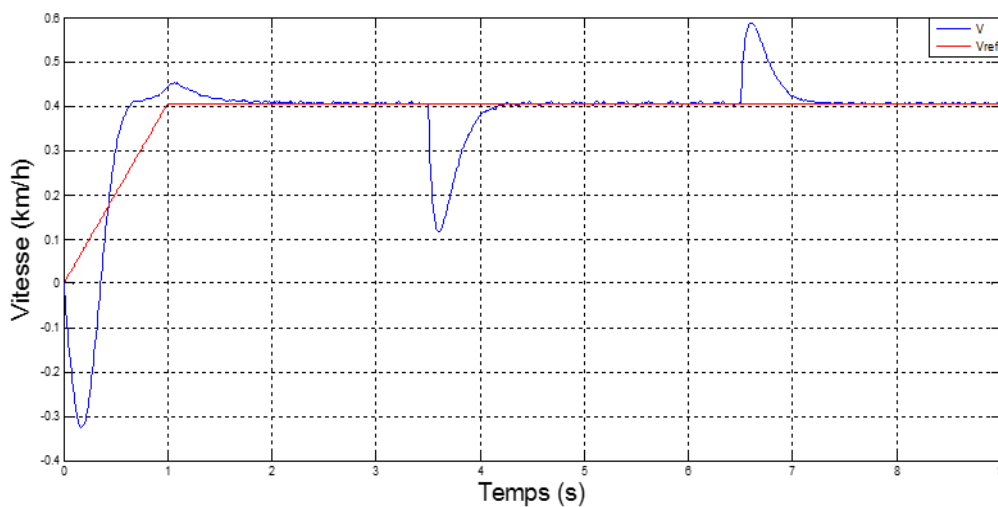


Figure (III.17) : Allure de la vitesse de translation de la RTG

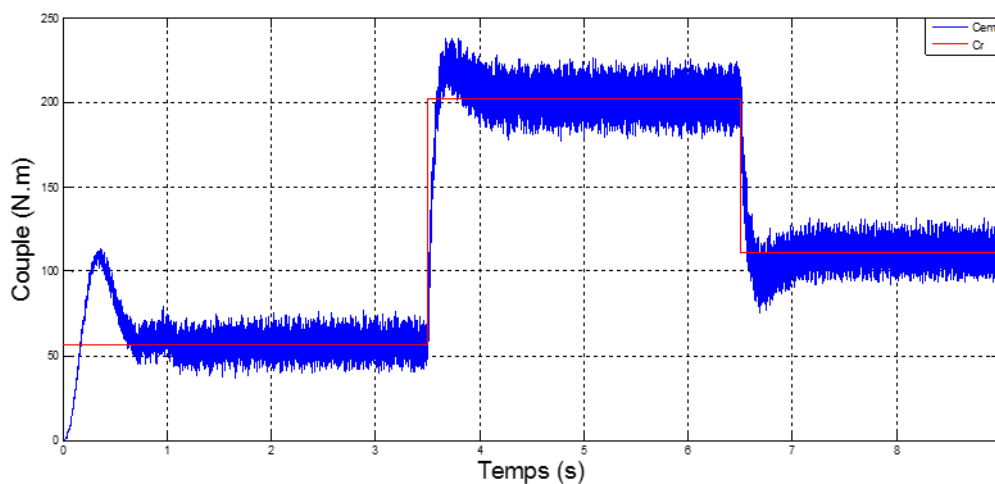


Figure (III.18) : Allure de couple électromagnétique

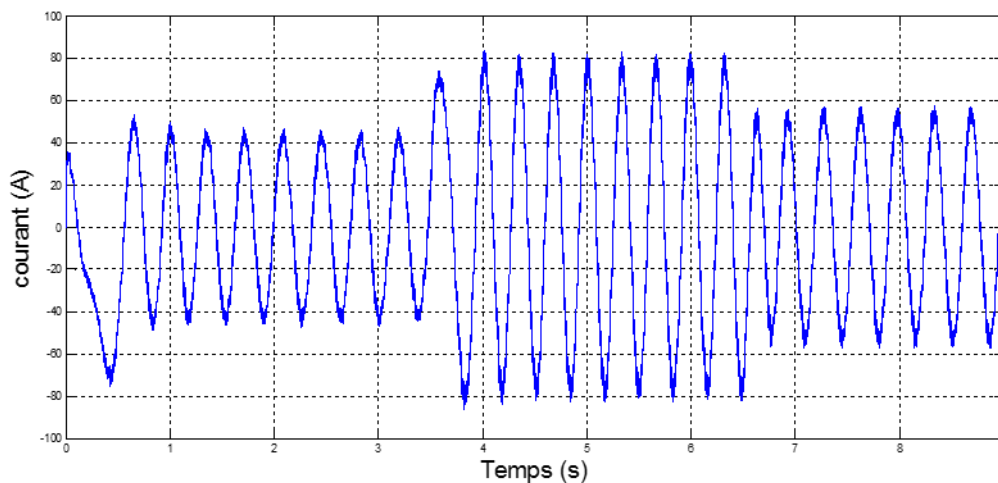


Figure (III.19) : Allure de courant  $I_{sa}$

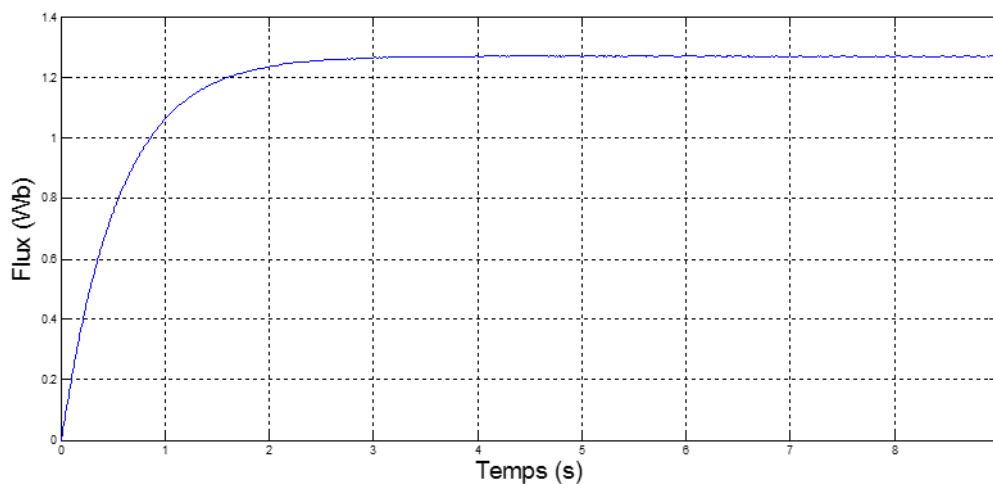


Figure (III.20) : Allure de flux  $\phi_d$

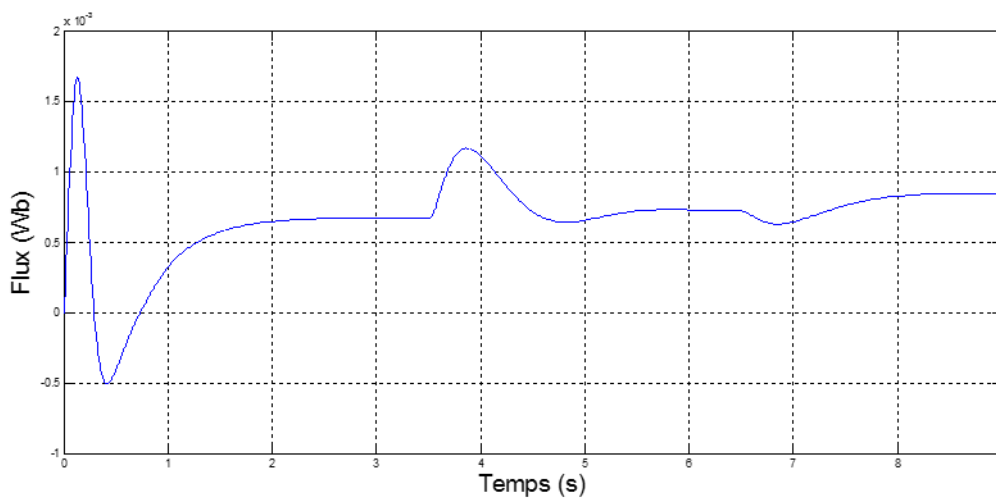


Figure (III.21) : Allure de flux  $\Phi$

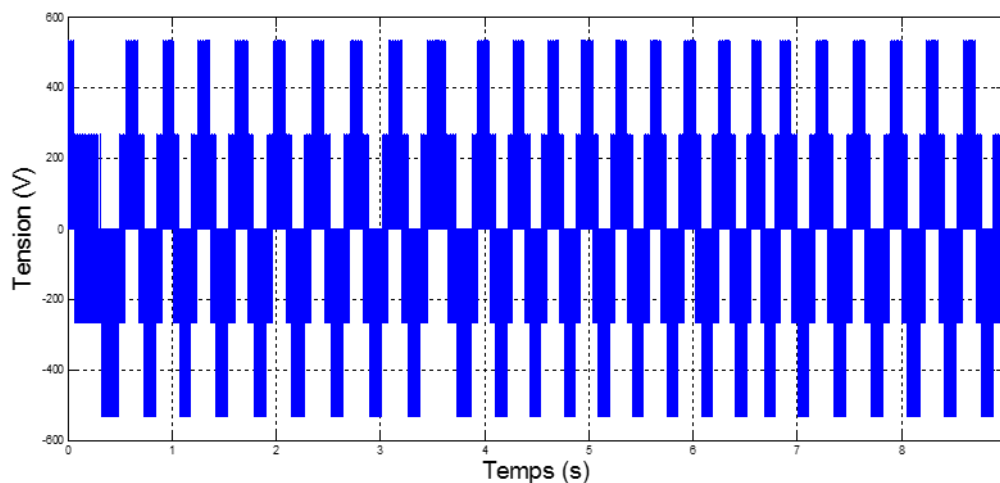


Figure (III.22) : Allure de la tension  $V_{sa}$

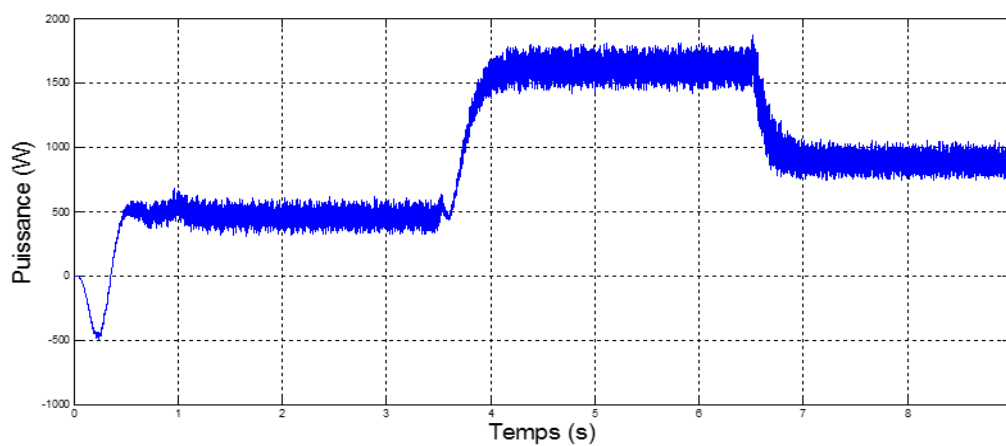


Figure (III.23) : Allure de la puissance de la MAS

**III.7.1.1 Interprétation des résultats**

On remarque d’après les résultats obtenus que :

- La vitesse de rotation et la vitesse de translation suit la vitesse de référence mais avec une léger dépassement et une bon précision par rapport à la commande scalaire, et à chaque fois le couple de charge change sa valeur la vitesse fait de perturbation, et que le