



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



Université Ahmed Draya d'ADRAR

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande Electrique

## Thème

*commande direct du couple DTC-SVM d'une GADA  
intégrée dans un système éolien*

**Présenté par :**

- Yousfi Ismail

- Bakou Ebd Elhakim

**Membres de jury :**

**Président:** Mr. Harrouz Abdelkader

Université d'ADRAR

**Encadreur :** Mr. Yaichi Ibrahim

Université d'ADRAR

**Examineur :** Mr. Mesmoudi Mohamed

Université d'ADRAR

جمهورية الجزائر الديمقراطية الشعبية  
République algérienne populaire et démocratique

Ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITÉ AHMED DRAYA - ADRAR

BIBLIOTHÈQUE CENTRALE

Service de recherche bibliographique

N° ..... B.C/S.R.B./U.A./2021



جامعة أحمد دراية - أدرار

مكتبة المركزية

مصلحة البحث البيبليوغرافي

الرقم ..... ب.ج.س.ر.ب./و.أ./2021

## شهادة الترخيص بالإيداع

لنا الأستاذة: الدكتور بعشي لراهم

المشرف مذكرة الماستر

الموسومة بـ: Commande direct du couple DTC-SVM d'une GADA intégré dans un système éolien

من أجاز الطالب(ة) يوسف إسماعيل

و الطالب(ة) ياكو عبد الحكيم

كـبـة علوم وتكنولوجيا

فـه علوم وتكنولوجيا

لمحـة: محكم كهربائي

تاريخ تقييم / مناقشة:

اشهد ان الطلبة قد قاموا بالتسجيلات المطلوبة من طرف لجنة التقييم للمناقشة. وان المطابقة بين

لنسخة الورقية والالكترونية استوفت جميع شروطها

بإمكانهم ايداع النسخ الورقية (02) والالكترونية (PDF)

امضاء المشرف:

تاريخي: 04/07/2021

مساعد رئيس القسم

لا تغفل ان شهادة بدون التوقيع والتصديق

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

The image displays the Basmala (Bismillah) in a highly stylized, cursive Arabic calligraphic font. The text is written in thick black ink. Numerous red annotations are present, including small red dots, lines, and arrows that indicate the direction and flow of the pen strokes. These annotations are particularly prominent on the vertical stems of the 'Alif' and 'Lam' characters, as well as on the intricate loops and curves of the 'Mim' and 'Ra' characters. The overall composition is dynamic and emphasizes the fluidity and precision of the calligraphic art.

# ***Dédicace***

**Je dédie ce mémoire à :**

**Mes très chères parents pour leur  
Parfaite éducation et leur dévouement  
Pour mon bonheur.**

**Mes chers frères et mes chère soeurs qui  
M'ont encouragé durant toutes ces  
années d'études.**

**Mes chères amis et mes collègues d'étude**

***BAKOU***

# ***Dédicace***

**Je dédie ce mémoire :**

**Au symbole de dévotion et de dévotion,  
Ma chère mère**

**A la source de la bonté, du sacrifice et de  
l'altruisme**

**Mon cher père**

**À mes chers frères et soeurs.**

**À mes grandes familles...**

**A tous chers collègues,**

YOUSFI

# **Remerciement**

AVANT TOUT, NOUS VOULONS REMERCIER DIEU POUR LA SANTE , LA VOLONTÉ ET LA PATIENCE DURANT TOUTES CES LONGUES ANNÉES. NOUS SOUHAITONS ADRESSER NOS REMERCIEMENTS LES PLUS SINCÈRES AUX PERSONNES QUI NOUS ONT AIDÉES À L'ÉLABORATION DE CE MÉMOIRE AINSI QU'À LA RÉUSSITE DE CETTE FORMIDABLE ANNÉE UNIVERSITAIRE. CES REMERCIEMENTS VONT TOUT D'ABORD AUX ENSEIGNANTS DE LA SPÉCIALITÉ DE LA FACULTÉ DE SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE

NOUS TENONS À REMERCIER SINCÈREMENT DR **YAICHI IBRAHIM** EN TANT QUE DIRECTRICE DE CE MÉMOIRE POUR SES CONSEILS SCIENTIFIQUES, ET POUR SON SOUTIEN TOUT AU LONG

ENFIN, NOUS TENONS ÉGALEMENT À REMERCIER TOUTES LES GENS QUI ONT PARTICIPÉ DE PRÈS OU DE LOIN À LA RÉALISATION DE CE TRAVAIL.



# **Sommaire**

Liste des abréviations et symboles

Liste des tableaux

Liste des figures

*Introduction général*

## CHAPITRE I : Généralité sur les systèmes éoliens

I.1. INTRODUCTION.....	1
I.2. Vent.....	2
I.3. Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne.....	3
I.4. Définition de l'énergie éolienne.....	3
I.5. L'éolienne en Algérie.....	4
I.6. Les différents types des éoliennes.....	5
I.6.1. Aérogénérateurs à Axe Vertical.....	5
A) Les avantages d'une éolienne à axe vertical.....	5
B) Les inconvénients d'une éolienne à axe vertical.....	5
I.6.2. Aérogénérateurs à Axe Horizontal.....	6
A) Les avantages d'une éolienne à axe horizontal.....	6
B) L'inconvénient d'une éolienne à axe horizontal.....	6
I.7. Architecture d'une éolienne à axe horizontal.....	7
I. 8. Applications des éoliennes .....	9
I.9. Avantages et inconvénients de l'Energie Eolienne.....	10
A. Avantages	
B. Inconvénients	
I.2 CONVERSION D'ENERGIE CINETIQUE DU VENT EN ENERGIE MECANIQUE.....	10
I.2.1 Loi de BETZ.....	10
I.3 Etat de l'Art sur la Conversion Electromécanique.....	13
I.3.1 Les éoliennes à vitesse fixe .....	13
I.3.2 Les éoliennes à vitesse variable.....	13
I.4 <i>Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne</i> .....	14
I.4.1 <i>Systèmes utilisant la machine synchrone</i> .....	14
I.4.1.1 <i>Alternateur synchrone à rotor bobiné ou à aimants</i> .....	14
I.4.1.2 : <i>Génératrice à aimants permanents à couplage Direct</i> .....	15
I.4.2. <i>Générateurs asynchrones</i> .....	16
I.4.3. <i>Machines Asynchrone à double alimentation</i> .....	16
I.5. Conclusion.....	17

## CHAPITRE II: *Modélisation et commande vectorielle de la GADA*

II.1-INTRODUCTION.....	18
II.2- Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation MADA.....	18
II.2.1- Représentation de la MADA dans le système triphasé (a, b, c).....	18
❖ Equations électriques	

❖ Equations magnétiques	
❖ Equations mécanique	
II.2.2-Passage de triphasé au biphasé (Transformation de Park) .....	20
II.2.3-Application de la transformation de PARK .....	21
II.2.4-Représentation de la MADA dans un repère biphasé (dq).....	21
❖ Equation électriques:	
❖ Equations magnétiques	
❖ Equation mécanique	
II.3-Modèle de la machine en représentation d'état.....	22
II.4 - Modélisation des convertisseurs statiques.....	24
II.4.1 - Modélisation du convertisseur côté rotor « CCM ».....	25
II.4.2 - Choix de structure des semi-conducteurs.....	27
II.5- Modélisation de la turbine éolienne.....	27
II.5.1- Loi de BETZ.....	27
II.5.2 Modèle de la partie mécanique .....	30
II.6-COMMANDE VECTORIELLE DE LA GADA.....	31
II.6.1-Principe de la commande vectorielle de la GADA.....	31
II.6.2-Les types de la commande vectorielle.....	31
II.6.2.1-La commande vectorielle directe.....	31
II.6.2.2-La commande vectorielle indirecte.....	32
II.7-Modèle de la CADA avec orientation du flux statorique .....	32
❖ Equation électriques:	
❖ Equations magnétiques	
II.8- Relation entre courants statoriques et courants rotoriques.....	32
II.9-Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques.....	33
II.10-Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques.....	34
II.11-Commande vectorielle de la CADA en génératrice.....	35
II.11.1-Commande directe des puissances active et réactive.....	35
II.11.2-Commande indirecte des puissances active et réactive.....	35
II.11.2.1-Commande Indirecte sans Boucles des Puissances (en boucle ouverte).....	36
II.11.2.2-Commande Indirecte avec boucle de puissance (en boucle fermé).....	36
II.12-Type du régulateur PI.....	37
II.12.1-Synthèse du régulateur PI .....	38
II.13-Résultats de simulation.....	39
II.14-Conclusion.....	44

### CHAPITRE III: COMMANDE DIRECTE DU COUPLE DE LA GADA

III.1 INTRODUCTION.....	46
III.2 PRINCIPE DE LA COMMANDE DIRECTE DU COUPLE.....	47
III.3 - Caractéristiques principales d'une commande directe du couple.....	47
III.4. FONCTIONNEMENT ET SEQUEUNCES D'UN ONDULEUR DE TENSION TRIPHASE.....	47
III.5.1. Contrôle de flux rotorique et du couple électromagnétique.....	49
III.5.1.1. Principe de contrôle de flux rotorique.....	49
III.5.1.2. Principe de contrôle du couple électromagnétique.....	50
III.5.1.3. Choix du vecteur de tension.....	50



III.5.2. Estimateur.....	51
III.5.2.1. Estimation du flux rotoriques .....	52
III.5.2.2. Estimation du couple électromagnétique.....	52
III.6 ELABORATION DU VECTEUR DE COMMANDE.....	52
III.6.1 Le correcteur de flux.....	52
III.6.2. Le correcteur de couple.....	53
III.6.2.1. Le correcteur à trois niveaux.....	53
III.6.2.2. Le correcteur à deux niveaux.....	54
III.7 ELABORATION DE LA TABLE DE COMMANDE.....	54
III.7.1. Structure générale du contrôle direct de couple.....	54
A. Avantages de la DTC	
B. Inconvénients de la DTC	
III.8.RESULTATS DE LA SIMULATION.....	56
III.9.Conclusion.....	59

#### CHAPITRE 4: Amélioration de la DTC par la modulation vectorielle DTC-SVM

IV.1.introduction .....	62
IV.2 AMELIORATION DE LA DTC PAR LA MODULATION VECTORIELLE DTC-SVM.....	62
IV.2.1 Principe de la MLI vectorielle SVM.....	62
IV.2.2.Les étapes de la réalisation d'une MLI vectorielle (SVM) .....	64
1) Détermination des vecteurs tensions de références $V_{r\alpha}$ $V_{r\beta}$	
2) Détermination des secteurs	
3) Calcul des variables X, Y et Z	
4) Calcul de $T_1$ et $T_2$ pour chaque secteur	
5) Génération des signaux modulateurs $T_{aon}$ , $T_{bon}$ et $T_{con}$	
6) Génération des séries d'impulsions $S_a$ , $S_b$ et $S_c$	
IV.3. STRUCTURE DE LA DTC-SVM .....	66
IV.3.1. Contrôle de flux rotorique .....	66
IV.3.2. Contrôle du couple électromagnétique pour DTC-SVM .....	67
IV.4. Résultats de simulation de la commande DTC-SV.....	69
IV.5.Résultat comparaison entre DTC-C et DTC-SVM.....	73
IV.6 Conclusion.....	67
IV.6 Conclusion générale.....	77

# **Liste des Figures**

## **CHAPITRE 1**

**Figure. I.1:** La naissance du vent

**Figure I.2 :** Principaux organes du système de conversion éolienne.

**Figure I.3:** Électricité éolienne à 50m de hauteur

**Figure I.4 :** Différentes technologie d'éoliennes à axe vertical

**Figure I.5:** Différentes technologie d'éoliennes à axe horizontale

**Figure I.6 :** Principaux composants d'une éolienne

**Figure I.7 :** Elements d'une nacelle

**Figure I.8 :** Tub de courant d'air autour d'une éolienne

**Figure I.9 :** Coefficient de puissance

**Figure I.10 :** Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes .

**Figure I.11 :** Eolienne à vitesse fixe

**Figure. I.12.** Eolienne à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à cage.

**Figure I.13 :** Machine synchrone reliée au réseau par un dispositif redresseur –onduleur MLI

**Figure I.14:** Génératrice à aimants

## **CHAPITRE 2**

**Figure II.1 :** Représentation de la MADA dans le système triphasé.et rotorique

**Figure II.2 :** Passage du triphasé au biphasé et l'inverse

**Figure II.3:** Angles de Park des grandeurs statorique permanents à couplage Direct

**Figure II.4-** La structure AC-DC-AC (en anglais « back-to-back »).

**Figure II.5-** schématique d'un onduleur de tension alimente le rotor de la MADA.

**Figure II.6 -** Schéma simplifié de l'onduleur triphasé.

**Figure II.7-**Schéma de principe de la théorie de Betz

**Figure II.8-**Coefficient aérodynamique de puissance

**Figure II.9-**L'évolution coefficient de puissance  $C_p$

**Figure II.10-**Modèle mécanique de la turbine éolienne

**Figure II.11-**Schéma bloc du modèle de la turbine

**Figure II.12:** Principe de la commande vectorielle.

**Figure II.13:** Orientation du flux statorique

**Figure II.14:** Schéma bloc du système à réguler

**Figure II.15:** Schéma bloc de la commande directe de la puissance

**Figure II.16:** Schéma bloc de la commande indirecte (en boucle ouverte)

**Figure II.17:** Schéma bloc de la commande indirecte (en boucle fermé)

**Figure. II.18:** Schéma bloc d'un système régulé par un PI

**Figure II.20-** Tests de suivi de consignes pour la commande directe

### CHAPITRE 3

**Figure III.1:** Machine asynchrone commandée par l'onduleur de tension

**Figure III.2:** Séquence de fonctionnement d'un onduleur de tension à deux niveaux .

**Figure. III.3.** (a) : Sélection du vecteur tensions  $V_i$  correspond au contrôle de l'amplitude de flux et (b) : Évolution du vecteur flux rotorique dans le plan  $(\alpha, \beta)$

**Figure. III.4 :** Répartition des zones

**Figure III.5:** Comparateur à hystérésis utilisé pour contrôler le flux rotorique

**Figure. III.6:** Correcteur de couple à trois niveaux.

**Figure. III.7** Schéma bloc de la structure de contrôle DTC-C appliquée à la GADA

**Figure III.8.** Résultats de simulation de la DTC-C à flux rotorique variable

### CHAPITRE 4

**Figure. IV.1.** (a) : États des interrupteurs pour chaque vecteur tension et  
(b) : Représentation des vecteurs de tension dans le repère  $(\alpha, \beta)$

**Figure. IV.2.** Décomposition d'un vecteur tension de référence  $V_{r-ref}$ .

**Figure. IV.3.** Représentation vectorielle de la stratégie d'orientation de flux rotorique.

**Figure. IV.3.a.** Schéma fonctionnel de la régulation du flux

**Figure. IV.3 b.** Schéma fonctionnel de la régulation du couple

**Figure. IV.4.** Schéma bloc de la structure de contrôle DTC-SVM appliquée à la MADA

**Figure IV.5.a.b.c.d.e.f.g.h** Résultats de simulation de la DTC-SVM de la MADA

**Figure IV.6** Couple électromagnétiques et flux rotorique obtenus (DTC-C, DTC-SVM)

## Liste des tableaux

### CHAPITRE III

**Tableau III.1 :** Evolution des grandeurs flux et couple en fonction du vecteur  $V_s$  appliqué dans la zone  $Z_i$ .  $k = (i-1, i-2, i+1, i+2)$

**Table. III.2 :** Table de commutation

### CHAPITRE IV

**Table. IV.1.** Tensions rotoriques

**Table. IV.2.** Identification du secteur

**Table. IV.3.** Calcul des temps d'application des vecteurs non nuls.

**Table. IV.4.** signaux de commande des interrupteurs du convertisseur coté rotor CCM.

**Table. IV.5:** *comparaison Performances entre DTC-C et DTC-SVM*

### ABREVIATIONS

**CCM :** Convertisseur Coté Machine

**CCR :** Convertisseur Coté Réseau.

**FTBO :** Fonction de Transfert en Boucle Ouverte

**FTBF :** Fonction de Transfert en Boucle Fermée.

**GADA :** Génératrice Asynchrone à Double Alimentation.

**MADA :** Machine Asynchrone à Double Alimentation.

**MLI :** Modulation de Largeur d'Impulsion.

**PI :** Proportionnel Intégral.

**THD :** Total Harmonic Distortion.

**SVM :** Space Vector Modulation.

**DTC :** Direct Torque Control.

**IGBT :** Insulated Gate Bipolar Transistor

**MOSFET :** Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.

**GTO :** Gate Turn-Off Thyristor

### NOMENCLATURE

<b>V<sub>v</sub></b>	Vitesse du vent	m/s
<b>P<sub>v</sub></b>	Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé	W

<b>Pt</b>	Puissance aérodynamique de la turbine	W
<b>S</b>	Surface circulaire balayée par la turbine $S = \pi \cdot R^2$	m <sup>2</sup>
<b>Cp</b>	Coefficient de puissance	=
<b>Cp-max</b>	Coefficient de puissance relatif à l'extraction maximale de puissance	
<b>Cc</b>	Coefficient du couple	
<b>R</b>	Longueur d'une pale (Rayon de l'éolienne)	m
<b>G</b>	Gain du multiplicateur	
<b>B</b>	Angle de calage des pales	deg
$\alpha$	Angle d'incidence des pales	deg
<b>Kp</b>	Composante proportionnelle du correcteur PI	
<b>Ki</b>	Composante intégrale du correcteur PI	
<b>J</b>	Moment d'inertie totale de l'ensemble « turbine + génératrice »	Kg. m <sup>2</sup>
<b>C<sub>F</sub></b>	Couple de frottement visqueux	N.m
<b><math>\lambda_{opt}</math></b>	Vitesse relative optimale	
$\lambda$	Vitesse relative ou Ratio de vitesse	
<b>J<sub>t</sub></b>	Moment d'inertie de la turbine	Kg. m <sup>2</sup>
<b>J<sub>g</sub></b>	Moment d'inertie de la génératrice	Kg. m <sup>2</sup>
<b><math>\Omega_t^*</math></b>	Vitesse de référence de la turbine	rad/s
<b><math>\Omega_g</math></b>	Vitesse mécanique de la génératrice	rad/s
<b>C<sub>t</sub></b>	Couple mécanique disponible sur l'arbre lent de la turbine	N.m
$\rho$	Masse volumique de l'air en température ambiante (15°C)	Kg/m <sup>3</sup>
<b>R<sub>s</sub></b>	Résistance statorique par phase	$\Omega$
<b>R<sub>r</sub></b>	Résistance rotorique par phase	$\Omega$
<b>L<sub>s</sub></b>	Inductance cyclique statorique par phase	H
<b>L<sub>r</sub></b>	Inductance cyclique rotorique par phase	H
<b>M</b>	Inductance cyclique mutuelle (entre stator et rotor), inductance magnétisante	H
<b>l<sub>s</sub></b>	Inductance propre d'une phase statorique	H
<b>l<sub>r</sub></b>	Inductance propre d'une phase rotorique	H
<b>ms</b>	Inductance mutuelle entre deux phases statoriques	H

<b>mr</b>	Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques	H
<b><math>\sigma</math></b>	Coefficient de dispersion de Blondel -	-
<b>p</b>	Nombre de paires de pôles -	-
<b>Fv</b>	Coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice	N.m.s/rd
<b>Cem</b>	Couple électromagnétique de la génératrice	N.m
<b>(<math>S_a S_b S_c</math>)</b>	Axes magnétiques liés aux enroulements triphasés statorique	-
<b>(<math>r_a r_b r_c</math>)</b>	Axes magnétiques liés aux enroulements triphasés rotoriques	-

**Annexe « A »  
Paramètres du système éolien**

<b>Nom et symbole des paramètres</b>	<b>Valeur numérique</b>
Number des pales	3
Rayon du rotor $R$	35.25 m
Gain du multiplicateur de vitesse $G$	90
Moment d'inertie total $J$	1000 kg.m <sup>2</sup>
Coefficient de frottement visqueux $f_v$	0.0024 N.M.S <sup>-1</sup>
Vitesse du vent de démarrage $v_d$	4 M/S
Vitesse du vent d'arrêt $v_m$	25 M/S

**Tableau A.1** Paramètres de la turbine éolienne de 1.5MW

**Paramètres de la machine asynchrone à double alimentation**

<b>Nom et symbole des paramètres</b>	<b>Valeur numérique</b>
Puissance nominal $P_n$	1.5 MW
Courant nominal $I_n$	1900 A
Tension nominale statorique $V_s$	398/690 V
Fréquence nominale statorique $f$	50 HZ
Tension nominal rotorique $V_r$	225/389 V
Résistance statorique $R_s$	0.012 $\Omega$
Résistance rotorique $R_r$	0.021 $\Omega$
Inductance statorique $L_s$	0.0137 H
Inductance rotorique $L_r$	0.0136 H
Inductance mutuelle $M$	0.0135 H
Tension du bus continu $UDC$	1200 V
Inertie totale $J$	1000 kg.m <sup>2</sup>
Nombre de paires de pôles $p$	2

**Tableau A.2** Paramètres de la MADA de 1.5MW

## Introduction Générale

La production de l'énergie électrique dans le monde génère diverses pollutions. Ainsi, les centrales thermiques (charbon, pétrole) sont responsables de rejets atmosphériques liés à la combustion d'énergies fossiles. A l'opposé, les centrales nucléaires, dont le développement s'intensifie suite à la crise du pétrole, n'ont pas d'influence néfaste sur la qualité de l'air. Par contre, elles produisent des déchets radioactifs qui engendrent d'importants problèmes de stockage, de traitement ou de transport.