couple électromagnétique suit le couple de charge avec une léger différence à cause des frottements de la MAS, et en remarque aussi des perturbation dans le couple électromagnétique à cause des harmonique qui sont créé par l’onduleur, et en peut minimisé ces perturbations par un filtre passe bas.
- Le flux rd suit la consigné de flux référence, et que le flux rq est approximativement nul c’est qui nous montre l’orientation du flux sur l’axe d.
- Le courant au démarrage est métrisé et qu’il change en fonction de couple électromagnétique.
- La puissance de la MAS varie en fonction de couple de charge.

**III.7.2 Test pour des vitesses variables**

Pour une valeur fixe du couple de charge, la consigne de vitesse imposé dans la commande est reparti sur des intervalles de temps comme suite :

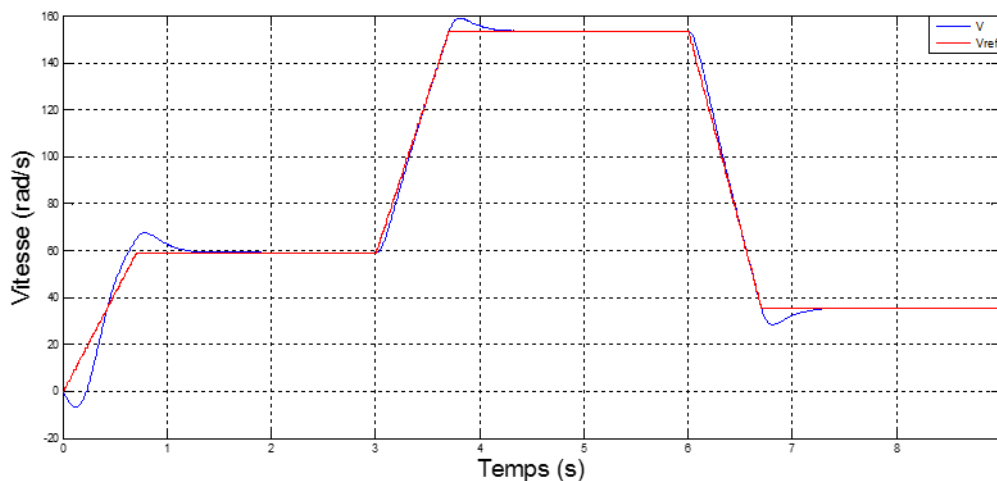
[0 3.5]s:  $\Omega = 153.37 \text{ rad/s}$

[3.5 6.5]s:  $\Omega = 35.39 \text{ rad/s}$

[6.5 10]s:  $\Omega = 94.38 \text{ rad/s}$

Et pour une valeur de couple de charge :

[0 9]s:  $C_r = 50 \text{ N. m}$



**Figure (III.24) : Allure de la vitesse de rotation de la MAS**

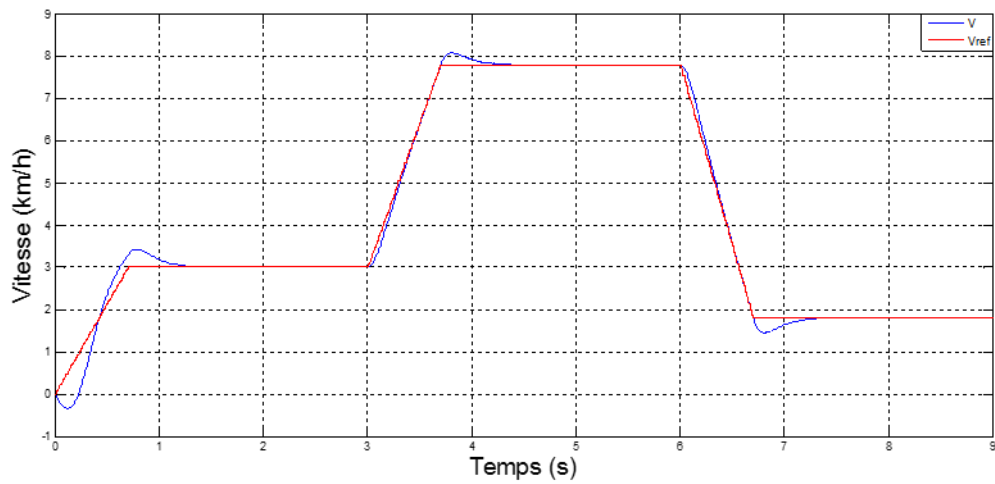


Figure (III.25) : Allure de la vitesse de translation de la RTG

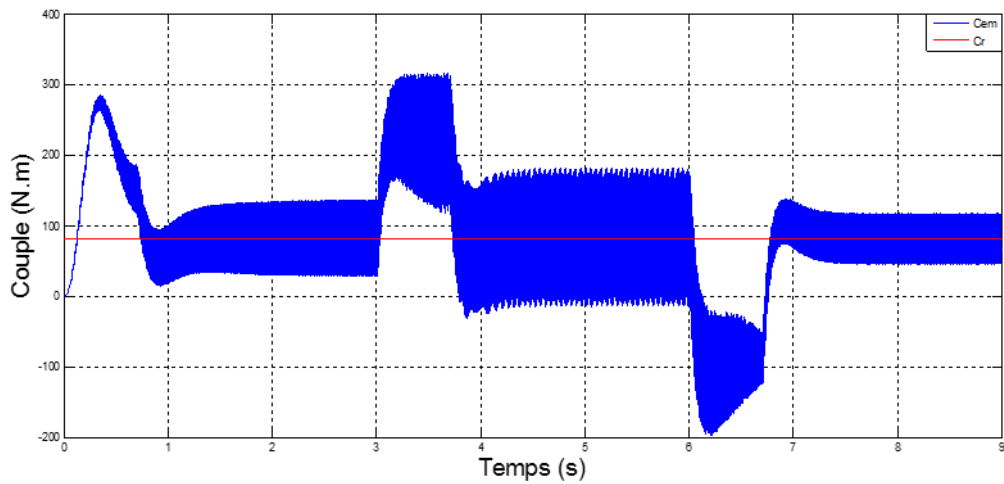


Figure (III.26) : Allure de couple électromagnétique

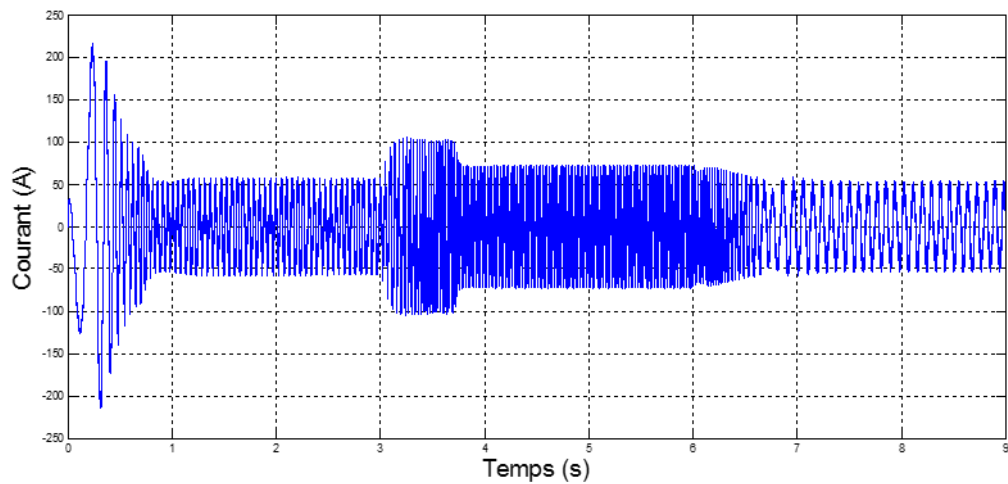


Figure (III.27) : Allure de courant statorique  $I_{sa}$



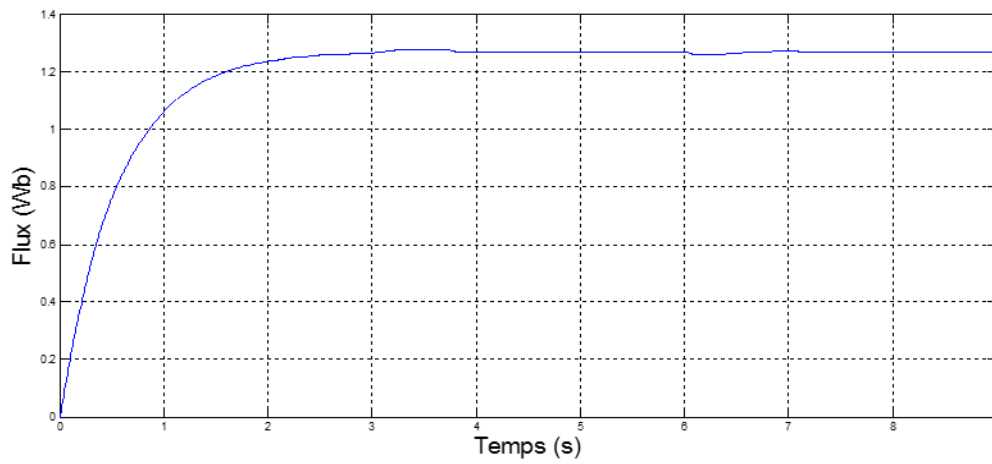


Figure (III.28) : Allure de flux rd

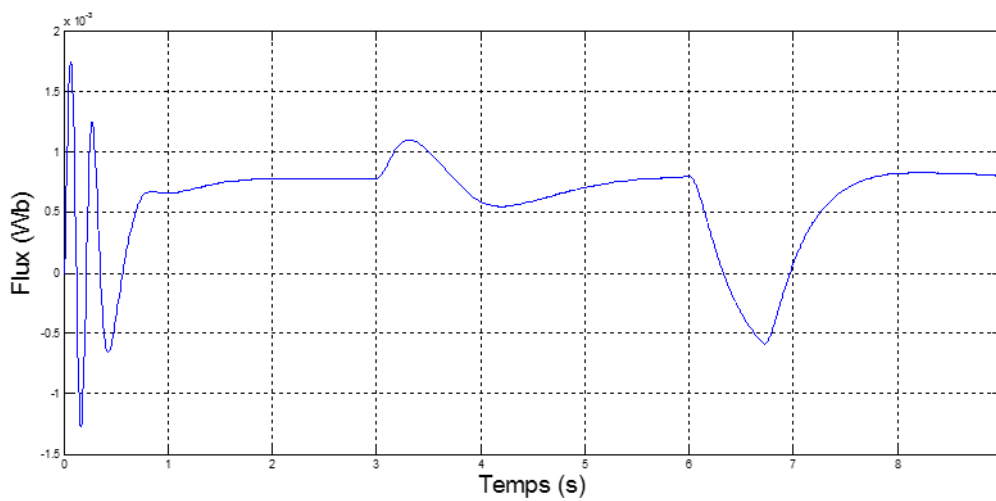


Figure (III.29) : Allure de flux rq

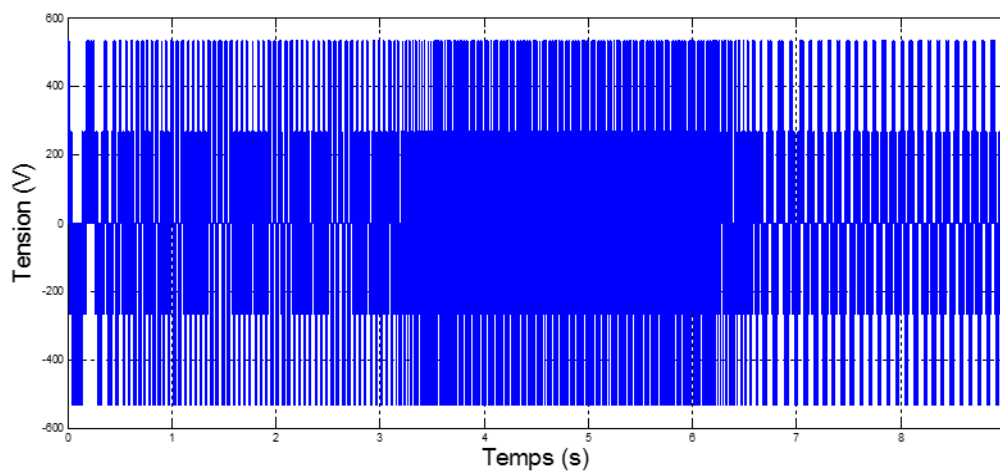


Figure (III.30) : Allure de la tension statorique  $V_{sa}$

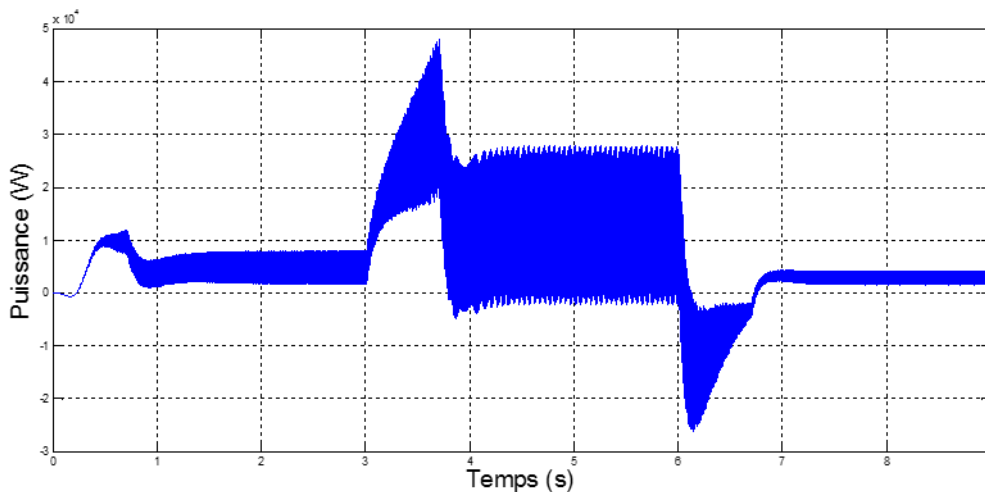


Figure (III.31) : Allure de la puissance de la MAS

### III.7.2.1 Interprétation des résultats

En remarque d'après les résultats obtenus :

- La vitesse de rotation et la vitesse de translation suit la vitesse référence avec une léger déplacement et une bonne précision dans le régime permanent, et le couple électromagnétique suit le couple de charge.
- Le courant au démarrage est métrisé et il suit le couple électromagnétique.
- Le flux  $\mathbf{rd}$  suit la consigné de flux référence, et que le flux  $\mathbf{rq}$  présente des perturbations à cause des changements de la consigne de la vitesse de rotation mais il est approximativement nul c'est que nous montre que l'orientation du flux sur l'axe d est maintenue.
- La tension statorique change de fréquence à chaque fois que la vitesse change de valeur.
- La puissance de la MAS varie en fonction de la vitesse.

D'après les résultats obtenu nous constatons que la commande vectorielle est mieux adaptée pour une commande a base vitesse que la commande scalaire, à cause de sa précision, la rapidité et la métrisé de couple instantané dans le régime transitoire.

### III.8 Test de robustesse

Afin de tester la robustesse du régulateur PI vis-à-vis la variation des paramètres de la machine, nous allons varier les paramètres de la machine et nous observons leur comportement.

Donc nous avons varié la résistance rotorique de 50 % de sa valeur nominale, avec un couple de charge de 50 N.m.