Aujourd'hui, la crainte de n'utiliser qu'une seule énergie avec tous ses risques, la prise de conscience des risques pour l'environnement, l'engouement pour les énergies dites renouvelables et l'ouverture du marché de la production d'énergie électrique sont autant de facteurs qui redonnent une place importante à ces énergies (hydraulique, éolienne, solaire, biomasse, ...) dans la production de l'électricité

La production d'électricité par l'énergie éolienne intéresse de plus en plus les pays afin de produire une énergie propre et durable, et l'état avancé des recherches dans le domaine éolien montre une volonté de développer des éoliennes toujours plus puissantes et capables de capter au mieux la puissance disponible dans le vent, beaucoup de recherches sont faites et se font en ce moment sur les stratégies des différentes chaînes de conversion utilisées pour la production d'électricité éolienne.

Une grande partie des éoliennes installées de nos jours sont équipées d'une génératrice asynchrones à double alimentation (GADA). Cette dernière permet une production d'électricité à vitesse variable, ceci permet alors de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent. Ces éoliennes sont aussi équipées d'hélices à angle de calage de pale variable pour s'adapter aux conditions de vent. L'ensemble de l'éolienne est contrôlé de manière à maximiser en permanence la puissance produite en recherchant le point de fonctionnement à puissance maximum communément appelé MPPT (maximum power point tracking)

L'objectif principal de notre travail consiste à l'étude de la commande d'une GADA qui peut être introduite dans un système éolien. On a choisi le type de commande, c'est DTC-SVM (Direct Torque Control Space Vector Modulation). La structure de notre mémoire est donnée comme suit

Dans le premier chapitre nous présentons l'état de l'art de l'énergie éolienne. Nous donnons un aperçu sur les différents types d'éoliennes, leurs caractéristiques technologiques, Des statistiques sont données montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde sans oublier l'Algérie, Ensuite, les différentes associations machine-convertisseur statique, utilisées pour la conversion éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation seront étudiées.

Le second chapitre est dédié à l'étude des éléments essentiels de la chaîne éolienne. Elle est constituée de la turbine et la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). La modélisation de la partie mécanique de l'éolienne (voilure) et l'élaboration d'une commande adéquate pour le captage du maximum de puissance possible sont développés dans ce chapitre et ensuite la modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation. *et* la commande vectorielle pour la régulation de puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation qui est entraînée par une vitesse fixe (vitesse mécanique constante) et variable (avec turbine).

Les résultats de simulation sous Matlab/Simulink seront présentés.

Le troisième chapitre, est l'objet de la commande directe du couple de la GADA, il traite en premier lieu des rappels de notions de base sur la théorie de la commande directe de couple. Puis il présente la stratégie de commande par DTC appliquée à la génératrice asynchrone à



double alimentation. L'objectif de cette commande est de contrôler le couple électromagnétique et le flux rotorique de la GADA. Les performances de la méthode seront justifiées par la simulation.

Le quatrième chapitre ,est consacré à la commande directe du couple des la GADA alimentées par un onduleur de tension à deux niveaux utilisant la modulation vectorielle SVM. De méthode sont présenté : la commande directe du couple DTC-SVM utilisant les hystérésis .

*CHAPITRE I*  
*GÉNÉRALITÉ SUR LES*  
*SYSTÈMES ÉOLIENS*

**I.1. INTRODUCTION**

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne. Les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones ou asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes [37].

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal). L'énergie éolienne est une ressource d'origine solaire, provient du déplacement des masse d'air qui est du indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autre une différence de pression est créée et la masse d'air est en perpétuel déplacement. Environ 0,25% du rayonnement solaire total est converti en énergie éolienne. L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). L'énergie éolienne est devenue aujourd'hui une réalité. Elle est en plein développement en termes de puissance installée dans le monde. Plusieurs facteurs ont contribué et contribuent encore à son essor

I.2. Vent

Le vent naît sous l'effet des différences de températures et de pression. Le grand responsable de ce phénomène est le soleil (Figure. I.1.A). Il chauffe les mers et les continents mais pas au même rythme (Figure. I.1.B). Une fois réchauffés, ces derniers chauffent à leur tour les masses d'air qui les surplombent. L'air augmente de volume lorsqu'il est chauffé (Figure. I.1.C), ce qui crée un déplacement des particules de l'air (Figure. I.1.D) et c'est en capturant leur énergie cinétique que les éoliennes se mettent à fonctionner.

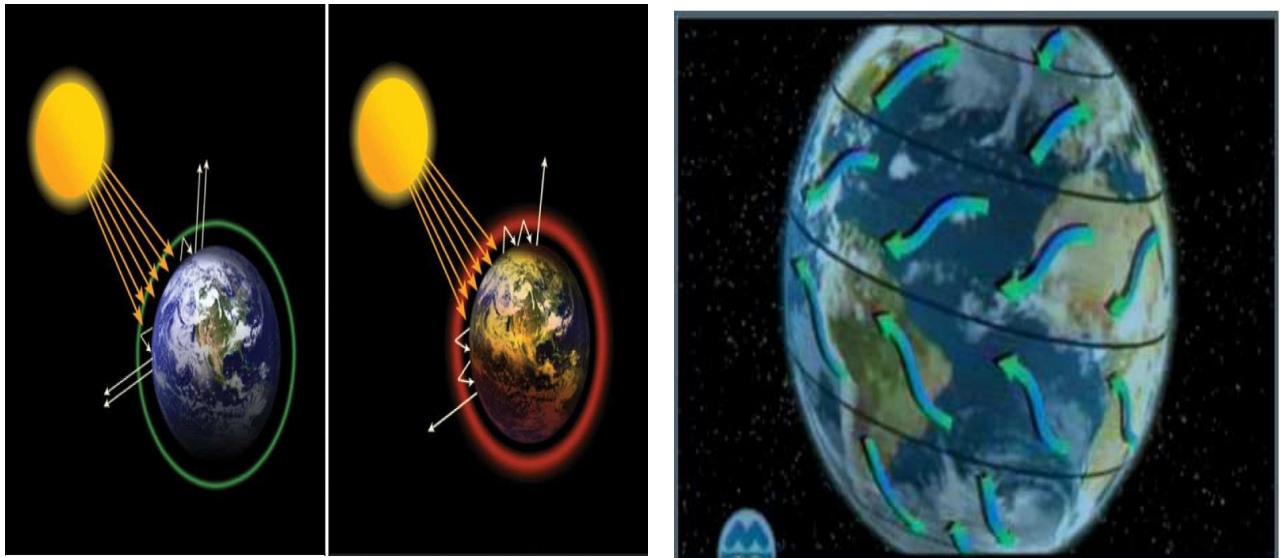


Figure. I.1.A : Réchauffement de la terre par le soleil. Figure. I.1. B : Réchauffement des mers.

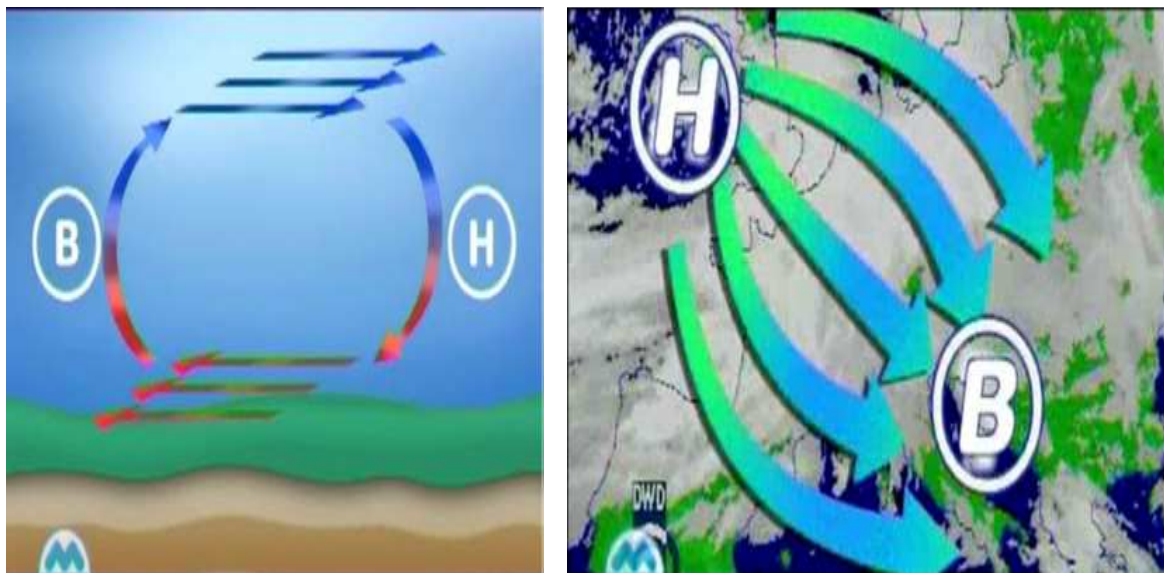


Figure. I.1. C : L'air Augmentation du volume Figure. I.1. D : déplacement des particules de l'air. d'aire sous l'effet du réchauffement des meres.

Figure. I.1: La naissance du vent [5].

**I.3. Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne**

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2000 ans avant J. C environ [20] .

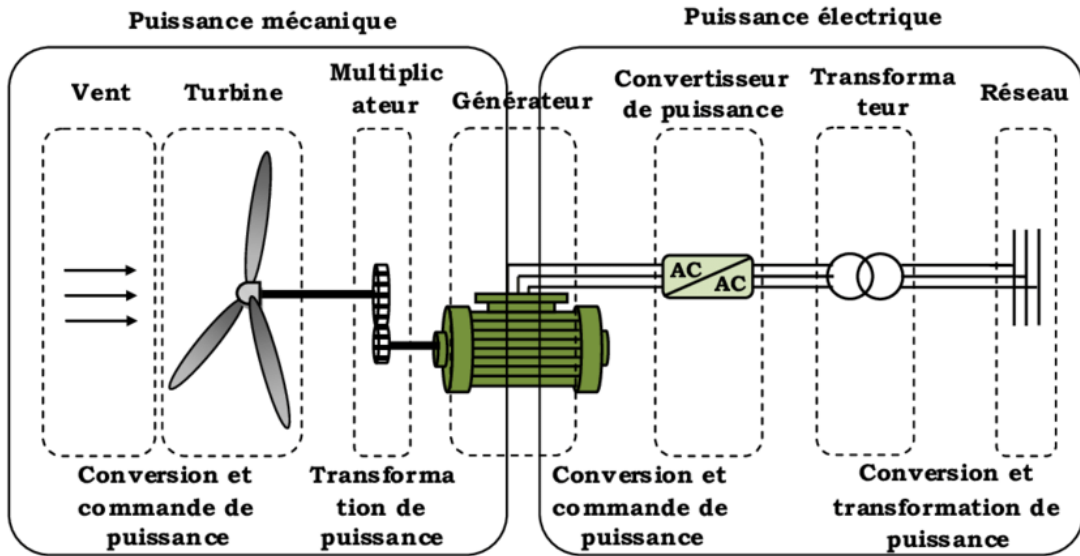
Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Age. Utilisés tout d'abord pour moulin le grain, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés. Dès le XIV siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. Seulement en Hollande et Danemark, vers le milieu du XIXème siècle, le nombre des moulins est estimé respectivement à plus de 30000 et dans toute l'Europe à 200000. L'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive [12].

L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pût être « redécouverte » et de nouveau utilisée (dans les années 40 au Danemark 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde

D'après les statistiques 2012 du Global Wind Energie Concil (GWEC), la puissance éolienne totale installée fin 2012 dans le monde s'élevait à 282 482 MW. La capacité ajoutée sur la période 2011-2012 représente un taux de croissance de 19 %. Depuis dix ans, ce taux de croissance est en moyenne de 26% par an. D'après les prévisions 2011 du GWEC, la capacité mondiale devrait s'élever à 493 330 MW fin 2016. En 2020, leur scénario prévoit environ 832 000 MW de puissance installée [11] .

**I.4. Définition de l'énergie éolienne**

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elles sont généralement utilisés pour produire de l'électricité et entre dans la catégorie des énergies renouvelables.



**Figure I.2 :** Principaux organes du système de conversion éolienne.

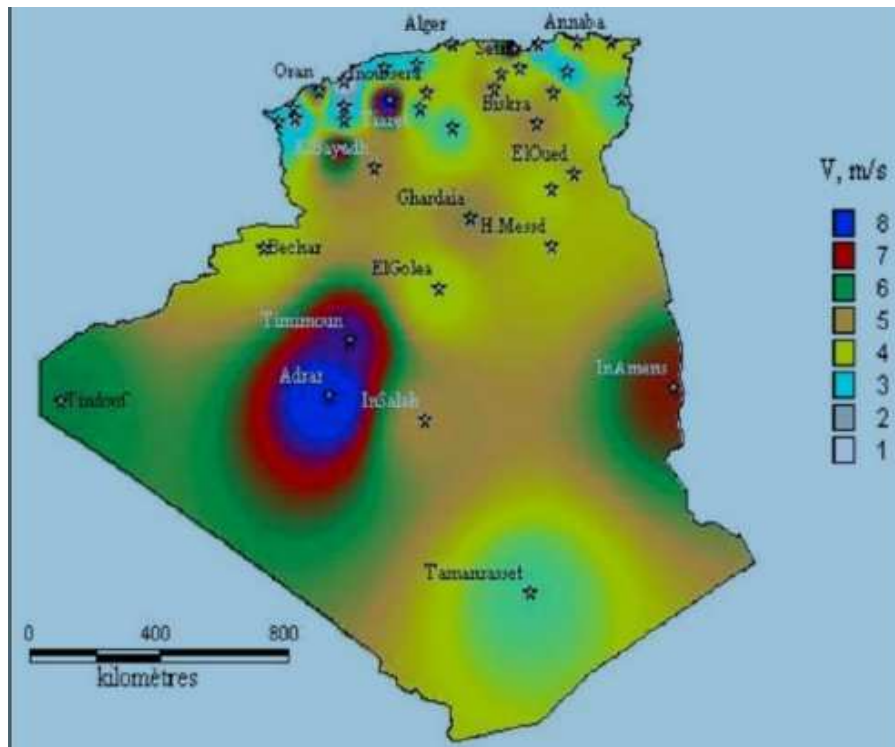
Le SCE (Système de Conversion Eolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique.

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [21].

### I.5. L'éolienne en Algérie

présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser 4m/s (6m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7 m/s dans la région d'Adrar [38].

Les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées par le CDER depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie.



**Figure I.3:** Électricité éolienne à 50m de hauteur [19]- [6].

Ceci a permis l'identification de huit zones ventées susceptibles de recevoir des installations éoliennes [38]:

- deux zones sur le littoral
- trois zones sur les hauts plateaux
- et quatre zones en sites sahariens.

#### ❖ **Projet à faire en Algérie**

La réalisation de la première ferme éolienne en Algérie, d'une puissance de 10 MW à Adrar (sud-ouest), a été confiée jeudi 21/01/2010 au groupe français VERGNET. Ce dernier a été retenu par la Compagnie de l'engineering de l'électricité et du gaz (CEEG), filiale du groupe SONELGAZ .

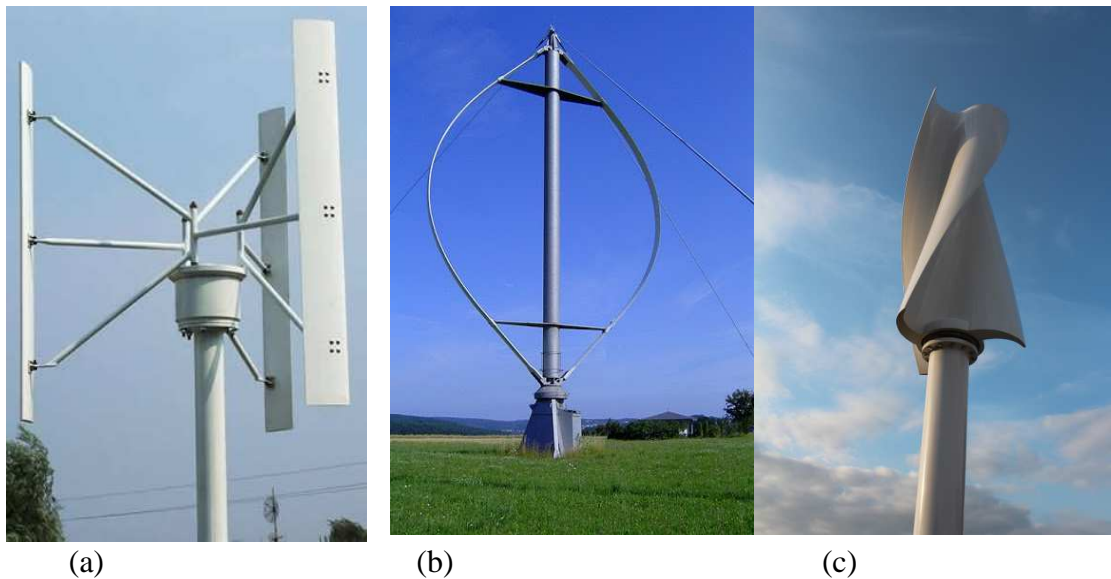
Le potentiel éolien, technique de ces régions a été estimé à 172 TWh/an dont 37 TWh/an économiquement exploitable soit l'équivalent de 75% des besoins nationaux en 2007 [38].

### **I.6. Les différents types des éoliennes**

Un aérogénérateur (éolienne), dans les systèmes de conversion de l'énergie éolienne est un élément principale et très important [14] Les éoliennes sont classées, selon la disposition géométrique de l'aérogénérateur, en deux catégories: celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

#### **I.6.1. Aérogénérateurs à Axe Vertical**

L'axe de rotation de ces turbines est vertical par rapport au sol et perpendiculaire à la direction du vent, elles sont les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Ce type de turbine peut recevoir le vent de n'importe quelle direction, ce qui rend inutile tout dispositif d'orientation. Le générateur et la boîte d'engrenages sont disposés au niveau du sol, ce qui est plus simple et donc économique [11].



**Figure I.4** : Différentes technologie d'éoliennes à axe vertical : a) Turbine Darrieus en H  
b) Turbine Darrieus, c) Turbine Savonius

❖ **Les avantages d'une éolienne à axe vertical**

- ✦ Elle vous permet de placer une génératrice, un multiplicateur....etc. à terre.
- ✦ Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent
- ✦ Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien

❖ **Les inconvénients principaux sont les suivants**

- ✦ L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical n'est pas impressionnante.
- ✦ La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- ✦ Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour[21] .

**I.6.2. Aérogénérateurs à Axe Horizontal**

Ce sont les turbines à axe horizontal actuellement. Elles sont les plus utilisées par rapport aux turbines à axe vertical, à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à deux, trois (les plus courantes) ou plusieurs pales.