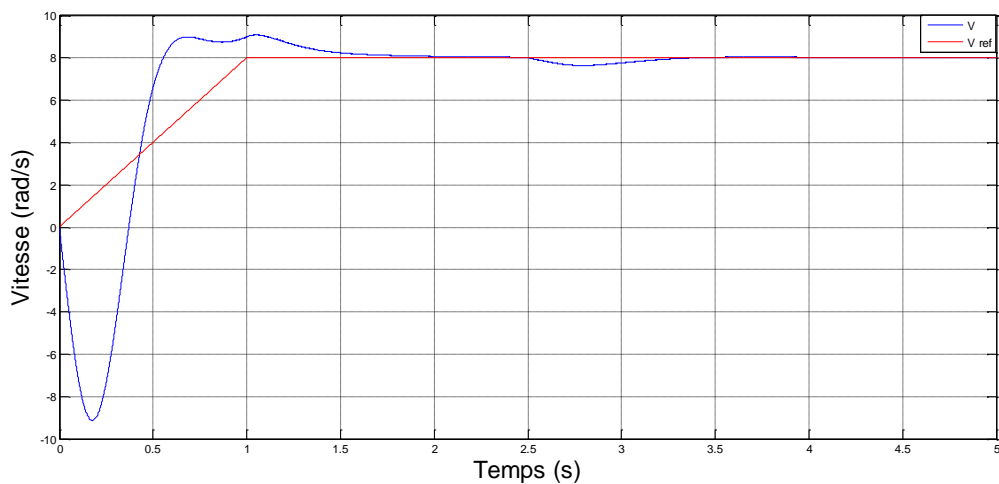


Figure (III.32) : Allure de vitesse de rotation

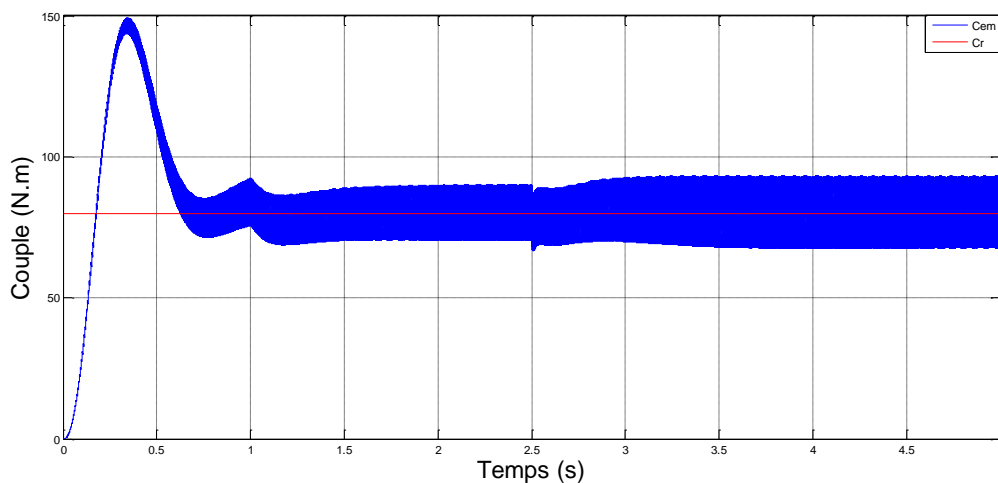


Figure (III.33) : Allure du couple de MAS

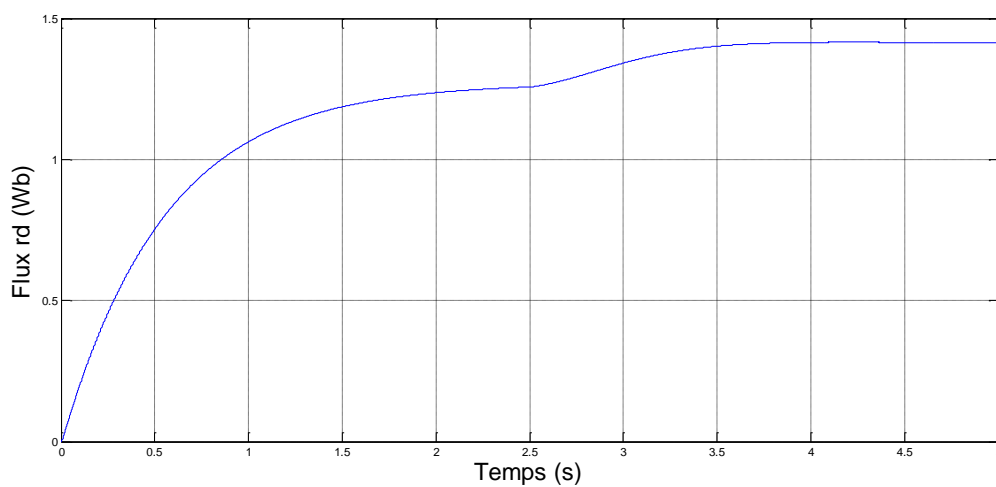


Figure (III.34) : Allure de flux rd

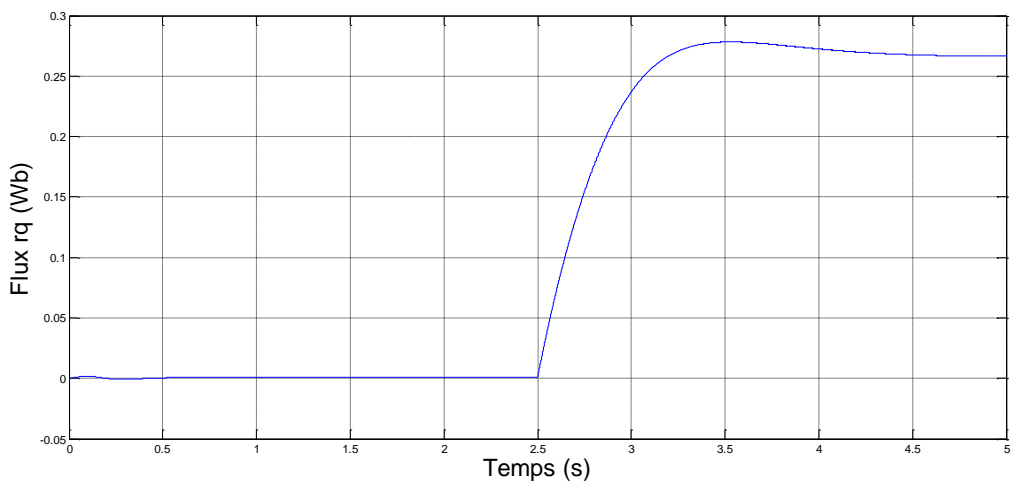


Figure (III.35) : Allure de flux  $\phi_r$

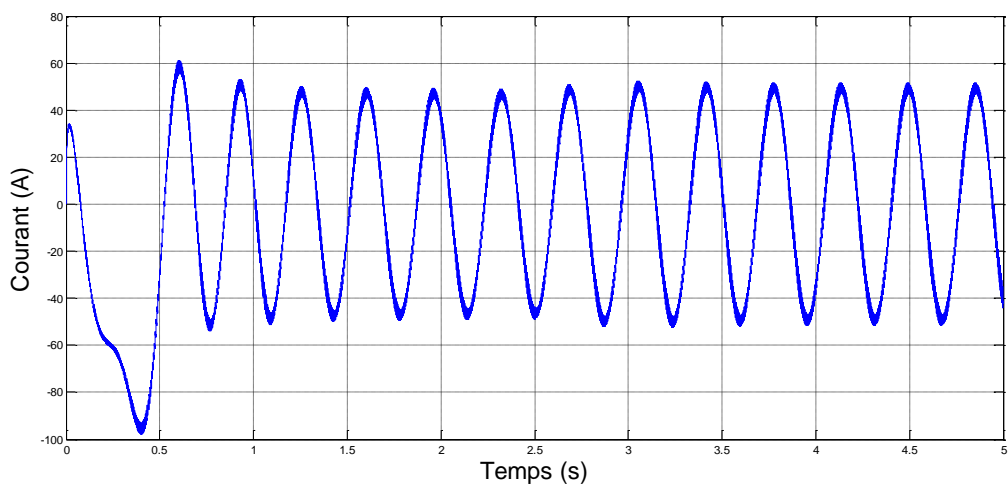


Figure (III.36) : Allure de de courant statorique  $I_{sa}$

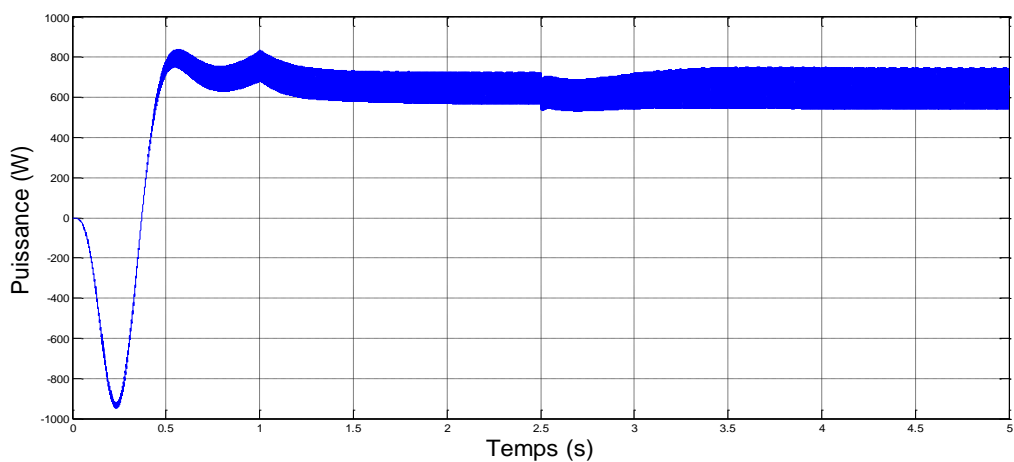


Figure (III.37) : Allure de la puissance de la MAS

### III.8.1 Interprétation des résultats

Nous remarquons d'après les résultats obtenus que :

- La vitesse de rotation présente des perturbations à l'instant de changement de la résistance rotorique et après elle suit la vitesse de référence.
- Le flux  $r_q$  a changé sa valeur à l'instant de changement de la résistance rotorique, ce qui a conduit à perdre l'orientation sur l'axe d, et on remarque aussi un léger changement dans la consigné de flux  $r_d$ .
- Une légère augmentation dans les courants statoriques à l'instant de changement de la résistance rotorique.
- La puissance de la MAS augmente avec l'augmentation de la résistance rotorique.

D'après ces résultats on constate que la commande vectorielle est sensible au changement des paramètres de la MAS, et que le régulateur PI classique n'est pas adaptées au changement de ces paramètres et on propose donc un régulateur adaptée au ce changement qui est le régulateur PID à action intégrale floue, qui utilise un contrôleur de logique floue à la place du terme intégral, tandis que les deux termes proportionnel et dérivé sont gardés inchangés.

### III.9 conclusion

Dans ce chapitre, nous allons présentes la commande de la chaine translation qui est la commande scalaire en (v/f) constant, puis on la simulé sous Simulink-MATLAB, et après avoir visualisé les grandeurs de la machine (couple, courant), on n'pas avéré à obtenir les voulu, alors on a décédé de remplacé par la commande vectorielle car elle semble la plus proche à la résolution de notre problématique.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Le but de notre travail consiste à étudier la chaîne de translation de la RTG. Un premier temps nous avons démontré les différentes fonctions de la RTG tel que le levage, le chariotage et la translation. Ce dernier étant le sujet de notre étude, donc on a défini les différents organes constituant de cette chaîne ainsi le rôle de chacun d'eux.

Pour parvenir à ces objectifs, on a donc commencé la deuxième partie par la présentation d'un état de l'art, suivi par l'élaboration du modèle mathématique des différentes parties (onduleur, moteur asynchrone et la chaîne mécanique) de notre chaîne de translation, ainsi nous avons calculés le couple de charge ramené au moteur d'entraînement. Cette modélisation est indispensable à la suite de notre travail, où on a fait référence à ces modèles lors de l'élaboration et la simulation numérique de nos algorithmes de commande.

La problématique est située au contrôle de la RTG dans des endroits étroits et ceci revient mauvais contrôle instantané du couple lors régime transitoire, ce qui influe directement au contrôle de la RTG pour de petites vitesses, donc une alternative s'impose et consiste à utiliser d'autres commandes telles que la commande vectorielle à flux rotorique orienté qui apparaît la plus convenable pour résoudre notre problématique.

Le travail présenté dans ce mémoire expose la synthèse de deux techniques de commande associées à un régulateur PI pour le contrôle de la vitesse d'une machine asynchrone à cage, ce sont :

- ✓ La commande scalaire.
- ✓ La commande vectorielle indirecte.

Le choix convenable du modèle d'action associé au choix du référentiel est l'étape primordiale dans cette étude.