**Figure I.5:** Différentes technologies d'éoliennes à axe horizontal : a) Eolienne multipale b) Eolienne horizontale bipale c) Eolienne horizontale tripale

#### ❖ Les avantages d'une éolienne à axe horizontal

- ✦ Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- ✦ Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.
- ✦ Peu de contraintes mécaniques
- ✦ Grande efficacité.

#### ❖ L'inconvénient d'une éolienne à axe horizontal

- ✦ Bruit conséquent les vibrations non négligeables
- ✦ Coût de construction très élevé.
- ✦ L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Structures à axe vertical son encore utilisé pour la production d'électricité dans les zones isolées. Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple.

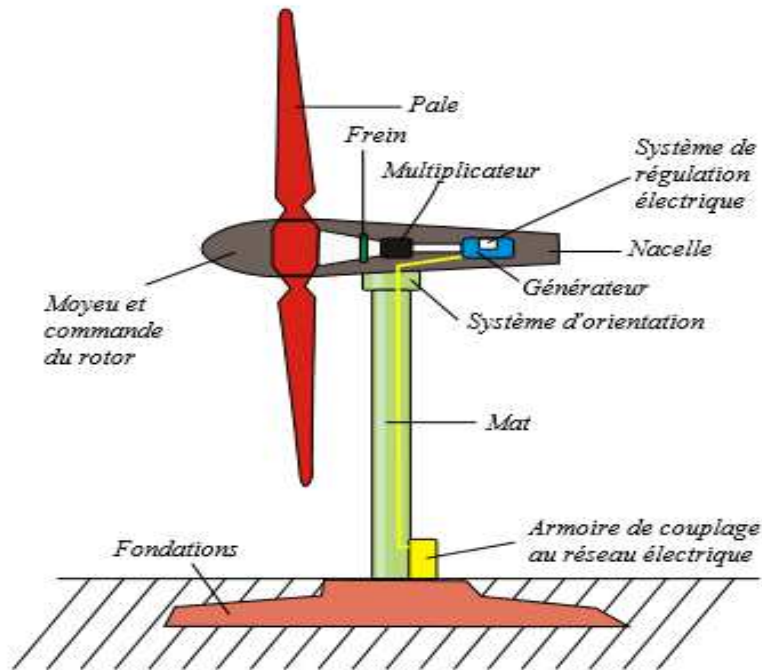
### I.7. Architecture d'une éolienne à axe horizontal

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.

Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de quatre éléments principaux : Rotor, Lemât, La nacelle et Les pales.



**Figure. I.6** : Principaux composants d'une éolienne [27].

#### ✓ Rotor

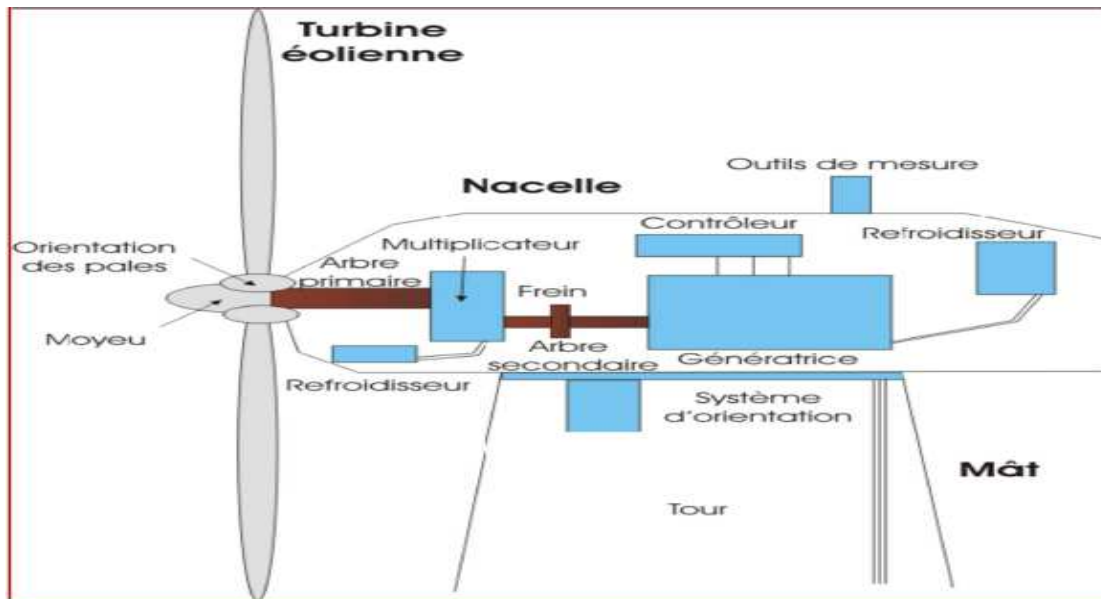
C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué de pales et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu.

#### ✓ Le mât

c'est un tube en acier ou tour qui supporte le rotor et la nacelle. Doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Le mât compose les câbles qui assurent la liaison électrique. Le choix de sa hauteur est important. Il s'agit de trouver un bon compromis: Le coût de sa construction et l'exposition souhaitée du vent. En effet, cela s'accompagne également de l'accroissement du coût de la structure.

#### ✓ La nacelle

Elle assemble tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulement, multiplicateur. Le frein à disque est différent des freins aérodynamiques, qui arrêtent le système en cas de surcharge. Un générateur qui est une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) [33]-[23]-[32]. Regroupe tout le système de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique et divers actionneurs de commande



**Figure I.7 :** Elements d'une nacelle

### ✓ Les pales

Permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Le nombre de pales fixées sur le rotor a relativement peu d'influence sur les performances d'une éolienne. Plus le nombre de pale est grand plus le couple de démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite. Les turbines unies et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques. Elles ont un rendement énergétique moindre, et sont plus bruyantes puisqu'elles tournent plus vite. Elles provoquent une perturbation visuelle plus importante de la vision des paysagistes. De plus, un nombre pair de pales doit être évité pour des raisons de stabilité.

### I. 8. Applications des éoliennes

L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent. Cette énergie est transformée en énergie mécanique mécanique peut être exploitée principalement de deux manières :

- soit directement pour entraîner par exemple une pompe de relevage d'eau
- soit pour entraîner une génératrice électrique. Dans le cas de production d'énergie électrique, on peut distinguer deux types de configuration :
  - l'énergie est stockée dans des accumulateurs en vue de son utilisation ultérieure
  - l'énergie est utilisée directement par injection sur un réseau de distribution

On constate ainsi les applications électriques de l'énergie éolienne, à savoir d'une part la complémentarité avec les moyens traditionnels de production (centrales thermiques classiques ou nucléaires, barrages...) pour des régions disposant d'une infrastructure existante et d'autre part la possibilité de production sur des sites non raccordés à un réseau de distribution traditionnel. Il est particulièrement intéressant de souligner les possibilités offertes par l'énergie éolienne en ce qui concerne le désenclavement de régions peu urbanisées et ses applications dans les pays en voie de développement (alimentation d'unités de désalinisation, cogénération avec des groupes diesel, des panneaux photovoltaïques...) [22].

**I.9. Avantages et inconvénients de l'Énergie Éolienne****➤ Avantages**

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier ;
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie de risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs ;
- Les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plus part des centrales thermiques et des centrales nucléaires ;
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.

L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains :

- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi, les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut en plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales ;
- C'est l'énergie la moins chère des énergies renouvelables ;
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent en énergie dans ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement est faible par rapport à celui des centrales à énergies plus traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà ;
- La période de haute productivité se situe en hiver (vent plus forts), ce qui correspond à la période de l'année où la demande est plus forte. Concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.

**➤ Inconvénients**

- L'énergie change suivant la météo; la nature du vent stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux.
- Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes c'est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe.
- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés
- Le cas d'installations autonomes, il est nécessaire de recourir au stockage ou bien de doubler l'installation par un groupe électrogène Diesel, ce qui augmente le coût.
- Impact visuel: les éoliennes installées sur terre ont tendance à défigurer le paysage. Les oiseaux: les éoliennes, selon certains, pourraient constituer pour la migration des oiseaux un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci

**I.2 conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique****I.2.1 Loi de BETZ**

La théorie du moteur éolien à axe horizontal a été établie par BETZ. Il suppose que « Le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse  $V_1$  et à l'infini aval d'une vitesse  $V_2$  »

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la (Figure I.9) sur lequel on a représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne  $V_1$  et la vitesse du vent après passage à travers le rotor  $V_2$  soit  $(V_1+V_2)/2$ , la masse d'air en mouvement de densité  $\rho$  traversant la surface  $S$  des pales est:

$$m = \frac{\rho * S * (V_1 + V_2)}{2} \tag{I.1}$$

La puissance  $p_{aér}$  alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$p_{aér} = \frac{m * (V_1^2 - V_2^2)}{2} \tag{I.2}$$

Soit en remplaçant par son expression dans (I.1):

$$p_{aér} = \frac{\rho * S * (V_1 + V_2) * (V_1^2 - V_2^2)}{4} \tag{I.3}$$

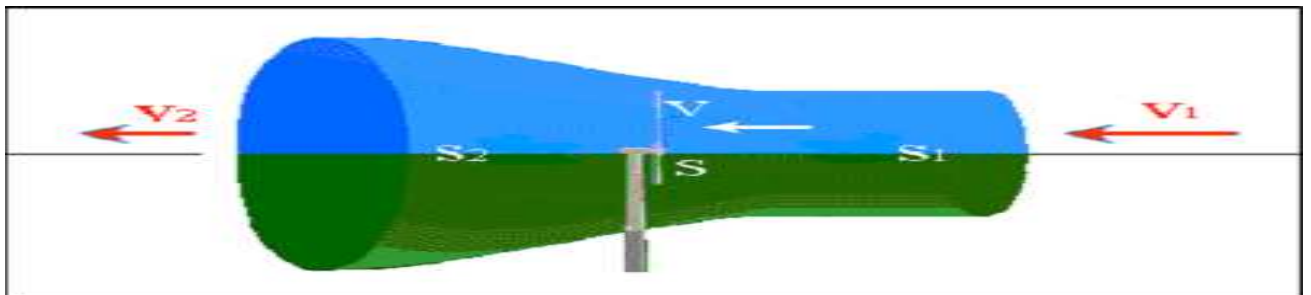


Figure I.8 : Tub de courant d'air autour d'une éolienne

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface  $S$  sans diminution de vitesse, soit à la vitesse  $V_1$ , la puissance  $p_v$  correspondante serait alors :

$$p_v = \frac{\rho * S * v_1^3}{2} \tag{I.4}$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{p_{aér}}{p_v} = 1/2 [1 + (\frac{V_1}{V_2})] [1 - (\frac{V_1}{V_2})^2] = C_p \tag{I.5}$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure. I.10), on s'aperçoit que le ratio  $\frac{p_{aér}}{p_v}$  appelé aussi coefficient de puissance  $C_p$  présente un maximum de  $16/27$  soit  $0,59$ . C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimée fonction de la vitesse relative  $\lambda$  représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [32].



Figure I.9 : Coefficient de puissance

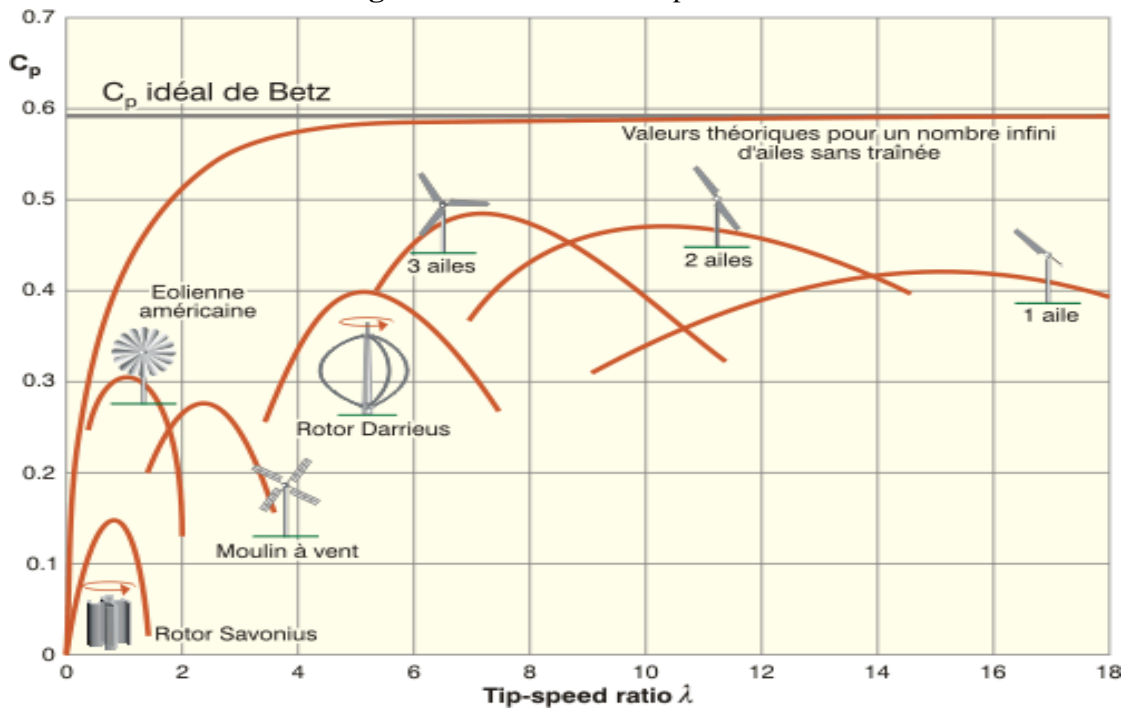


Figure I.10 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes [32].

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance (Figure I.9) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 45 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts [32].

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance (Figure I.10) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente [32].

✓ **Production d'énergie mécanique**

En combinant les équations (I.1), (I.4) et (I.5), la puissance mécanique  $p_{aér}$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$p_{aér} = C_p * p_v = 1/2 * C_p(\lambda) * \rho * \pi * R^2 * V_1^3 \tag{I.6}$$

$$\lambda = \omega_1 * R / V_1 \tag{I.7}$$

$\omega_1$ : vitesse de rotation avant multiplicateur et R: rayon de l'aérogénérateur

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse K, la puissance mécanique  $p_{aér}$  disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$p_{aér} = 1/2 * C_p \left( \frac{R * \omega_2}{K * V_1} \right) \rho * \pi * R^2 * V_1^3 \tag{I.8}$$

Avec  $\omega_2$ : vitesse de rotation après multiplicateur.

### I.3 Etat de l'Art sur la Conversion Electromécanique

Il existe essentiellement deux technologies d'éoliennes, les éoliennes fonctionnant à vitesse fixe qui contiennent pour la plupart un générateur asynchrone à cage d'écureuil, et celles dont la vitesse est variable. Qui permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent.

#### I.3.1 Les éoliennes à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice est directement couplée au réseau. Sa vitesse mécanique est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice. La technologie inhérente aux éoliennes à vitesse fixe est bien maîtrisée. En effet, c'est une technologie qui a fait preuve d'une simplicité d'implantation, une fiabilité et un faible coût. Cela permet une installation rapide de centaines de KW de génération éolienne. Cependant, avec la mise en place très progressive de projets d'éolienne dont la puissance est supérieure au MW, ce sont les éoliennes à vitesse variable qui se développeront à l'avenir pour cette gamme de puis, séance. La configuration à vitesse fixe peut être représentée d'une manière simplifiée par le schéma de la figure suivant. La chaîne de conversion de l'énergie éolienne est de la turbine, le multiplicateur de vitesse et de la génératrice.

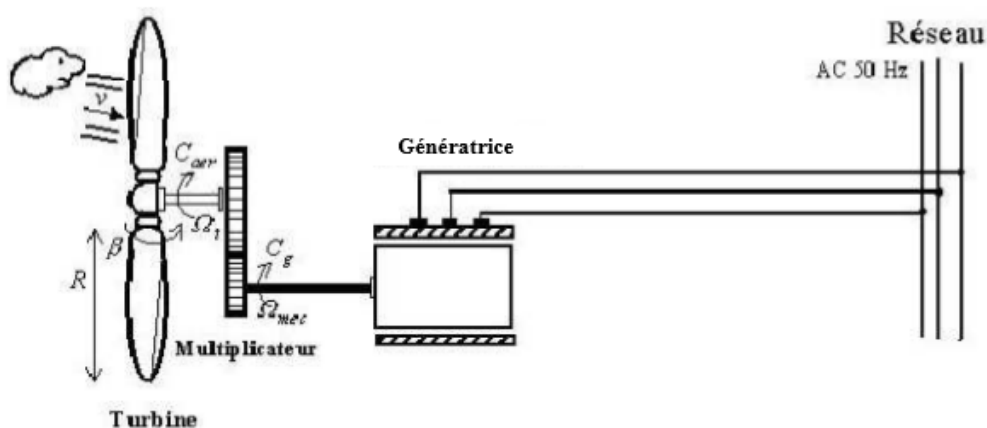
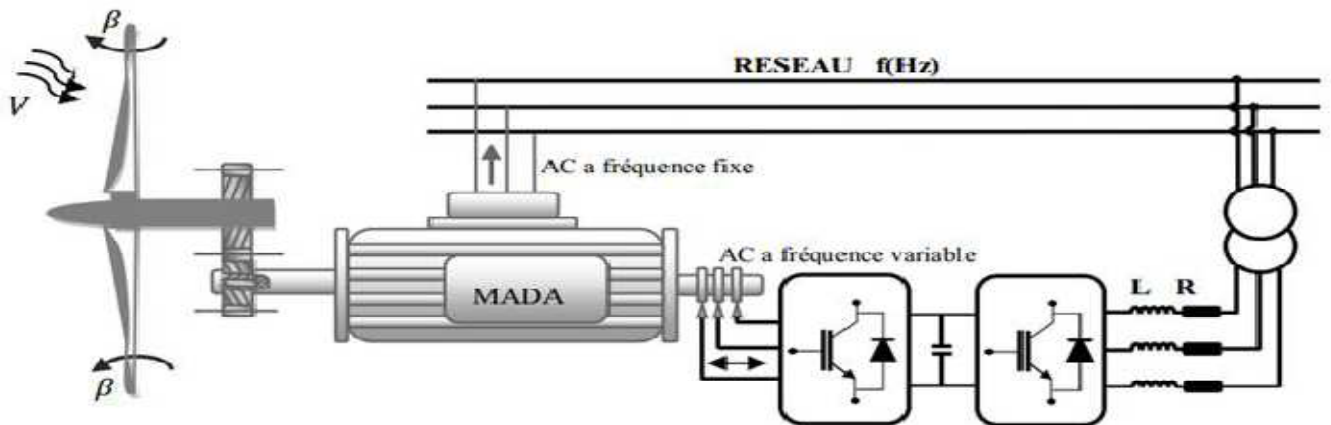


Figure I.11 : Eolienne à vitesse fixe

#### I.3.2 Les éoliennes à vitesse variable

La (Figure I.12) montre le deuxième cas. Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques

dues à l'orientation des pales, et limite la plage de vitesses de vent exploitable. Une interface de puissance adapte la fréquence des courants du générateur à celle du réseau et permet ainsi de fonctionner à vitesse variable [5] cela permet alors de maximiser la puissance extraite du vent. Mais dans ce cas, une connexion directe au réseau n'est plus possible à cause du caractère variable de la fréquence des tensions statoriques. Une interface d'électronique de puissance entre la génératrice et le réseau est alors nécessaire. Cette dernière est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue



**Figure. I.12.** Eolienne à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à cage.

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement, le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration. Les avantages principaux des deux types de fonctionnement sont les suivants

- **Fonctionnement à Vitesse fixe**

- Système électrique plus simple.
- Plus grande fiabilité.
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- Pas besoin de système électrique de commande.
- Moins cher.

- **Fonctionnement à vitesse variable**

- Augmentation du rendement énergétique.
- Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance.
- Réduction des efforts subis par le train de puissance.
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.
- Une exploitation optimale de l'énergie du vent.
- Une possibilité d'augmentation de la vitesse de rotation du rotor lors des rafales.

#### I.4 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne

##### I.4.1 Systèmes utilisant la machine synchrone

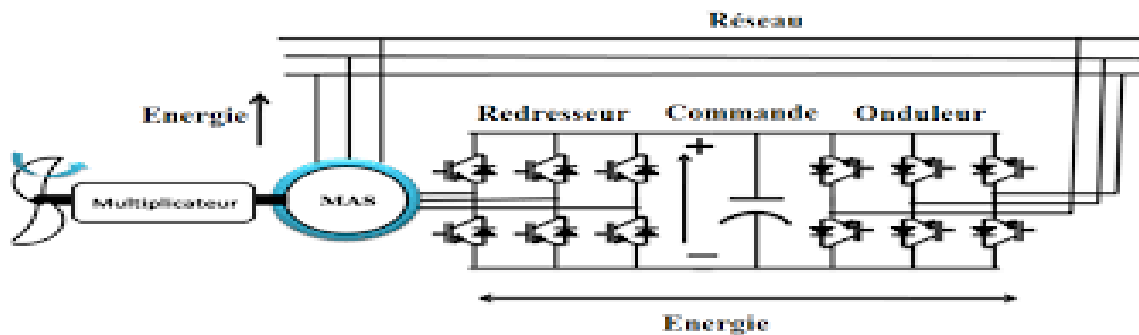
###### I.4.1.1 Alternateur synchrone à rotor bobiné ou à aimants

Dans une machine synchrone classique utilisée en alternateur, le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Ainsi, si l'alternateur est connecté au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous-multiple de la pulsation des courants statoriques. L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des



problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion. Pour ces raisons, on place systématiquement une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau (Figure I-12) ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation.

Dans la plupart des cas, le champ tournant rotorique est créé par un bobinage alimenté en courant continu (roue polaire) par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau. Ce mode d'excitation entraîne la présence de contacts glissants au rotor, c'est pourquoi on remplace souvent ce bobinage par des aimants permanents. Toutefois certains d'entre eux sont réalisés à l'aide de terres rares et sont par conséquent très coûteux, bien que leur utilisation de plus en plus fréquente tende à faire baisser leur prix. De plus, les variations importantes de couples électromagnétiques qui peuvent avoir lieu dans un système éolien risquent d'entraîner une démagnétisation des aimants lorsqu'ils sont constitués de matériaux classiques. Ceci contribue largement à la diminution de leur durée de vie



**Figure I.13** : Machine synchrone reliée au réseau par un dispositif redresseur –onduleur MLI

L'exemple de la Figure I.13 présente une configuration classique d'interface de connexion d'une machine synchrone au réseau. Le convertisseur connecté au stator de la machine est un simple redresseur puisqu'elle n'absorbe pas de puissance réactive, ce qui permet d'éviter les «  $dv/dt$  » importants sur les enroulements statoriques. Ce redresseur est classiquement suivi d'un hacheur élévateur permettant de délivrer une tension suffisante à l'onduleur MLI pour les faibles vitesses de rotation. La présence de l'onduleur MLI permet de contrôler le facteur de puissance coté réseau. Ces convertisseurs sont toutefois dimensionnés pour la totalité de la puissance nominale de la machine et entraînent jusqu'à 3% de cette puissance de pertes. Notons que l'utilisation de machines synchrones à faible vitesse (grand nombre de paire de pôles) permet de supprimer le multiplicateur de vitesse, pièce mécanique complexe entraînant des pertes et des pannes fréquentes mais l'augmentation du nombre de pôles implique une machine de très grand diamètre représentant un barrage important pour l'écoulement du vent.

#### I.4.1.2 Génératrice à aimants permanents à couplage Direct

La vitesse de rotation optimale de la turbine détermine la fréquence d'alimentation  $f_i$  de la génératrice synchrone.

Cette fréquence est produite par le convertisseur. On remarque que les deux convertisseurs doivent transformer toute la puissance produite par la turbine Figure « 1.15 ». Par conséquent,

ces convertisseurs sont plus gros que ceux utilisés avec une génératrice asynchrone adoube alimentation.

L'entraînement direct permet d'éviter la boîte de vitesses. Cependant, comme la vitesse de rotation est très basse, de l'ordre de 50tr/min, l'alternateur doit être beaucoup plus gros que s'il était conçu pour fonctionner, par exemple, à 1200 tr/min.

Par ailleurs, la génératrice à aimants permanents ne requiert pas de bagues ni de balais et les pertes Joules dans le rotor sont nulles. Globalement, même si la machine est plus grosse, les avantages de ce montage en font la technologie éolienne préférée pour générer les plus grandes puissances (2 MW à 5 MW).

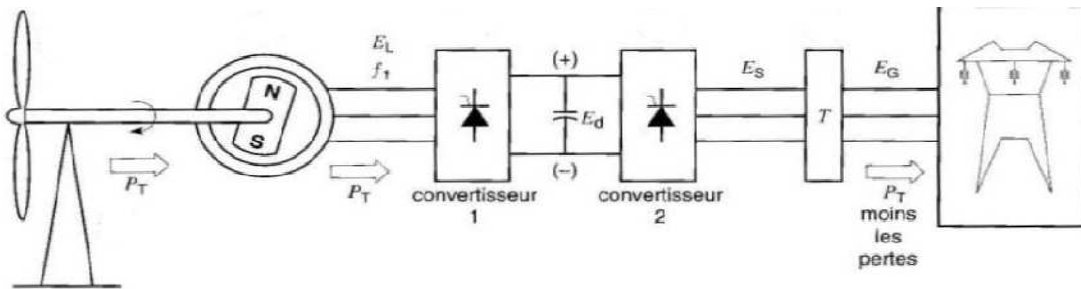


Figure I.14: Génératrice à aimants permanents à couplage Direct

#### I.4.2. Générateurs asynchrones

Dans le domaine de la génération d'énergie couplée au réseau, les **machines \*\*asynchrones à cage** dominent encore car elles offrent des performances attractives en terme de coût d'investissement, tout particulièrement dans les solutions de base où elles sont directement connectées au réseau. Mais lorsqu'il s'agit de réaliser un entraînement à vitesse variable, on leur préfère plutôt des **machines à rotor bobiné**

**\*\*doublement alimentées** qui offrent d'excellents compromis performances / coût.

La tension entre phases des machines est généralement 690 V et peut monter à 960 V en très forte puissance (ex. NEG Micon 2 MW). Le refroidissement du stator est à air ou liquide avec circulation par pompe.

#### I.4.3. Machines Asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation a été conçue pour fonctionner en moteur Sur une grande plage de variation de vitesse comme première application.

L'utilisation d'une MADA permet de varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotorique, ce dispositif sera donc économique quand on place les convertisseurs entre le rotor et le réseau en réduisant leurs tailles d'environ 70% Pour le fonctionnement de la MADA en génératrice, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse.

Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines Asynchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie Décentralisée

- Génération des réseaux de bord des navires ou des avions ;
- Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable ;
- Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable ;

– Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation du carburant

**I.5. Conclusion**

Ce chapitre représente une généralité sur les éoliennes d'une façon générale, nous avons commencé par définir les éoliennes, ensuite nous avons représenté les types des éoliennes (éolienne à axe vertical et éolienne à axe horizontal), et puis nous avons cité les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne les plus importants. Nous avons d'exprimé la conversion d'énergie cinétique du vent à une énergie électrique par des systèmes éoliennes on utilise le développement de théorie de Betz qui donne les performances d'un système éolienne avec un coefficient théorique de 0,59 maximum.

***CHAPITRE II***  
***MODÉLISATION ET COMMANDE***  
***VÉCTORIELLE DE LA GAD***

**II.1-INTRODUCTION**

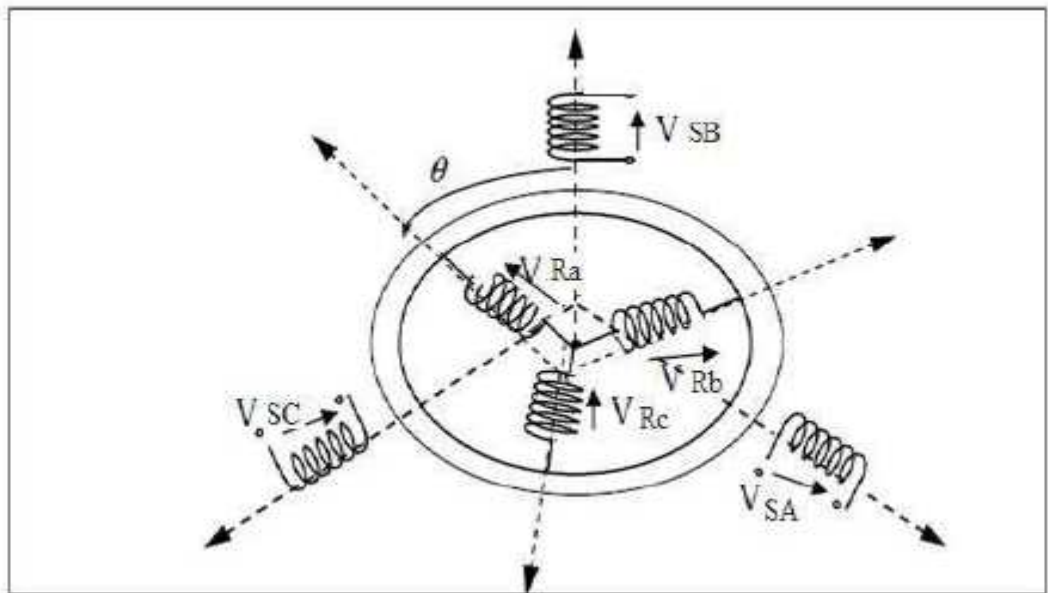
La commande vectorielle est l’une des techniques les plus utilisées pour la commande des machines électriques. Elle repose sur une loi de commande conduisant à une caractéristique de réglage similaire à celle d’une machine à courant continu à excitation séparée.

Le contrôle vectoriel de la GADA sera question de maîtriser les échanges d’énergie et notamment les transferts de puissances active et réactive envoyées sur le réseau. Pour le cas de ce travail, le référentiel (d, q) est calé sur le flux statorique. La commande concerne, bien entendu, les puissances renvoyées sur le réseau, donc du côté du stator (convention générateur) et par conséquent le rotor sera considéré comme un organe de commande (convention récepteur) [7].

Ce chapitre est consacré à la modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). Cette étape permet de comprendre le comportement dynamique et l’interaction électromécanique de la génératrice. Les résultats de cette modélisation seront réalisés par simulation. Est d’introduire des algorithmes de la commande vectorielle pour le contrôle des puissances active et réactive générées par la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA).

**II.2- Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation MADA**

La structure générale de la machine asynchrone doublement alimentée est composée de six enroulements dans l’espace électrique. Les axes statoriques sont décalés entre eux d’un angle (2 /3), ainsi que les axes rotoriques. L’angle  $\theta$  représente l’angle entre l’axe de la phase rotorique de référence  $r_b$  et l’axe fixe de la phase statorique de référence  $S_b$ . Les axes rotoriques tournant avec  $\omega_r$  par rapport aux axes statoriques fixes, sont représentés par la (figure II.1).



**Figure II.1 :** Représentation de la MADA dans le système triphasé.

**II.2.1- Représentation de la MADA dans le système triphasé (a, b, c)**

Les équations générales de la machine asynchrone à double alimentation dans un repère triphasé [36].

**❖ Equations électriques**

Par application de la loi de Faraday à chaque enroulement, on peut écrire :

$$\frac{d\phi}{dt} = V - R_i \tag{II. 1}$$

On applique cette relation sur l'enroulement triphasé du stator et de rotor on trouve[25]:

pour le stator :

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s I_{sa} + \frac{d\varphi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s I_{sb} + \frac{d\varphi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s I_{sc} + \frac{d\varphi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II. 2})$$

pour le rotor

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r I_{ra} + \frac{d\varphi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = R_r I_{rb} + \frac{d\varphi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = R_r I_{rc} + \frac{d\varphi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II. 3})$$

Sous former matricielle:

$$\begin{aligned} [V_s] &= [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \\ [V_r] &= [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \end{aligned} \quad (\text{II. 4})$$

Avec

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

#### ❖ Equations magnétiques

Les équations magnétiques sont données par les expressions suivantes :

$$\begin{bmatrix} \varphi_s \\ \varphi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (\text{II. 6})$$

Tel que :

$$[\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 7})$$

$$[I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 8})$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} [L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (\text{II. 9})$$

$$[M_{rs}]^t = [M_{sr}] = [M] = M_{sr} * \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

- $[L_s, L_r]$ : Inductance propre d'une phase statorique et rotorique,
- $[M_s, M_r]$ : Inductance mutuelle entre phases statoriques et rotoriques.
- $[L_s]$  : matrice d'inductances statoriques.
- $[L_r]$  : matrice d'inductances rotoriques.

[Msr] : matrice d'inductances mutuelles du couplage stator-rotor.

[Mrs] : matrice d'inductances mutuelles du couplage stator-rotor

[θ]: l'angle repère de l'axe d'une phase rotorique par rapport à l'axe fixe de la phase statorique.

❖ **Equations mécanique**

L'équation mécanique reflétant le mouvement de rotation de l'arbre du moteur électrique est donné par le couple électromagnétique [7].

$$C_{em} = \frac{1}{2} \cdot [I_s]^t \cdot \left[ \frac{d}{d\theta} \cdot [L] \right] \cdot [I_r] \tag{II.11}$$

Avec

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_s] & [M] \\ [M] & [L_r] \end{bmatrix} \tag{II.12}$$

Et

$$[I] = [I_{sa} I_{sb} I_{sc} I_{ra} I_{rb} I_{rc}]^t = \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \tag{II.13}$$

Les matrices [Ls] et [Lr] ne contiennent que des termes constants lorsque l'angle θ varie, cela permet de simplifier l'expression du couple soit:

$$C_{em} = \frac{1}{2} \cdot [I_s]^t \cdot \left[ \frac{d}{d\theta} \cdot [M] \right] \cdot [I_r] \tag{II.14}$$

On peut également exprimer le couple électromagnétique en fonction du couple résistant Cr créé par la charge mécanique du moteur, du moment d'inertie de toutes les parties tournantes et du coefficient de frottement visqueux f :

$$C_e = J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega - C_r \tag{II.15}$$

**II.2.2-Passage de triphasé au biphasé (Transformation de Park)**

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions et aux flux un changement de variable faisant intervenir l'angle entre l'axe d'une phase (Va) Statorique et le système d'axe (d, q), elle est définie par[25] :

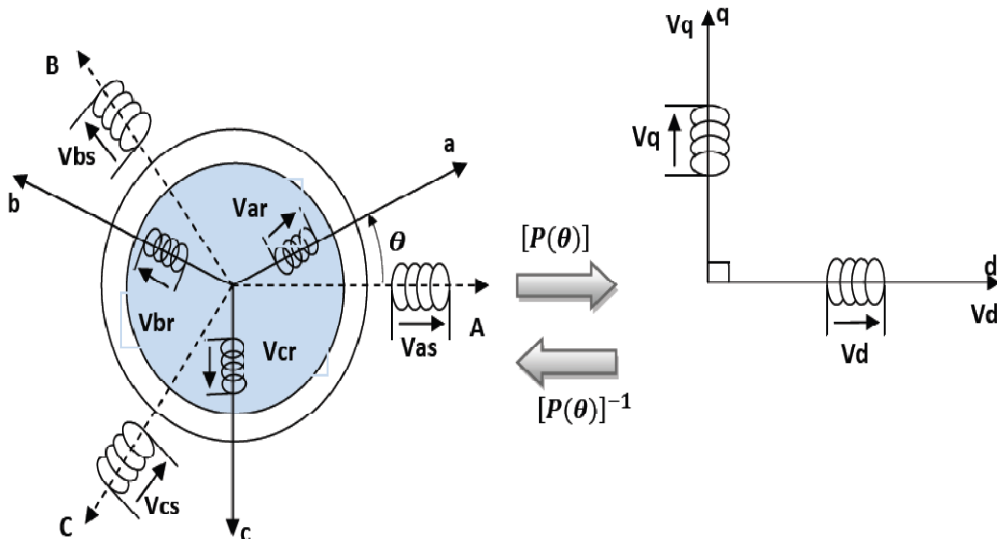


Figure II.2 : Passage du triphasé au biphasé et l'inverse

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \tag{II.16}$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin(\theta) & 1 \\ -\cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

### II.2.3-Application de la transformation de PARK

En appliquant la transformation de Park aux équations de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère quelconque (équations (II.2), (II. 3). Alors le modèle de la machine est obtenu en tenant compte des composantes homopolaires sous la forme suivante [25] :

$$[P(\theta)]^{-1}[V_d q_0] = [R][P(\theta)]^{-1}[I_d q_0] + \frac{d}{dt} [[P(\theta)] - 1[\varphi_d q_0]] \quad (\text{II. 18})$$

$$[P(\theta)] [V_d q_0] = [R][I_d q_0] + \left[ \frac{d}{dt} [P(\theta)] - 1[\varphi_d q_0] \right] \quad (\text{II. 19})$$

$$[[P(\theta)]] \left[ \frac{d}{dt} [P(\theta)]^{-1} \right] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \left[ \frac{d\theta}{dt} \right] \quad (\text{II. 20})$$

Tel que :

$\theta = \theta_s$  pour les grandeurs statoriques

$\theta = \theta_s - \theta_r$  pour les grandeurs rotoriques

En remplaçant la relation (II. 20) dans (II. 19) on obtient le modèle biphasé équivalent suivant[25] :

$$\begin{cases} V_d = R_{id} + \frac{d\varphi_d}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \varphi_q \\ V_q = R_{iq} + \frac{d\varphi_q}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \varphi_d \\ V_0 = R_{i0} + \frac{d\varphi_0}{dt} \end{cases} \quad (\text{II. 21})$$

### II.2.4-Représentation de la MADA dans un repère biphasé (dq)

En multipliant les systèmes des équations (II. 4) par la matrice de Park, on obtient[40] [25]

**Equation électriques:**

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} + \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II. 22})$$

**Equations magnétiques**

Les flux statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II. 23})$$

23)

Les angles de Park relatifs aux grandeurs statoriques et rotoriques sont liés, d'après la (figure II. 4), par la relation[25]:

$$\theta_s = \theta_e + \theta_r \quad (\text{II. 24})$$



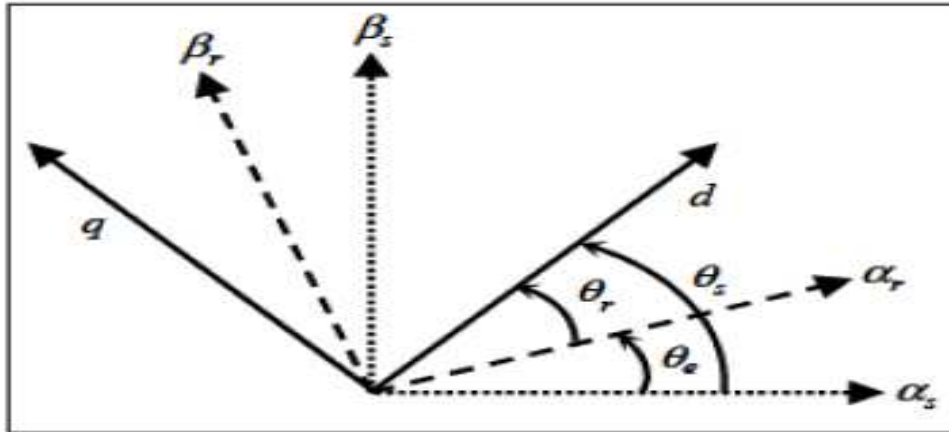


Figure II.3: Angles de Park des grandeurs statoriques et rotoriques

**Equation mécanique**

$$C_{em} = \frac{P_m}{\Omega_s}; \Omega_s = \frac{\omega_s}{p}; C_{em} = p \frac{P_m}{\omega_s} \tag{II. 25}$$

Le couple électromagnétique  $C_{em}$  peut être exprimé, à partir des flux et des courants statoriques, par :

$$C_{em} = P(I_{sd}\varphi_{sd} - I_{sq}\varphi_{sq}) \tag{II. 26}$$

En remplaçant les flux par leurs expressions données par les relations (II. 23) on peut établir d'autres expressions pour le couple :

$$C_{em} = P(I_{rq}\varphi_{rd} - I_{rd}\varphi_{rq}) \tag{II. 27}$$

$$C_{em} = P \cdot M(I_{sq}I_{rd} - I_{rq}I_{sd}) \tag{II. 28}$$

$$C_{em} = P \frac{M}{L_r}(I_{rd}\varphi_{sq} - I_{rq}\varphi_{sd}) \tag{II. 29}$$

$$C_{em} = P \frac{M}{L_r}(\varphi_{rd}I_{sq} - I_{sd}\varphi_{rq}) \tag{II. 30}$$

En appliquant les relations fondamentales de la dynamique à la machine, l'équation mécanique est[25]:

$$\frac{J}{p} \frac{d(\omega_r)}{dt} = C_e - C_r - C_f \tag{II. 31}$$

J : moment d'inertie des parties tournantes (du moteur avec la charge).