La commande par orientation de flux rotorique est un outil de contrôle fort intéressant au fonctionnement réel et pratique de la machine asynchrone dans ses applications industrielles. Cette technique de commande est devenue faisable sur ce type de machines grâce à la possibilité de découplage de flux et du couple, de façon, presque analogue, à celle appliquée sur la machine à courant continu.

Cette faisabilité lui permettra d'être, grâce à ses qualités technico-économiques très attrayantes, un substitut à la machine à courant continu.

Dans ce type de commande la qualité des performances, en régime statique ou dynamique est assurée. Les résultats de l'étude obtenus montrent que le régime transitoire est moins oscillant et qu'avec un simple régulateur classique, du type PI, les variations brusques de la charge sont amorties, les pics sur les valeurs du couple sont évités, le régime transitoire concernant les composantes du flux est nettement amélioré. Néanmoins, seule la réponse de l'ensemble du système est relativement lente, mais acceptable.

Une simulation sous SIMULINK-MATALB a été effectuée et a révélée de remarquables qualités de cette commande. La commande vectorielle par orientation de flux rotorique est due au compromis rapidité/précision choisi lors du réglage du régulateur PI du courant et de couple et elle se présente comme une commande robuste, au contraire à la commande scalaire qui n'est pas envisageable dans les applications qui nécessitent de grandes performances.



# **Bibliographie**



## Bibliographie

- [1] : Site officielle de BMT « <http://www.bejaiamed.com/index.php> »
- [2] : « Manuelle d'instructions d'une RTG KALMER » société KALMAR.
- [3] : « Manuelle de maintenance d'une RTG KALMER » société KALMAR.
- [4] : « Catalogue des pièces de rechange d'une RTG KALMER » société KALMAR.
- [5] : **ZAKARIA EL AGGOUCHI** «Etude et intégration d'un système de supervision du portique RTG » mémoire fin d'études, université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Maghreb, 2016.
- [6] : <https://www.kalmarglobal.com>
- [7] : **KHODJA Abdelhakim** « Manuel de l'opérateur sur RTG » Entreprise BMT.
- [8] : <http://www.standbypowergeneration.co.uk/Cummins-QSX-15-G6-500kVA-Diesel-Generator>
- [9] : **BOUDRIES Zoubir** « commande des machines électriques » cours génie électrique, université Abderrahmane mira.
- [10] : **Mohamed TOU** « étude et mise au point d'un logiciel (ATOSECM) pour l'étude de systèmes d'électronique de puissance comprenant des multi-convertisseurs et des entraînements à courant alternatif » thèse de doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières, Canada, 1992.
- [11] : **Bapio BAYALA** « les machines synchrone » cours ingénieurs électrotechniciens.
- [12] : **AOZZELLAG Djemal** « Construction de machines électriques » cours électrotechnique, université Abderrahmane mira, 2008.
- [13] : Formation SINEMATIC sur les variateurs de vitesse G120
- [14] : **Ahmed JAMMEL** [www.isae.edu.lb/cours/jammel/chp6.pdf](http://www.isae.edu.lb/cours/jammel/chp6.pdf)
- [15] : **H.Boubacar** « prototypage rapide à base de FPGA d'un algorithme de contrôle avancé pour le moteur à induction » thèse doctorat, l'université du Québec à Trois-Rivières, 2010.
- [16] : **G.Séguier** « Electronique de puissance » « Les fonctions de base et leurs applications » 7<sup>ème</sup> Edition Dunod, Paris 1999.
- [17] : **G.Séguier** « Electronique de puissance » 5<sup>ème</sup> Edition Dunod, Paris 1985.
- [18] : **L.Baghli** « Modelisation et commande de la MAS » cours IUFM de Lorraine-UHP, France, Edition 2004.
- [19] : **S.Chekroun** « Commande Neuro-floue sans capture de vitesse d'une MAS » mémoire magistère, ENSET d'Oran 2009.
- [20] : **G.Buche** « Commande vectorielle de la MAS en environnement temps réel Matlab/Simulink » mémoire ingénieur, conservatoire National des arts et métiers, Grenoble, France Mars 2001.
- [21] : **Site** : <http://www.Techno-science.net>
- [22] : **jaques Boyer**, les carburants, publication 2000-2002, <http://www.aerodes.com>