$C_e$  : couple résistant.

$C_f$ : couple de frottement.

$$C_e = J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega - C_r \tag{II. 32}$$

**II.3-Modèle de la machine en représentation d'état**

La représentation d'état de la MADA dépend du repère et du choix des variables d'état pour les équations électriques. On écrit les équations dans le repère (d, q) car c'est la solution la plus générale[40].

Le choix des variables d'état, dépend des objectifs soit pour la commande soit pour l'observation. On choisit pour notre cas le vecteur d'état suivant  $[I_{sq}; I_{sd}; \varphi_{rd}; \varphi_{rq}]^T$

On écrit le modèle de la machine utilisée pour la commande sous forme d'un système d'équations d'état :

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = AX + BU \\ Y = CX \end{cases} \quad (\text{II. 33})$$

Avec

X: vecteur d'état du système.

A : matrice d'état du système.

B : matrice de commande.

U : vecteur de commande  $[V_{sd} V_{sq} V_{rd} V_{rq}]^T$ .

Y : vecteur de sortie.

C : matrice d'observation.

On déduit les équations des courants rotorique à partir des équations du flux rotoriques[40] [25].

$$\begin{cases} I_{rd} = \frac{1}{L_r} \varphi_{rd} - \frac{M}{L_r} I_{sd} \\ I_{rq} = \frac{1}{L_r} \varphi_{rq} - \frac{M}{L_s} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

On remplace les courants rotoriques dans les équations des flux statoriques (II. 23) on obtient:

$$\begin{cases} I_{rd} = L_s \sigma I_{sd} + \frac{M}{L_r} \varphi_{rd} \\ I_{rq} = L_s \sigma I_{sq} + \frac{M}{L_r} \varphi_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

Avec:

$$\sigma = \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r}\right) \quad (\text{II. 36})$$

En remplaçant  $\varphi_{sq}$  et  $\varphi_{sd}$  en fonction de  $I_{rd}$  et  $I_{rq}$  dans les équations des tensions statoriques (II. 22), on aboutit aux équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + L_s \sigma \frac{dI_{sd}}{dt} + \frac{M}{L_r} \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_s (L_s \sigma I_{sq} + \frac{M}{L_r} \varphi_{rq}) \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + L_s \sigma \frac{dI_{sq}}{dt} + \frac{M}{L_r} \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_s (L_s \sigma I_{sd} + \frac{M}{L_r} \varphi_{rd}) \end{cases} \quad (\text{II. 37})$$

On détermine la dérivée de flux rotorique à partir les équations des tensions rotoriques (II. 22) :

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{rd}}{dt} = V_{rd} - R_r I_{rd} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{rq} \\ \frac{d\varphi_{rq}}{dt} = V_{rq} - R_r I_{rq} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II. 38})$$

On remplace les deux courants rotorique (II. 34) dans les équations des dérivées du flux rotoriques (II. 38) on trouve :

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{rd}}{dt} = V_{rd} - \frac{R_r}{L_r} \varphi_{rd} + \frac{MR_r}{L_r} I_{sd} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{rq} \\ \frac{d\varphi_{rq}}{dt} = V_{rq} - \frac{R_r}{L_r} \varphi_{rd} + \frac{MR_r}{L_r} I_{sq} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II. 39})$$

On remplace le dernier système d'équation dans le système d'équation des tensions statoriques (II. 37) on trouve :

$$\begin{cases} \frac{dI_{sd}}{dt} = -\gamma I_{sd} + \omega_s I_{sq} + \frac{k}{T_r} \varphi_{rd} + k\omega_r \varphi_{rq} + \frac{1}{L_s \sigma} V_{sd} - kV_{rd} \\ \frac{dI_{sq}}{dt} = -\gamma I_{sq} - \omega_s I_{sd} + \frac{k}{T_r} \varphi_{rq} - k\omega_r \varphi_{rd} + \frac{1}{L_s \sigma} V_{sq} - kV_{rq} \end{cases} \quad (\text{II. 40})$$

Et

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{rd}}{dt} = -\frac{1}{T_r} \varphi_{rd} + \frac{M}{T_r} I_{sd} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{rq} + V_{rd} \\ \frac{d\varphi_{rq}}{dt} = -\frac{1}{T_r} \varphi_{rq} + \frac{M}{T_r} I_{sq} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{rd} + V_{rq} \end{cases} \quad (\text{II. 41})$$

Avec

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{R_s}{L_s} = \frac{1}{T_s} \\ \frac{R_r}{L_r} = \frac{1}{T_r} \\ K = \frac{M}{L_r L_s \sigma} \\ \gamma = \frac{1}{T_s \sigma} + \frac{MK}{T_r} \end{array} \right. \quad (II.42)$$

L'équation mécanique régissant la partie tournante de la machine est donnée par[40] [25]

$$C_{em} = \frac{3}{2} P \frac{M}{L_r} (I_{sd} \varphi_{rd} - I_{sq} \varphi_{rq}) \quad (II.43)$$

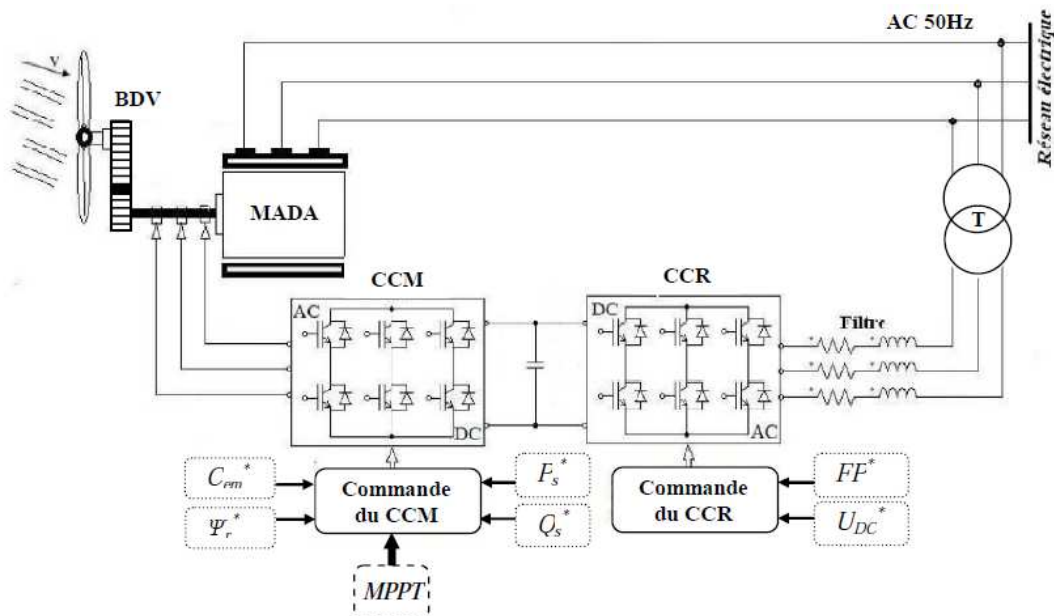
**II.4- Modélisation des convertisseurs statiques**

L'avantage principal de l'utilisation de la MADA dans les éoliennes est la possibilité de travailler à vitesse variable, cela grâce à la chaîne du rotor constituée d'un redresseur et d'un onduleur liés directement au rotor de la génératrice.

Cette configuration permet un contrôle des grandeurs de sortie comme la puissance active liée à la vitesse de rotation de l'éolienne et la puissance réactive. Le convertisseur n'étant pas sur le chemin principal du flux de puissance, il est dimensionné au voisinage de 25% de la puissance nominale.

Le concevoir des stratégies de commande d'un système de Conversion éolien, connecté au réseau reposant sur une MADA pilotée par le rotor via deux convertisseurs à MLI, réversibles (un côté rotor CCM et l'autre côté réseau CCR) en mode back to- back, réalisant l'interface électrique entre le rotor de la machine et le réseau (figure II. 4).

Comme l'indique la (figure II. 4), le stator de la génératrice est directement connecté au réseau alors que son rotor est alimenté par le réseau via deux convertisseurs statiques permettant le redressement et l'ondulation de la tension



**Figure II.4-** La structure AC-DC-AC (en anglais « back-to-back »).

Pour assurer à l'onduleur une tension continue stable, on crée un bus intermédiaire de tension continue. Celui-ci est géré par un redresseur alimenté à travers un transformateur par le système triphasé du réseau électrique supposé symétrique avec des tensions à amplitude et fréquence et constantes. Après le redressement un étage de filtrage est nécessaire afin de stabiliser la tension.

La commande du convertisseur statique branché au réseau « CCR » consiste à réguler le bus continu intermédiaire quel que soit la puissance générée par le système de conversion sous fréquence variable, tout en assurant un facteur de puissance unitaire du côté alternatif. Tandis que, le convertisseur statique branché au rotor de la MADA « CCM » est utilisé pour la gestion des puissances actives et réactives de la machine.

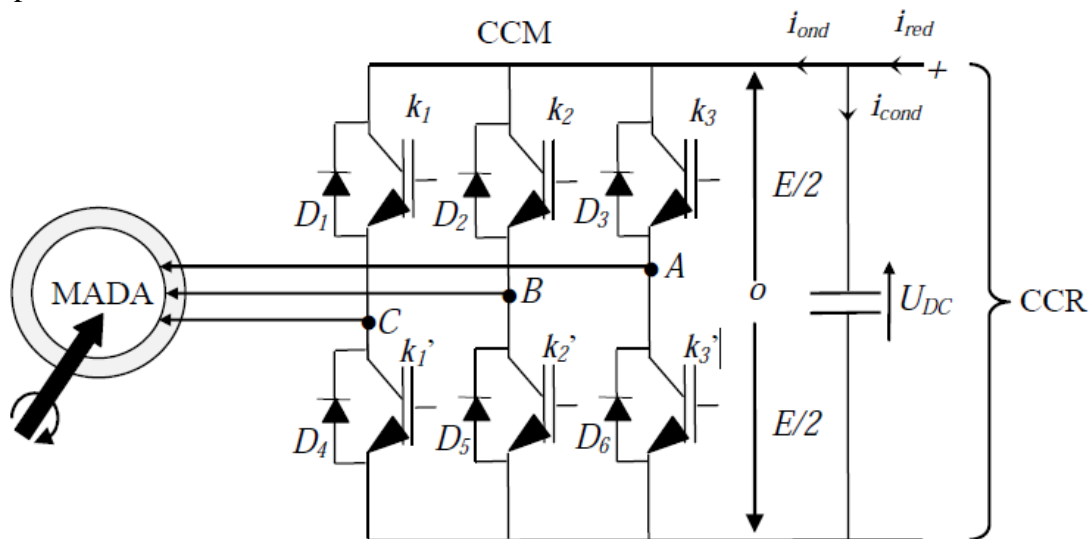
Dans notre étude, nous nous intéressons à la commande du « CCM » dont le principe est illustré par la partie suivante.

**II.4.1 - Modélisation du convertisseur côté rotor « CCM »**

L'onduleur de tension représente aujourd'hui un composant essentiel dans les systèmes d'interface avec le réseau. Son utilisation vient du fait qu'il permet entre autre de contrôler les puissances actives et réactives échangées avec le réseau. Il peut être utilisé en mode onduleur ou en mode redresseur mais la modélisation reste la même dans les deux cas.

Dans cette partie, nous nous intéressons à la modélisation du convertisseur coté machine « CCM ». Pour un fonctionnement hypo synchrone de la MADA, le « CCM » fonctionnera comme un onduleur. Ce convertisseur est le coeur du système d'alimentation, il est formé de trois bras indépendants portant chacun deux interrupteurs, possédant comme objectif principal la bidirectionnalité du passage de la puissance permettant à la MADA le fonctionnement en deux régimes hypo et hyper-synchrone.

Le schéma de principe de l'onduleur triphasé à deux niveaux de tension monté en pont alimentant le rotor de la MADA est donné par la (figure II.5). Il s'agit d'un onduleur triphasé idéal à deux niveaux de tension, modélisé par six interrupteurs parfaits à commutation instantanée et à chute de tension négligeable aux bornes, avec des commandes complémentaires.



**Figure II.5-** schématique d'un onduleur de tension alimente le rotor de la MADA.

Les couples d'interrupteurs ( $k_1$  et  $k_1'$ ), ( $k_2$  et  $k_2'$ ), ( $k_3$  et  $k_3'$ ) doivent être commandés de manière complémentaire pour assurer la continuité des courants alternatifs dans la charge d'une part et d'éviter le court-circuit de la source d'autre part. Les diodes ( $D_i$  ( $i=1, 2, \dots, 6$ )) sont des diodes à roue libre assurant la protection des interrupteurs.

Les différents interrupteurs sont supposés parfaits, c'est-à-dire que les phénomènes dus à la commutation sont négligés. Nous pouvons remplacer les bras de l'onduleur par un interrupteur à deux positions modélisées par une fonction logique décrit l'état de chaque interrupteur, sa valeur vaut 1 si l'interrupteur est fermé, et 0 s'il est ouvert (figure II.6).

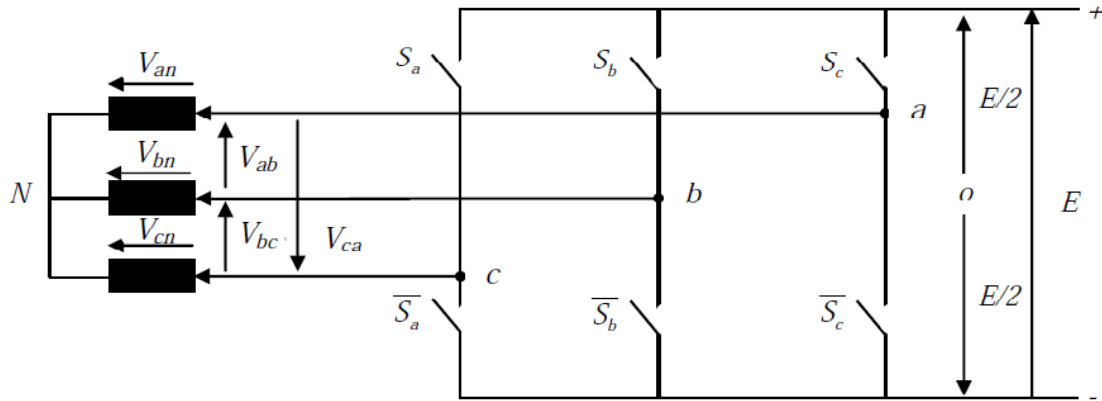


Figure II.6 - Schéma simplifié de l'onduleur triphasé.

L'état des interrupteurs, supposés parfaits peut être défini par trois grandeurs booléennes de commande  $s_j$  ( $j= a, b, c$ ) :

$s_j=1$ , Le cas où l'interrupteur de haut est fermé et celui d'en bas ouvert.

$s_j=0$ , Le cas où l'interrupteur de haut est ouvert et celui d'en bas fermé.

Dans ces conditions on peut écrire les tensions de phases  $V_{jn,a,b,c}$  en fonction des signaux de commande  $s_j$

$$V_{jn,a,b,c} = s_j U_{DC} - \frac{U_{DC}}{2} \quad (II.44)$$

Avec:  $U_{DC}=E$

Les trois tensions composées  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  et  $V_{ca}$  sont définies par les relations suivantes en tenant compte du point fictif « o ».

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (II.45)$$

Soit « n » le point neutre du coté alternatif (MADA), alors on a :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (II.46)$$

La charge est considérée équilibrer, il l'en résulte :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (II.47)$$

La substitution de (II. 46) dans (II. 45) nous donne :

$$V_{no} = 1/3(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (II.48)$$

En remplaçant (II. 48) dans (II. 46) on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases}$$

L'utilisation de l'expression (II. 45) permet d'établir les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{U_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (II.49)$$

Avec :  $V_{ao}$ ,  $V_{bo}$ ,  $V_{co}$  sont les tensions d'entrée de l'onduleur (valeurs continues), et si  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$ ,  $V_{cn}$  sont les tensions de sortie de cet onduleur, par conséquent l'onduleur est modélisé par la matrice du transfert  $T$  donnée par

$$T = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 50})$$

#### II.4.2 - Choix de structure des semi-conducteurs

Les semi-conducteurs les plus couramment utilisés pour réaliser les interrupteurs sont les transistors de puissance (MOSFET, IGBT, Bipolaires) et les thyristors rapides (principalement les GTO).

Les progrès technologiques accomplis dans le domaine des transistors de grandes puissances permettent maintenant de réaliser des onduleurs de forts courant et tension.

L'expérience a montré que l'utilisation des transistors pour la commutation de grandes puissances est assez aisée. Cependant, pour un thyristor, un circuit auxiliaire peut engendrer des conséquences néfastes, surtout s'il comporte lui-même un thyristor sur le circuit de commande :

- Faible vitesse de commutation ;
- Pertes calorifiques élevées ;
- Bruits acoustiques générés sur l'inductance de commutation ;
- Encombrement

Le transistor évite bien ces inconvénients, en plus de ses possibilités à fonctionner à fréquence de commutation élevée. Toutefois, pour les faibles et moyennes puissances, il est préférable d'envisager une technologie à transistors plutôt qu'à thyristors malgré toutes les contraintes qui peuvent découler (fréquence de commutation, circuit d'aide à la commutation, tenue en tension, etc...), moyennant quelques précautions ; en l'occurrence, la surveillance des pertes en puissance dans les transistors aussi bien en conduction qu'en commutation et veiller à leur bon refroidissement.

Tandis que pour les puissances supérieures, le thyristor GTO semble être mieux adapté, si nous prenons en considération certaines analogies vis-à-vis du transistor, qui se favorise, par rapport au thyristor classique, de l'élimination des circuits d'extinction forcée.

#### II.5- Modélisation de la turbine éolienne

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site[18].

##### II.5.1- Loi de BETZ

La théorie du moteur éolien à axe horizontal a été établie par BETZ. Il suppose que « Le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse  $V_1$  et à l'infini aval d'une vitesse  $V_2$  »

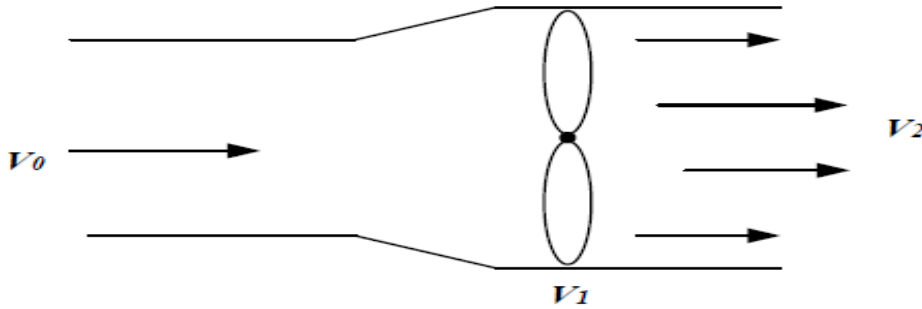


Figure II.7-Schéma de principe de la théorie de Betz

En appliquant la conservation de masse au cas de la (figure II. 7):

$$V_0 S_0 = V_1 S_1 = V_2 S_2 \tag{II.51}$$

On considère par la suite que  $V_1 = V$  et  $S_1 = S$

La force de portance au rotor de la turbine est donnée par :

$$F = \rho S_0 V_0^2 - \rho S_2 V_2^2 \tag{II.52}$$

Telle  $\rho$  qu'est la densité de l'air ( $1.22 \text{ kg/m}^3$ ) pour une pression atmosphérique à 150C).