- [23] : **Site** : [http://fr.wikipedia.org/wiki/moteur diesel](http://fr.wikipedia.org/wiki/moteur_diesel)
- [24] : **K.Itoudj** « étude et dimensionnement d'un groupe électrogène pour la Terminale Marin de Bejaia 'SONATRACH' » mémoire de fin de cycle, université Abderrahmane MIRA Bejaia, 2010/2011.
- [25] : **ABDOUNE Fateh** « Etude et contrôle des aérogénérateurs basés sur les machines asynchrones à rotor bobiné » mémoire magistère, université Abderrahmane mira – Bejaia, 2011.
- [26] : **G.Grelle/G.Clerc** « Actionneurs Electrique. Principe/Modèles/Commande » Collection Electrotechnique, Edition Eyrolles, 1997.
- [27] : **R.Chaupad /F.Milsant** «commande électrique des moteur à courant alternatif » Edition Eyrolles 1988.
- [28] : **A.Faidallah** « contribution à l'identification et à la commande vectorielle des machines asynchrone » Thèse doctorat de l'INLP lorient 1<sup>er</sup> Février 1995.
- [29] : **P.Lautier** «modélisation des convertisseurs à découplage pour la conception et la commande» Thèse Doctorat de l'INSA de Lyon 1998.
- [30] : **J.Gognat** «Modélisation et simulation d'une commande vectorielle sous le logiciel MATLAB » stage DESS Génie électrique 1999.
- [31] : **J.Guiraud** « commande vectorielle de machine alternatif à base de processeur de signal» Mémoire en automatisme Centre Régional Agrée de Grenoble 1998
- [32] : **H. Le- Huy** « introduction à MATLAB/Simulink », Université LAVAL, CANADA 1998



# **Annexes**

---

## Annexes

### Annexe A : Spécifications de la RTG

Poids total de l'engin en ordre de marche : 157 tonnes

Capacité de levage : 40 tonnes

Vitesse de conduite : Sans charge : 130 m/min

Avec charge : La vitesse dépend de la charge sous le palonnier

Vitesse de levage : Sans charge : 60 m/min

Avec charge : 30 m/min

Vitesse de descente : Sans charge : 60 m/min

Avec charge : 30 m/min

Vitesse de déplacement du chariot : Sans charge / avec charge : 70 m/min

#### . Conditions climatiques :

Température ambiante : -10°C .... +45°C

Humidité : Max. 99 %

Vitesse du vent, pleine performance opérationnelle : 0....20 m/s

Vitesse du vent, performance opérationnelle limitée : 20....25 m/s

Vitesse du vent, roues en position de stationnement : 25....40 m/s

Vitesse du vent, situation d'arrimage : >40 m/s

### Annexe B : Paramètres de la MAS qui entraîne les roues

$$R_s = 0.08233 \Omega$$

$$P_n = 37 \text{ KW}$$

$$R_r = 0.0503 \Omega$$

$$V_n = 400 \text{ V}$$

$$L_s = 0.027834 \text{ H}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$L_r = 0.027834 \text{ H}$$

$$P = 2$$

$$L_m = 0.02711 \text{ H}$$

$$N_n = 1480 \text{ tr/min}$$

$$J = 0.37 \text{ Kg.m}^2$$

$$f = 0.02791 \text{ N.m.s/rad}$$

## Annexe C : Paramètres de technique MLI

$$E = 600 \text{ V}$$

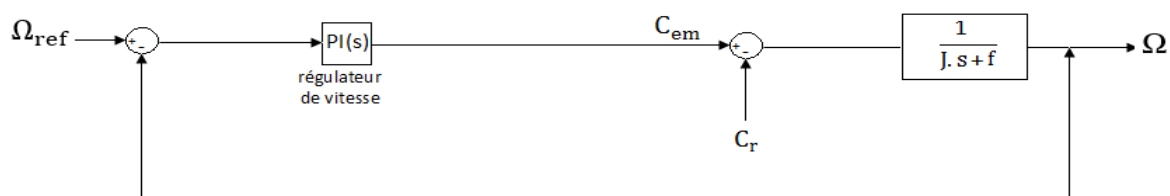
$$f_p = 1050 \text{ Hz}$$

$$V_p = 500 \text{ V}$$

## Annexe D : Régulation

### Annexe D.1 : Régulation de vitesse

La chaîne de régulation de vitesse de rotation peut être représentée par le schéma fonctionnel de la figure suivante :



**Figure (D.1)** : Schéma fonctionnel de la régulation de vitesse

La fonction de transfert classique du régulateur PI est donnée par l'expression suivante :

$$C_{\Omega}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (\text{D.1})$$

La fonction de transfert en boucle fermée de notre système est donnée par l'expression suivante :

$$F(s) = \frac{K_p \cdot s + K_i}{J \cdot s^2 + (f + K_p) \cdot s + K_i} \quad (\text{D.2})$$

Après l'identification de la fonction de transfert à la forme canonique on aura :

$$K_p = 18.97 \quad \text{et} \quad K_i = 90.25$$

Avec un temps de réponse  $t_r = 0.5 \text{ s}$

**Annexe D.2 : Régulation de courant**

D'après les expressions (III.25) on a :

$$F(s) = \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + \frac{\sigma L_s}{R_s} s} \quad (D.3)$$