En tenant compte de l'équation (II. 51), nous aurons :

$$F = \rho S V (V_0 - V_2) \tag{II.53}$$

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne  $V_0$  et la vitesse du vent après passage à travers le rotor  $V_2$  soit :

$$V = \frac{V_0 + V_2}{2} \tag{II.54}$$

On définit le facteur fractionnaire de diminution dans la vitesse du vent entre la position 0 et la position 1 par :

$$\alpha = \frac{V_0 + V}{2} \tag{II.55}$$

En tenant compte des équations (II.51) et (II.52), l'équation (II.53) devient

$$F = \frac{1}{2} \rho S V_0^2 4\alpha(1 - \alpha) \tag{II.56}$$

La puissance extraite du vent par le rotor est le produit de la portance et la vitesse du vent au plan du rotor  $V$ :

$$P_{aer} = FV = \frac{1}{2} \rho S V_0^3 4\alpha(1 - \alpha)^2 \tag{II. 57}$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface sans diminution de vitesse, soit à la vitesse  $V_0$ , la puissance correspondante serait alors :

$$P = \frac{1}{2} \rho S V_0^3 \tag{II.58}$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$C_p = \frac{P}{P_{aer}} = 4\alpha(1 - \alpha)^2 \tag{II.59}$$

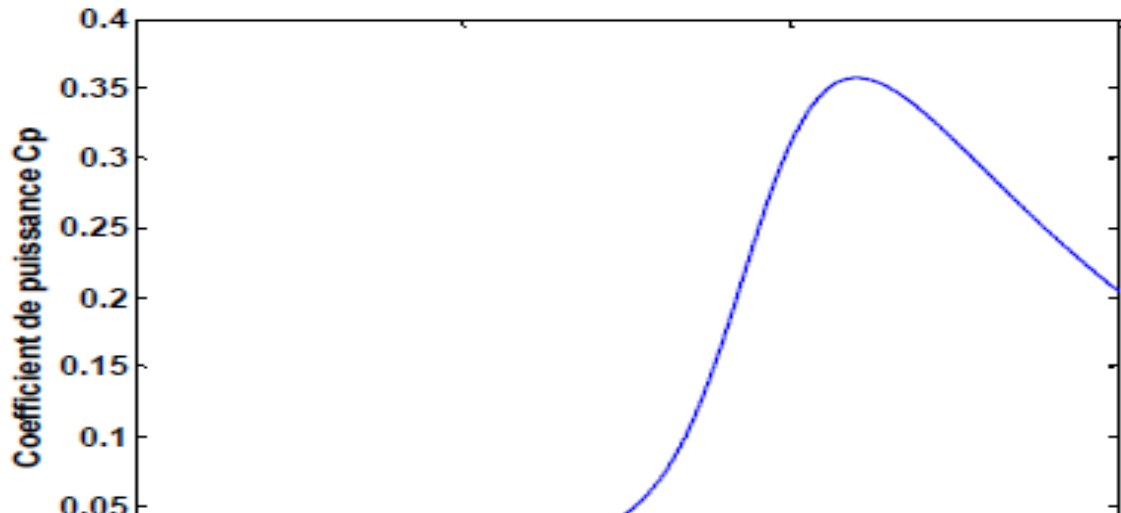
La valeur théorique maximale de  $C_p$  est donnée par la limite de Betz, elle est obtenue en dérivant l'équation (II. 59) par rapport à  $\alpha$  :

$$\frac{\partial C_p}{\partial \alpha} = 3\alpha^2 - 4\alpha + 1 = 0 \rightarrow \alpha = \frac{1}{3} \tag{II. 60}$$

En remplaçant  $\alpha$  dans l'équation (II. 59), on trouve :

$$C_{Pmax} = \frac{16}{27} \approx 0.59 \tag{II. 61}$$

$C_p$  est appelé coefficient de puissance (figure II. 8).



**Figure II.8-**Coefficient aérodynamique de puissance

C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent et de l'angle de l'orientation de la pale  $\beta$ .

L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne.

L'identification du coefficient de puissance est présentée dans avec la méthode de Newton Raphson. En pratique, on atteint des valeurs de 0.45 à 0.5 pour les meilleures éoliennes actuelles. A partir de relevés réalisés sur une éolienne l'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour ce type de turbine, par l'équation suivante[39]

$$Cp(\lambda, \beta) = 0.5 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0068 \lambda \quad (\text{II. 62})$$

$$\frac{116}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (\text{II. 63})$$

Le couple exerce par le vent sur l'arbre de la turbine (ou couple mécanique a la sortie de la turbine) est défini par :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_c(\lambda, \beta) \quad (\text{II. 64})$$

Ou  $C_c$  représente le coefficient du couple :

$$C_c = \frac{C_p}{\lambda} \quad (\text{II. 65})$$

Le coefficient de puissance augmente chaque fois que le ratio de vitesses  $\lambda$  augmente jusqu'à une valeur maximale puis il se diminue et on remarque que  $C_p$  peut prendre une valeur négative qui provoque une inversion de l'écoulement de puissance sur l'arbre de la turbine ceci signifie qu'à partir d'une certaine vitesse de rotation de la turbine, et pour une vitesse de vent donnée, la turbine s'écarte en mode "propulsion" et fonctionne comme un ventilateur.



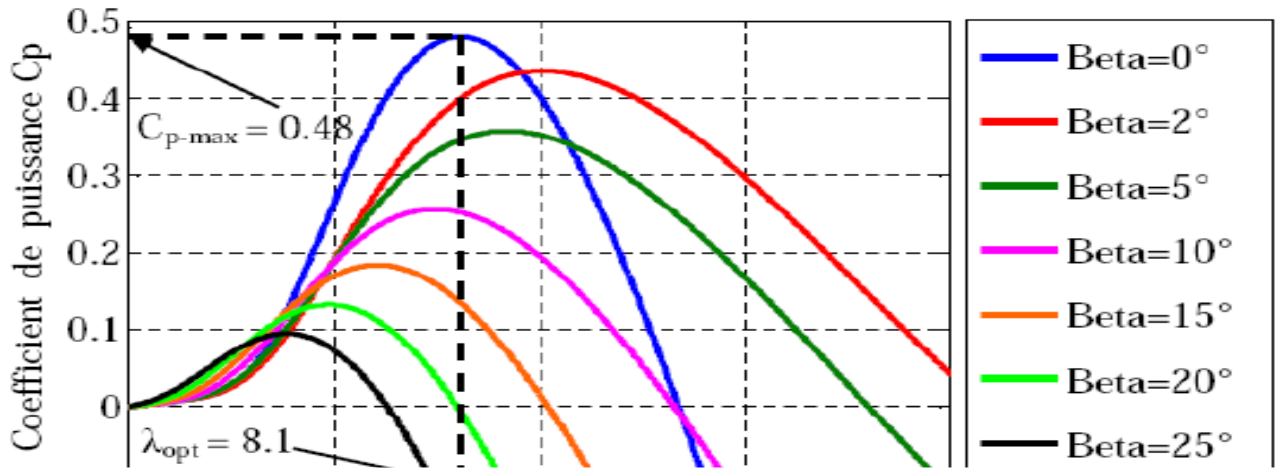


Figure II.9-L'évolution coefficient de puissance Cp

On remarque d'après la (Figure II.9) que pour chaque angle de calage  $\beta$  il existe une valeur maximale du coefficient Cp pour un ratio de vitesses  $\lambda$  optimal. Par exemple pour un angle de calage  $\beta = 0^\circ$  coefficient Cp passe par un maximum  $Cp_{max} = 0.48$  et une valeur du ratio de vitesse optimal  $\lambda_{opt} = 8,1$ .

**II.5.2 Modèle de la partie mécanique**

La(Figure II.10) représente le modèle mécanique de la turbine éolienne qui est constituée de trois pales de longueur R. Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse de rotation  $\Omega_t$  et relie à un multiplicateur de gain G, qui entraîne la génératrice électrique à une vitesse  $\Omega_g$ [10].

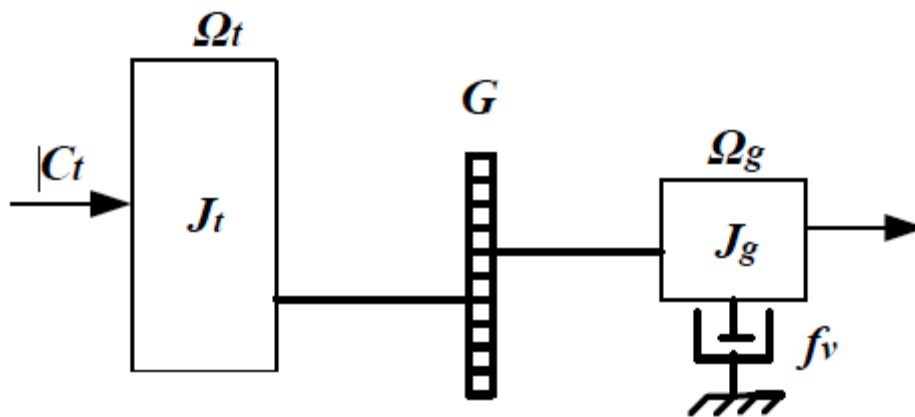


Figure II.10-Modèle mécanique de la turbine éolienne

Avec :

$J_t$ : Le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des 3 pales de l'éolienne.

$J_g$ : Le moment d'inertie de la génératrice,

$f_v$ : Le coefficient du aux frottements visqueux de la génératrice,

$C_g$ : Le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice après multiplicateur,

$\Omega_g$ : La vitesse de rotation de la génératrice,

G : Le gain du multiplicateur de vitesse.

Le multiplicateur raccorde l'arbre lent et adapte sa vitesse de rotation de la turbine à la vitesse de rotation de la génératrice (arbre rapide). Ce multiplicateur est décrit par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_t}{G} \tag{II.66}$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_g}{G} \tag{II.67}$$

D'après la, (figure II.11) on peut écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la génératrice par :

$$\left(\frac{C_t}{G^2} + J_g\right) \frac{d\Omega_g}{dt} + f_v \Omega_g = C_g - C_{em} \tag{II.68}$$

Avec  $C_{em}$  le couple électromagnétique de la génératrice.

Le schéma bloc de la( figure II.11)représente le modèle mathématique. Ce schéma bloc montre que la vitesse de rotation  $\Omega_g$ de la génératrice, donc de la turbine, peut être contrôlée par action soit sur l'angle de calage des pales  $\beta$ , soit sur le couple électromagnétique  $C_{em}$  de la génératrice. La vitesse du vent  $V_v$ est considérée comme une entrée perturbatrice au système

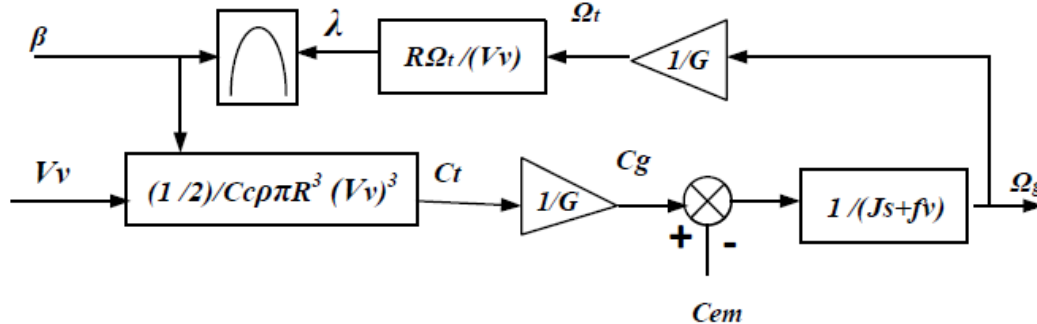


Figure II.11-Schéma bloc du modèle de la turbine

## II.6-commande vectorielle de la GADA

### II.6.1-principe de la commande vectorielle de la GADA

L'objectif principal de la commande vectorielle des machines à courant alternatif est d'améliorer leur comportement statique et dynamique, grâce à une structure de contrôle similaire à celle d'une machine à courant continu.

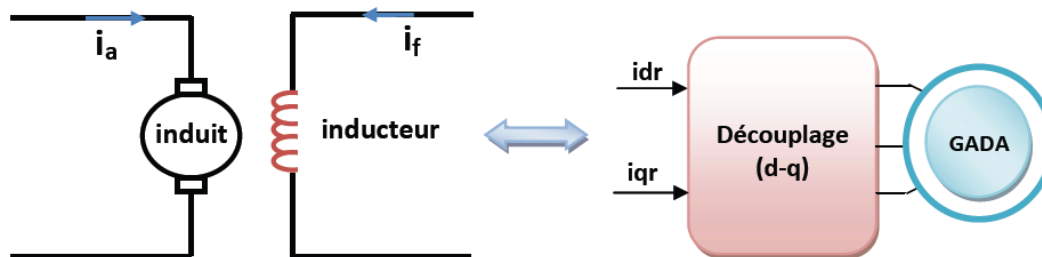


Figure II.12: Principe de la commande vectorielle.

### II.6.2-Les types de la commande vectorielle :

#### II.6.2.1-La commande vectorielle directe

la connaissance du module de flux et de sa phase est requise pour assurer un découplage entre le couple et le flux quel que soit le régime transitoire effectué. En effet, le flux est régulé par une contre réaction, donc il doit être mesuré ou estimé à partir des signaux de tensions statoriques et de courants. Afin d'accéder à l'information concernant l'amplitude et la phase du flux, on peut utiliser des capteurs (sondes à effet de Hall, spires de mesure) placés sous les dents du stator (entrefer de la machine).

L'avantage de cette technique est qu'elle dépend moins des variations paramétriques. Cependant, l'inconvénient de cette méthode est que les capteurs sont mécaniquement fragiles et ne peuvent pas travailler dans des conditions sévères telles que les vibrations et les échauffements excessifs. De plus, les signaux captés sont entachés d'harmoniques et leur fréquence varie avec la vitesse ce qui nécessite des filtres ajustables automatiquement[31],[40].

**II.6.2.2-La commande vectorielle indirecte :**

Cette commande est basée sur le principe à ne pas mesurer (ou estimer) l'amplitude du flux mais seulement sa position. Elle consiste à estimer la position du vecteur du flux, et de régler son amplitude en boucle ouverte. Les tensions ou les courants assurant l'orientation du flux et le découplage sont évalués à partir d'un modèle de la machine en régime transitoire.

**II.7-Modèle de la CADA avec orientation du flux statorique :**

Dans ce qui suit nous allons supposer que l'axe *d* du repère de Park est orienté suivant le flux statorique. Ce choix n'est pas au hasard mais il se justifie par le fait que la machine est souvent couplée à un réseau puissant de tension et de fréquence constante, ce qui entraîne un flux constat au stator de la machine [13] [8]

Nous allons donc nous contenter de rappeler le modèle diphasé de la machine asynchrone dans le référentiel (*d, q*)lié au champ tournant que nous comptons utiliser par la suite pour la commande de la CADA :

❖ **Equation électriques:**

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} + \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (II.22)$$

❖ **Equations magnétiques**

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (II.23)$$

Le couple électromagnétique est donné par la relation suivante :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_r} (\varphi_{rd} I_{sq} - I_{sd} \varphi_{rq}) \quad (II.69)$$

**II.8- Relation entre courants statoriques et courants rotoriques**

Dans ce paragraphe, nous considérons que la GADA fonctionne en mode hyper- synchrone, ce qui permet un transfert optimal de puissance en utilisant la commande vectorielle avec orientation du flux statorique. A cet effet nous allons, donc déterminer les équations qui lient les puissances actives et réactives statoriques aux grandeurs rotoriques sur lesquelles nous agissons pour commander la machine. Il s'agit d'obtenir un certain découplage entre le stator et le rotor afin que l'expression du couple soit similaire à celle du couple de la machine à courant continu. Le principe consiste à orienter le flux statorique suivant l'axe *d* du référentiel tournant (figure II.5).

On a donc :  $\varphi_{sq} = 0$  et par suite  $\varphi_{sd} = \varphi_s$

Pour les machines de moyenne et forte puissance utilisées dans les éoliennes, on peut de façon légitime négliger la résistance statorique  $R_s$  tout en considérant le flux statorique constant.

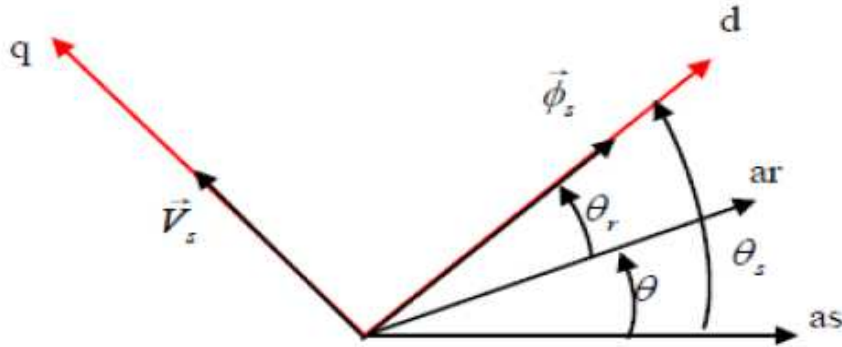


Figure II.13: Orientation du flux statorique[8] .

Dans l'hypothèse où le flux  $\varphi_{sd}$  est maintenu constant (ce qui est assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator). Le choix de ce repère rend le couple électromagnétique produit par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendant du courant rotorique d'axe q.

L'expression du couple électromagnétique devient alors :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_s} (\varphi_{sd} I_{rq}) \tag{II.70}$$

En utilisant les simplifications ci-dessus, nous pouvons simplifier les équations des tensions et des flux statoriques comme suit :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \varphi_s \end{cases} \tag{II.71}$$

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \varphi_s = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = 0 = L_s I_{sq} + M I_{rq} \end{cases} \tag{II.72}$$

A partir des équations (II.72), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques:

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{rd} \\ I_{sq} = -\frac{M}{L_s} I_{rq} \end{cases} \tag{II.73}$$

### II.9-Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent:

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} + V_{sd} I_{sq} \end{cases} \tag{II.74}$$

L'adaptation de ces équations au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ( $V_{sd}=0$ ) donne:

$$\begin{cases} P_s = V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} \end{cases} \tag{II.75}$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (II.73) dans l'équation (II.75) nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive:

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = V_s \frac{\varphi_s}{L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \tag{II.76}$$

En tirant  $\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$  de l'équation (II.71), l'expression de la puissance réactive devient :

$$Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{M V_s}{L_s} I_{rd} \tag{II.77}$$

**II.10-Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques :**

On pourrait exprimer les tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques, en remplaçant dans l'équation (II.22) les valeurs des courants statoriques de l'équation (II.73) et en remplaçant le résultat ainsi obtenu dans l'équation (II.78). Ainsi, nous obtenons :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rd}}{dt} - g \cdot \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rq}}{dt} + g \cdot \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \cdot \omega_s \cdot \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \tag{II.78}$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire [35]:

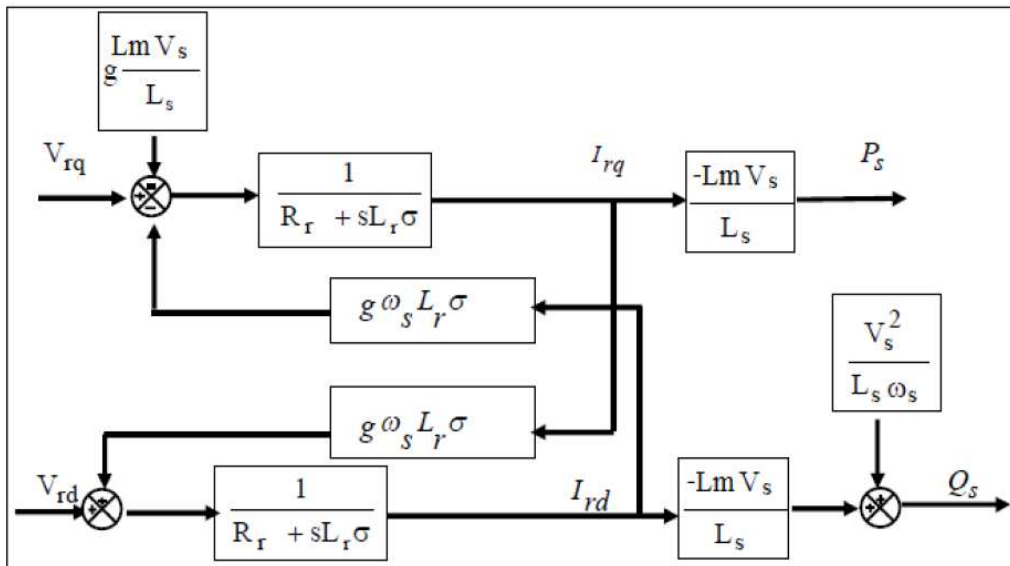
$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \cdot \omega_s \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \tag{II.79}$$

Où (g) correspond au glissement de la machine asynchrone.

$V_{rd}$  et  $V_{rq}$  sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus. L'influence des termes de couplage entre les deux axes en  $\left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$  est minime. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser.

En revanche le terme  $g \cdot \frac{M V_s}{L_s}$  représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de traînage. Le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur [17].

Les équations (II.76), (II.77) et (II.79) nous permettent d'établir le schéma bloc du système électrique de la MADA à réguler (figure II.14).



**Figure II.14:** Schéma bloc du système à réguler [3].

Ce schéma fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactives statoriques. Il montre également que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donné qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec

chacun son propre régulateur. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe  $q$  rotorique et la puissance active pour l'axe  $d$  rotorique [17].

**II.11-Commande vectorielle de la CADA en génératrice**

Pour réaliser la commande bouclée, de régulateur classique de type PI est utilisés. Ce type de régulateur assurent une erreur statique nulle grâce à l'action intégrale tandis que la rapidité de la réponse est établie par l'action proportionnelle[17] , [25].

Une structure par boucles imbriquées sera utilisée pour pouvoir contrôler séparément les puissances  $Q_s$  et  $P_s$ . A cet effet, deux modes de contrôle sont proposées [13] :

□ La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode sera appelée **méthode directe** car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.

□ La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode sera appelée **méthode indirecte** découle directement des équations (II.78) et (II.79).

**II.11.1-Commande directe des puissances active et réactive :**

La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la génératrice [13].

Considérons le schéma bloc du système à réguler de la (figure II.14) afin de déterminer les éléments à mettre en place dans la boucle de régulation. La commande des puissances de sortie de la GADA dépendent des tensions rotoriques  $V_{rd}$  et  $V_{rq}$  à contrôlée. Si l'on regarde la relation qui lie les courants rotoriques aux puissances statoriques, on voit apparaître le terme  $\frac{MV_s}{L_s}$ .

Nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g\omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g\omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g\omega_s \frac{MV_s}{L_s} \end{cases} \quad (II.80)$$

$V_{rd}$  et  $V_{rq}$ : les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la génératrice pour obtenir les courants rotoriques voulus.

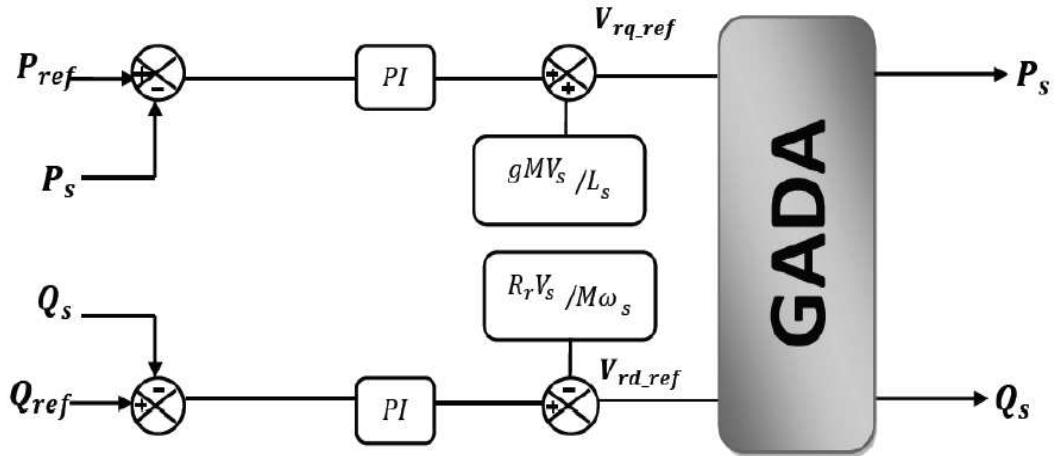


Figure II.15: Schéma bloc de la commande directe de la puissance[3] .

### II.11.2-Commande indirecte des puissances active et réactive

La méthode indirecte consiste à reproduire, en sens inverse, le schéma bloc du système à réguler[13], [17]. On reproduit ainsi le schéma bloc du système en sens inverse en aboutissant à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens et qui contient tous les éléments du schéma bloc de la CADA.

#### II.11.2.1-Commande Indirecte sans Boucles des Puissances (en boucle ouverte)

La commande en boucle ouverte est essentiellement basée sur l'hypothèse d'un réseau stable en tension et en fréquence, elle consiste à asservir non plus les puissances mais plutôt directement les courants rotoriques en n'utilisant non plus les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axe d et q. A partir des expressions de la puissance active et réactive statoriques du système, les références des courants rotoriques direct et quadrature suivant les relations :

$$\begin{cases} I_{rq-ref} = -\frac{L_s}{MV_s} P_{s-ref} \\ I_{rd-ref} = -\frac{L_s}{MV_s} Q_{s-ref} + \frac{V_s}{\omega_s M} \end{cases} \quad (II.81)$$

Ces courants seront utilisés comme références à la place des références sur les puissances active et réactive, on aboutit alors au schéma bloc ci-dessous.

Cette configuration reste fiable tant que le réseau électrique reste stable en tension et en fréquence. Une instabilité du réseau va donc provoquer une erreur sur le suivi des consignes des puissances active et réactive[26].

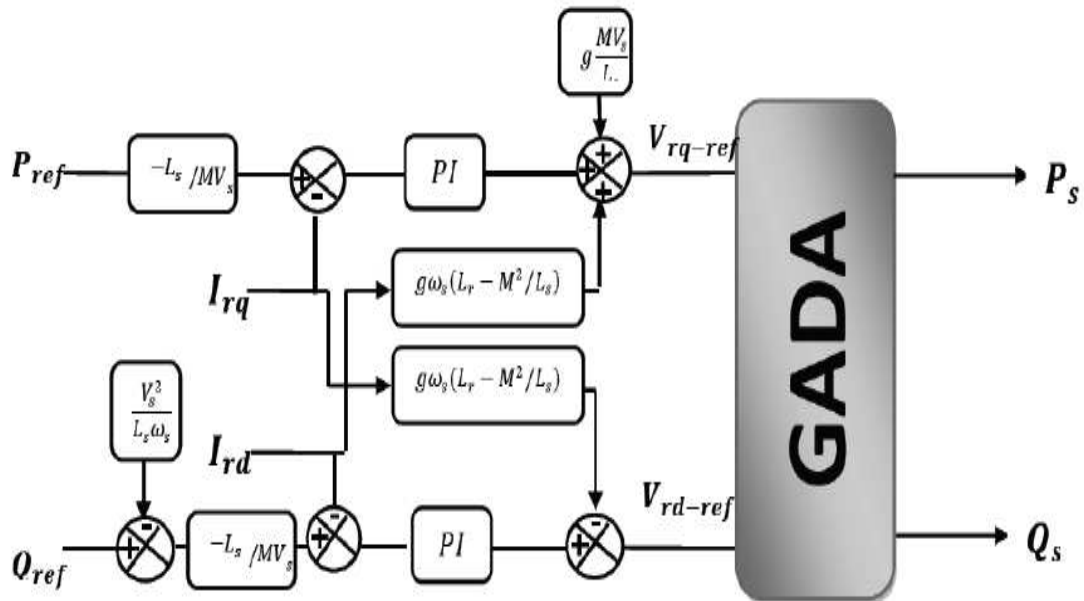


Figure II.16: Schéma bloc de la commande indirecte (en boucle ouverte)

**II.11.2.2-Commande Indirecte avec boucle de puissance (en boucle fermé):**

Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courant rotorique avec un retour du système. Qui permet le réglage des puissances, on distingue donc, une commande par boucle en cascade de la puissance et du courant rotorique pour chaque axe, puisqu'elle permet de contrôler séparément les courants  $I_{rd}$  et  $I_{rq}$  et les puissances  $Q_s$  et  $P_s$  en boucle fermé. Le schéma simplifié de l'ensemble commande est illustré sur la (figure II.17)

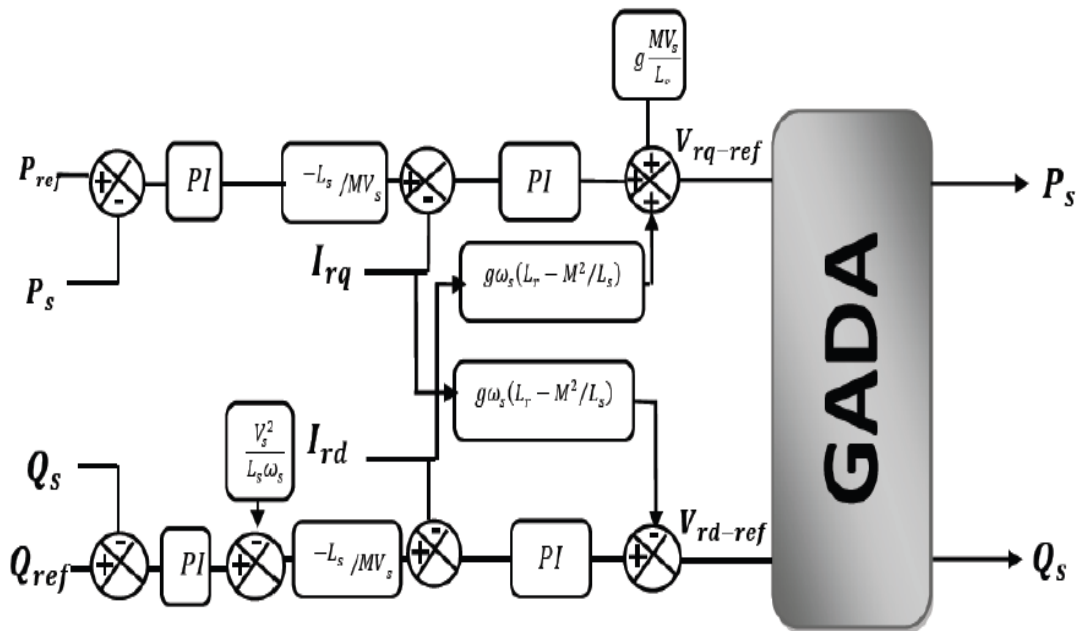


Figure II.17: Schéma bloc de la commande indirecte (en boucle fermé)

**II.12-Type du régulateur PI**

Les régulateurs PI utilisé pour le réglage des puissances active et réactive des courants  $I_{qr}$  et  $I_{dr}$ . Offre plusieurs avantages notamment la rapidité et la simplicité à mettre en œuvre, ainsi qu'il offre des performances acceptables à la régulation du système considéré [15].



Les régulateurs de chaque axe ont pour rôle d'annuler l'écart entre les puissances actives et réactives de références et la puissance active et réactive mesurée.

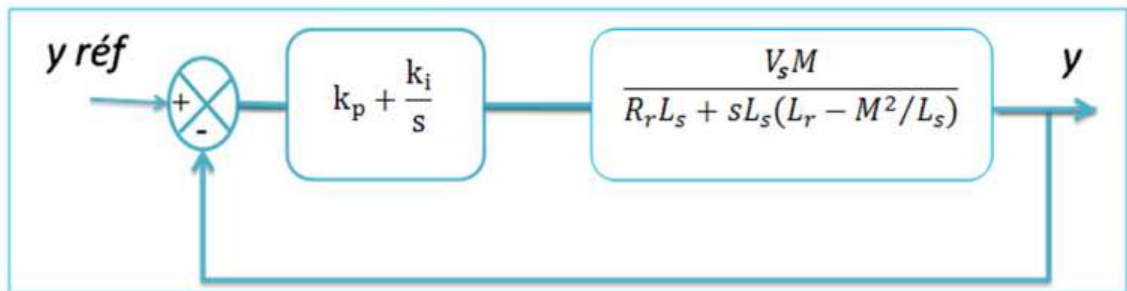
**II.12.1-Synthèse du régulateur PI**

Pour réaliser la commande bouclée, on utilise des régulateurs classiques de type PI.

Ce type de régulateur résulte de la combinaison harmonieuse de deux actions[24]

- une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité de la dynamique du système.
- une action intégrale qui permet d'éliminer l'écart entre la grandeur de consigne et celle que l'on désire asservir (erreur statique).

Le schéma de la (figure II.18) montre une partie de notre système bouclé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme  $K_p + \frac{K_i}{s}$ . Correspondant aux deux régulateurs utilisés.



**Figure. II.18:** Schéma bloc d'un système régulé par un PI

La fonction de transfert en boucle ouverte ( FTBO ) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante :

$$FTBO = \frac{S + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{S}{K_p}} * \frac{\frac{V_s M}{L_s(L_r - M^2/L_s)}}{S + \frac{R_r}{(L_r - M^2/L_s)}}$$

Afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert, nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur, ce qui se traduit par l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_r}{(L_r - M^2/L_s)}$$

Fonction de transfert en boucle ouverte devient alors :

$$FTBO = F_0(t) = \frac{\frac{V_s M}{L_s(L_r - M^2/L_s)}}{\frac{S}{K_p}}$$

Notons toutefois que la compensation de constantes de temps n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs dépendent directement de ces paramètres. Si tel n'est pas le cas la compensation est moins performant.

En boucle fermée, on obtient la fonction de transfert suivante :

$$FTBF = \frac{F_0(t)}{1 + F_0(t)} = \frac{1}{1 + \tau_r S}$$

Avec:

$$\tau_r = \frac{1}{k_p} \frac{L_s(L_r - M^2/L_s)}{V_s M}$$

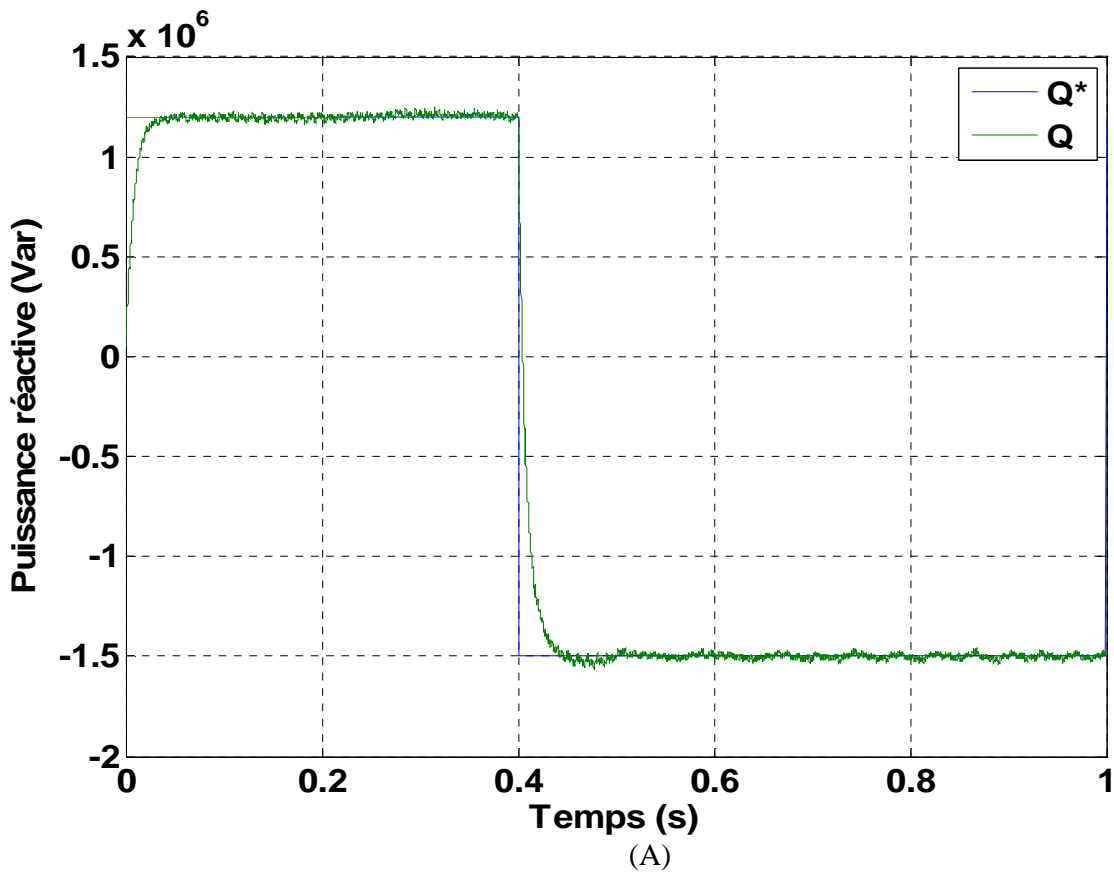
$\tau_r$  est le temps de réponse du système, correspondant à une valeur suffisamment rapide pour l'utilisation faite sur l'éolienne où les variations de vent sont peu rapides et les constantes de temps mécanique sont importantes.

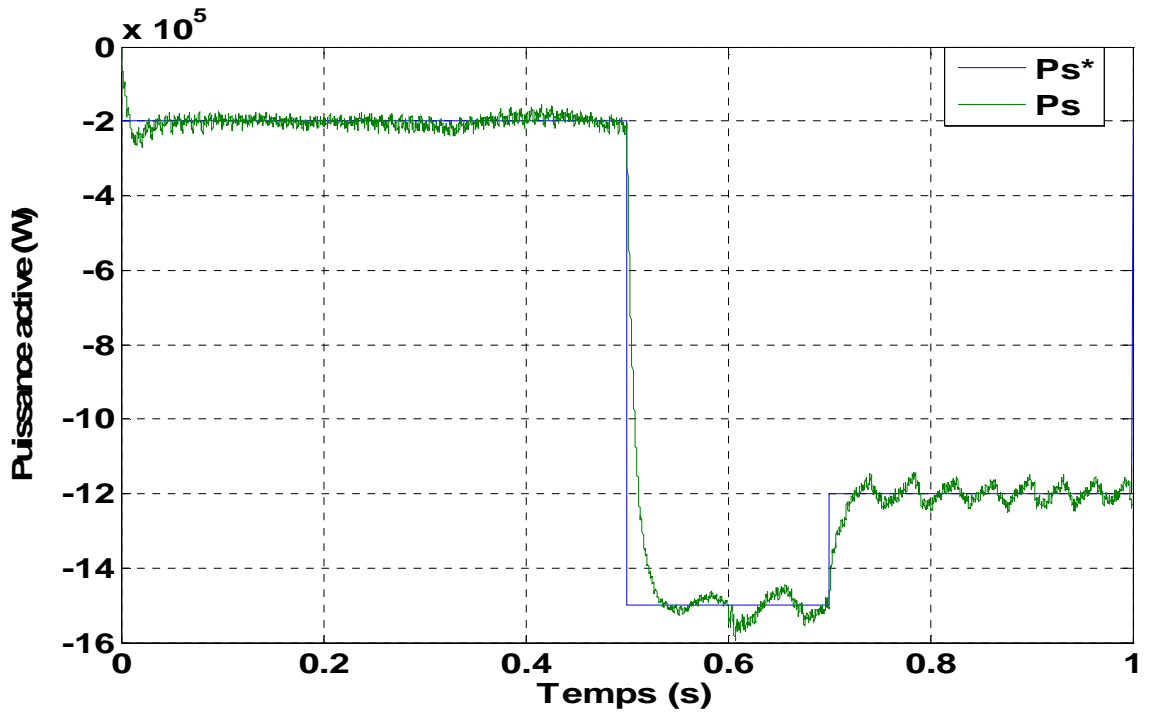
S'imposer une valeur plus faible n'améliorerait probablement pas les performances de l'ensemble, mais risquerait d'engendrer des perturbations lors des régimes transitoires en provoquant des dépassements et des instabilités indésirables. On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$k_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s(L_r - M^2/L_s)}{V_s M}; \quad K_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{R_r L_s}{V_s M}$$

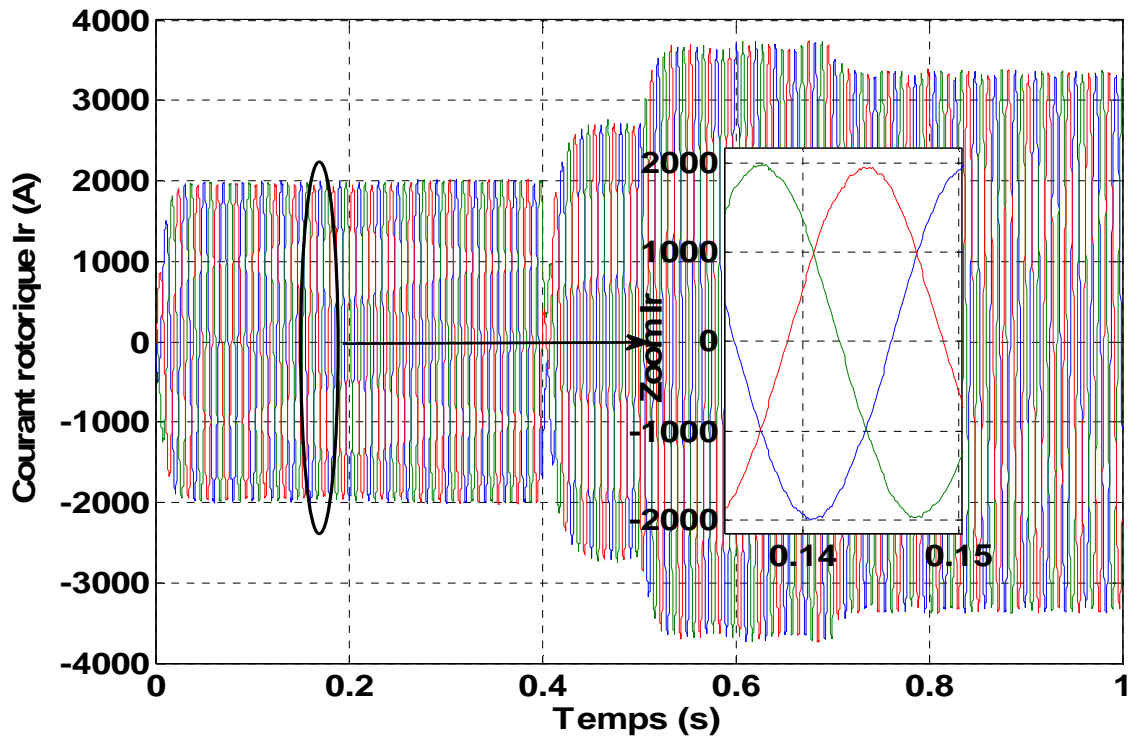
**II.13- Résultats de simulation:**

Les stratégies directe de commande en puissances de la MADA ont été validées par simulation numérique en utilisant le logiciel MATLAB/SIMULINK. Les paramètres de la MADA utilisée pour la simulation sont donnés par l'annexe A.