Afin d'éliminer le zéro de la fonction  $F(s)$ , on pose :

$$\frac{K_p}{K_i} = \frac{\sigma L_s}{R_s} \quad (D.4)$$

Et on a aussi le temps de réponse  $t_r$  qui est donnée par l'expression suivante :

$$t_r = \frac{3}{\frac{1}{R_s} \cdot K_i} \quad (D.5)$$

Et pour un temps de réponse égale à 10 ms, on aura :

$$K_p = 0.428 \text{ et } K_i = 24.699$$

**Annexe E : Calcule numérique de la chaîne mécanique**➤ **Force de résistance au mouvement :**

$$F_r = 0.0981 \times m$$

➤ **Force de résistance aérodynamique :**

$$F_v = 13.23 \times V^2$$

➤ **La somme des différentes forces exercent sur RTG :**

$$F_T = 0.0981 \times m + 13.23 \times V^2$$

➤ **Couple de charge de la RTG**

$$C_{ch} = 0.081 \times m + 11 \times V^2$$

➤ **Rapport de réduction**

$$r = 58.4$$

➤ Couple de charge ramené au moteur

$$C_{chramene} = 1.45 \times 10^{-3} \times m + 0.21 \times V^2$$

Annexe F : Schéma général de la commande scalaire

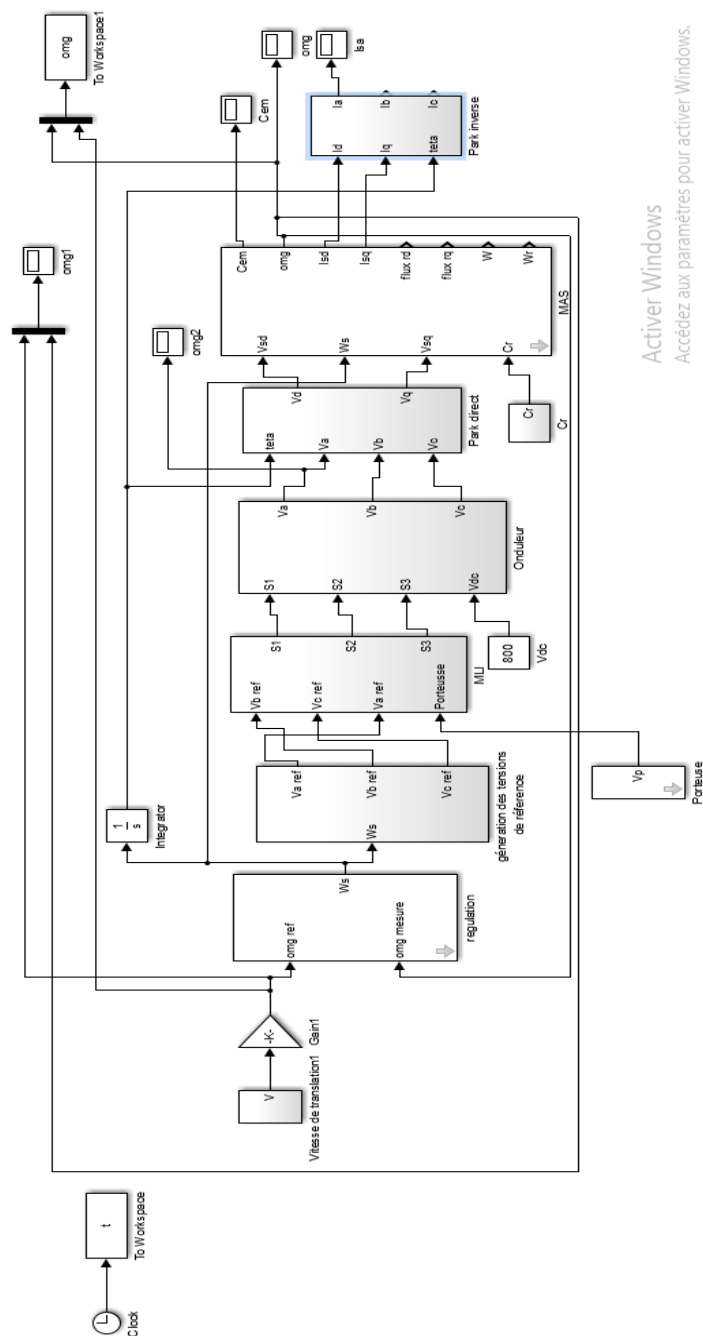


Figure E : Schéma générale de la commande scalaire

## Annexe G : Schéma général de la commande vectorielle

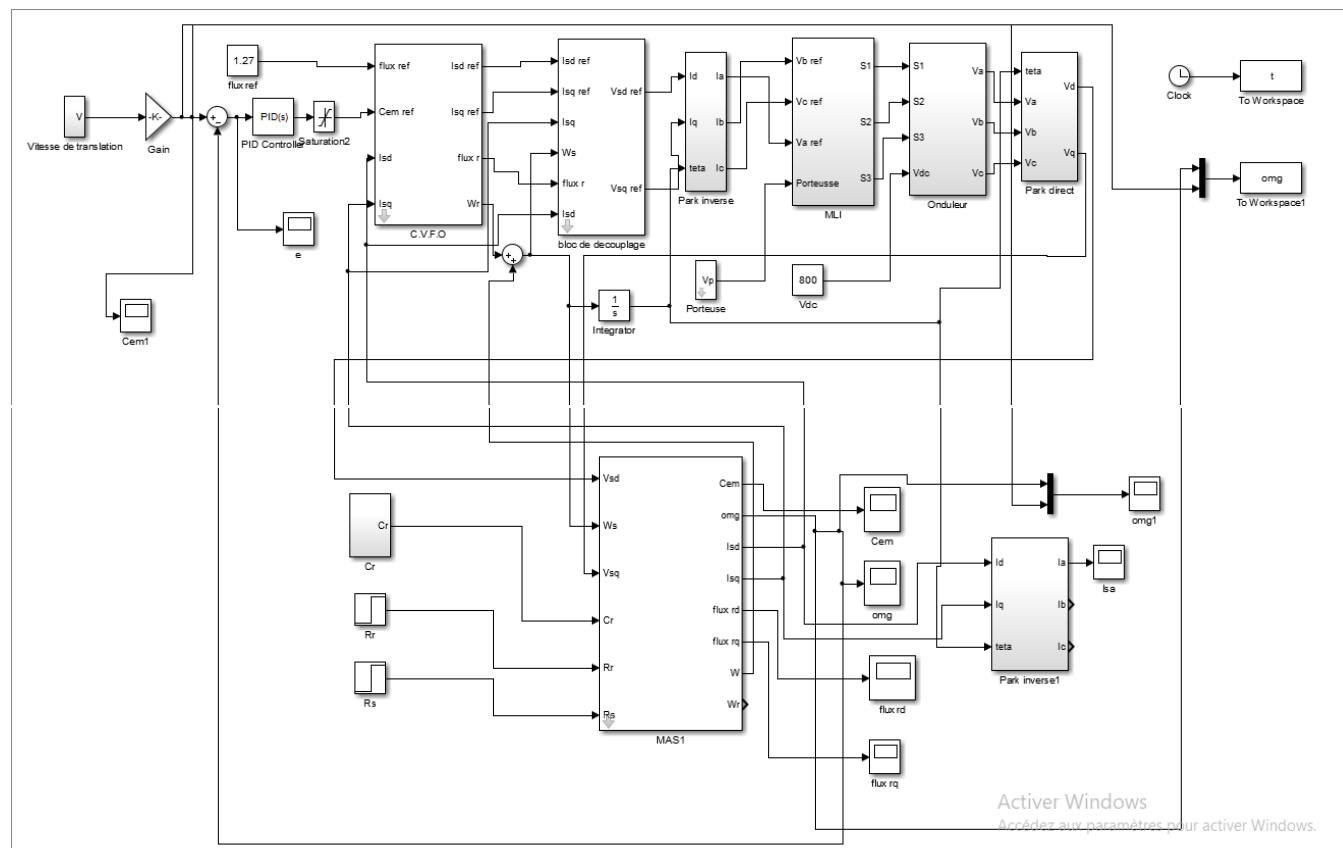


Figure E : Schéma générale de la commande vectorielle à flux rotorique oriente