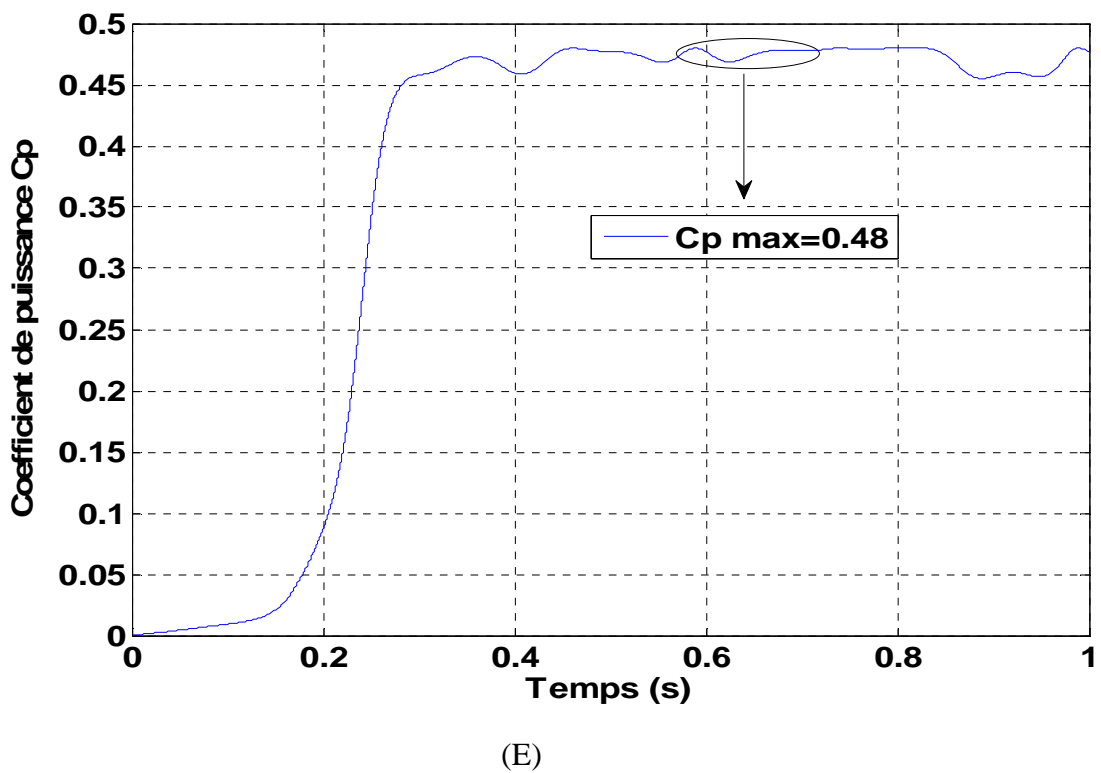
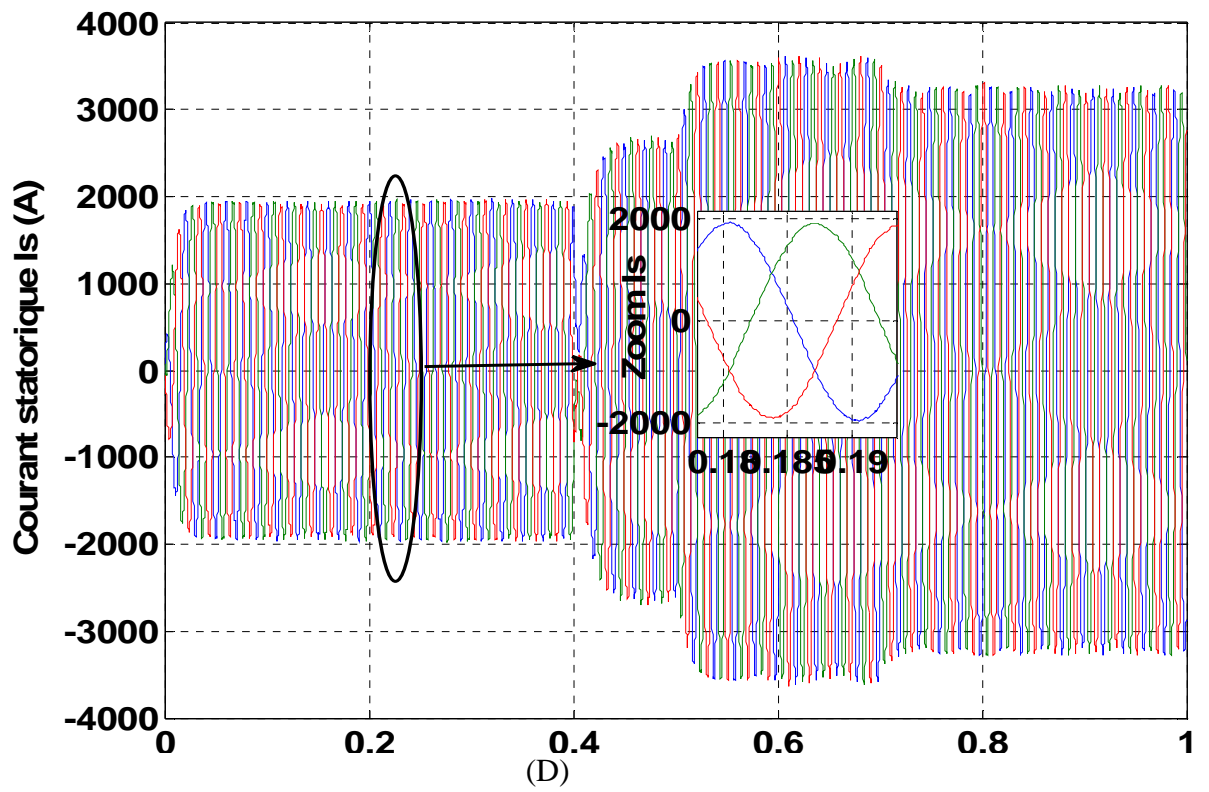


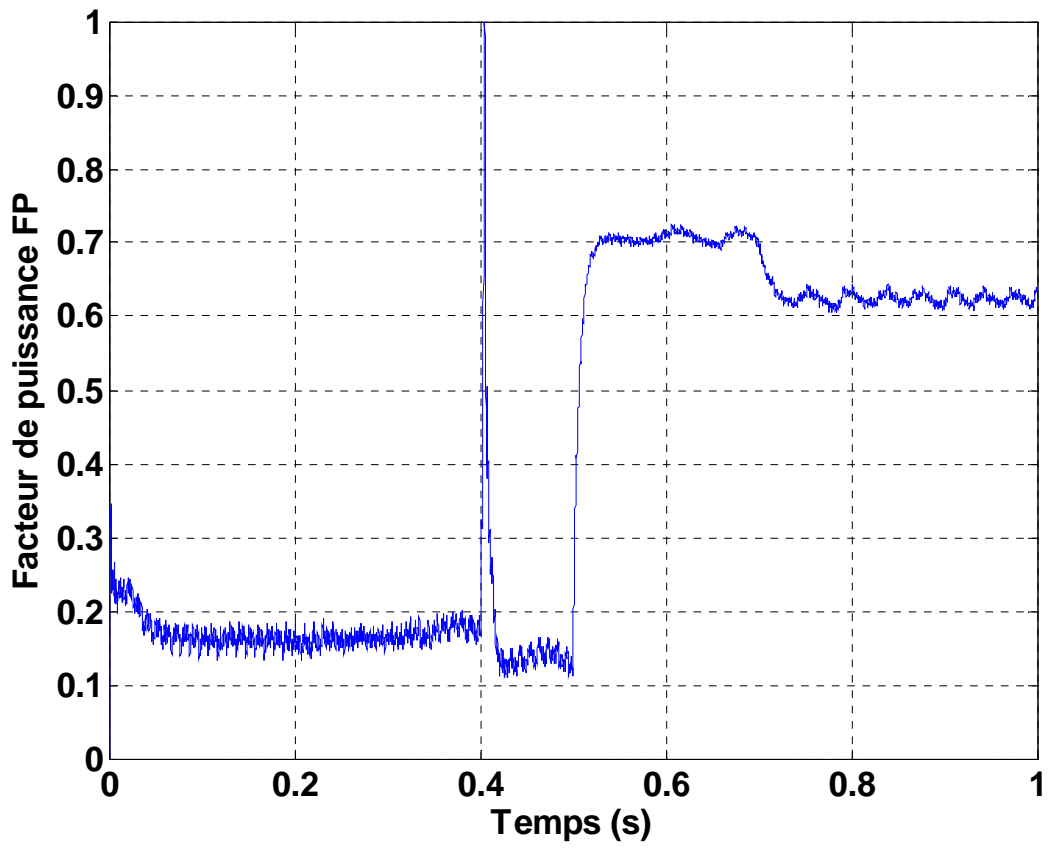


(B)

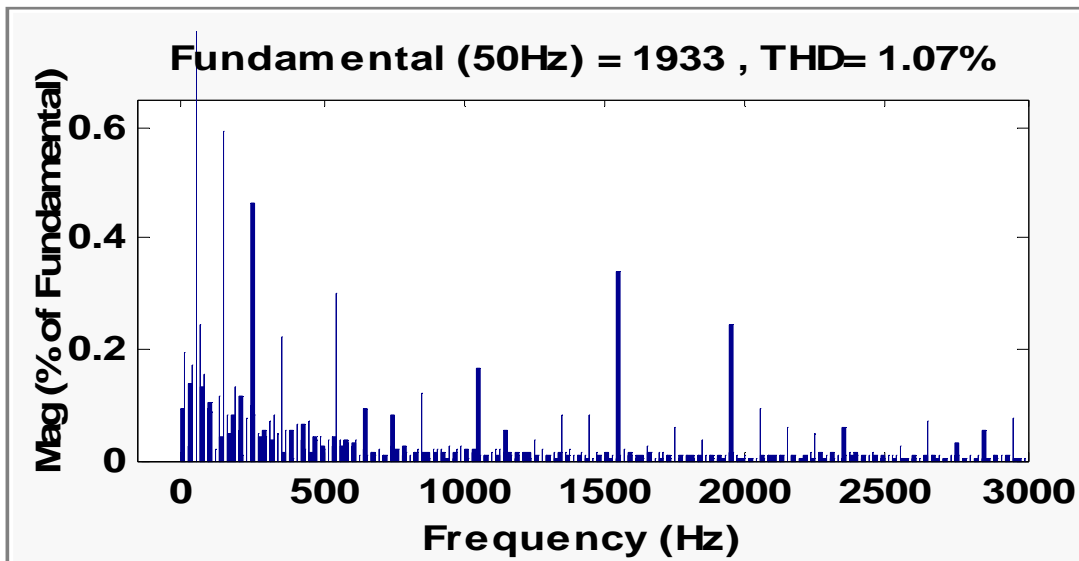
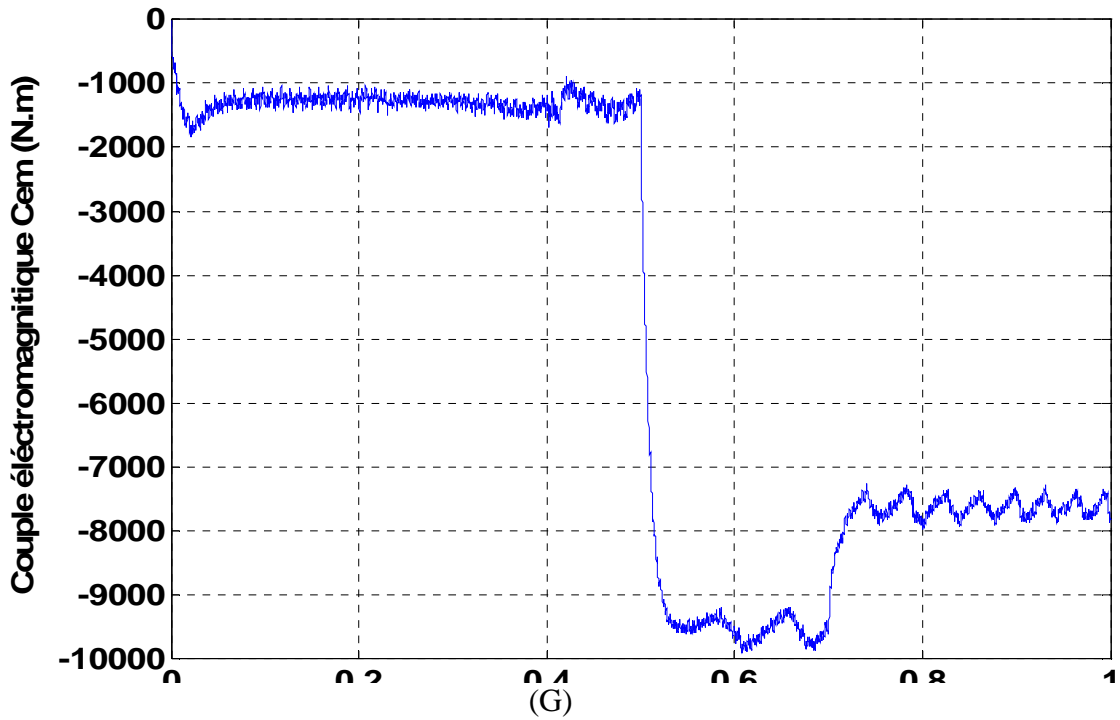


(C)





(F)



THD<sub>Is</sub>

Figure II.20-Tests de suivi de consignes pour la commande directe

on peut remarquer pour le méthode de commande directe que les consignes de puissance sont bien suivies par la MADA aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive avec un bon rejet de perturbation.

la puissance active est toujours gardée négative, cela signifie que la MADA fonctionne en mode génératrice. La forme d'onde des courants est presque sinusoïdale aussi bien pour le courant statorique que pour courant rotorique, ce qui signifie une bonne qualité d'énergie fournie au réseau.

Nous pouvons également remarquer que le couple électromagnétique dépend directement de la puissance active. Le facteur de puissance obtenu par les deux stratégies de commandes est variable selon les valeurs des puissances actives et réactives. Pour garder un facteur de puissance unitaire coté réseau.

Le taux de distorsion harmonique (Total Harmonic Distortion : THD) Nous observons que les courants sont quasi-sinusoïdaux mais elles présentent un taux de distorsion admissible de  $THD=1.07\%$ .

### **II.14-Conclusion**

Ce chapitre nous a permis d'étudier et d'appliquer la commande vectorielle pour la régulation de puissance active et réactive statorique de la génératrice asynchrone à double alimentation. En effet, celle-ci nous permet non seulement de simplifier le modèle de la machine mais aussi de découpler la régulation du couple et celle du flux.

A partir de la simulation numérique, on a constaté que La commande découplée En effet, celle-ci nous permet non seulement de simplifier le modèle de la machine mais aussi de découpler la régulation du couple et celle du flux. A partir de la simulation numérique, on a constaté que La commande découplée des puissances active et réactive permet de réguler les puissances active et réactive fournies au réseau selon des consignes de référence bien définies, la composante directe du courant rotorique contrôle la puissance réactive, et la composante en quadrature contrôle la puissance active.

Le prochain chapitre sera consacré à l'une de ces commandes qui occupe une large place dans la littérature de la commande des systèmes non linéaire : Il s'agit de la commande Control Direct de couple.

*CHAPITRE III:  
COMMANDE DIRECTE DU  
COUPLE DE LA GADA*



**III.1 INTRODUCTION**

La technique de commande directe du couple (Direct torque control ou DTC) a été apparue dans la deuxième moitié des années 1980 comme concurrentielle des méthodes classiques, basées sur une alimentation à modulation de largeur d'impulsion (MLI) et sur un découplage de flux et de couple par orientation du flux magnétique.

La DTC est une technique de commande qui assure un découplage du flux et du couple et simple à mettre en œuvre [1].

Elle présente des avantages déjà bien connus par rapport aux techniques classiques, notamment en ce qui concerne la réduction du temps de réponse du couple, l'amélioration de sa robustesse par rapport aux variations des paramètres rotorique, l'absence de transformations de Park. D'autre part, cette loi de commande en couple s'adapte par nature à l'absence de capteur mécanique (vitesse, position) [1]. La commande DTC à partir de références externes, tels le couple et le flux, ne recherche pas, comme dans les commandes classiques (vectorielles ou scalaires) les tensions à appliquer à la machine, mais recherche 'le meilleur' état de commutation de l'onduleur pour satisfaire les exigences de l'utilisateur [7].

Dans ce chapitre on va présenter une nouvelle stratégie de contrôle de la GADA en utilisant le contrôle direct de couple. Cette commande est ensuite simulée sur Matlab/Simulink

**III.2 principe de la commande directe du couple**

Les méthodes de commande directe du couple DTC consistent à commander directement la fermeture ou l'ouverture des interrupteurs de l'onduleur à partir des valeurs calculées du flux rotorique et du couple.

La commande des interrupteurs a pour but de donner au vecteur représentant le flux rotorique la direction déterminée par les valeurs de consigne. Pour connaître l'état électromagnétique de la machine afin de déterminer la commande des interrupteurs de l'onduleur, il faut disposer d'un modèle approprié de la machine. A partir des mesures de la tension continue à l'entrée de l'onduleur et des courants rotoriques, le modèle donne à chaque instant [7].

- ✓ Le flux rotorique réel de la machine,
- ✓ Le couple réel qu'elle développe,

L'état de ces grandeurs nous permet de définir le vecteur tension statorique à appliquer à la machine pour maintenir au mieux le couple et le flux dans leurs bandes d'hystérésis [1]

**III.3 - Caractéristiques principales d'une commande directe du couple**

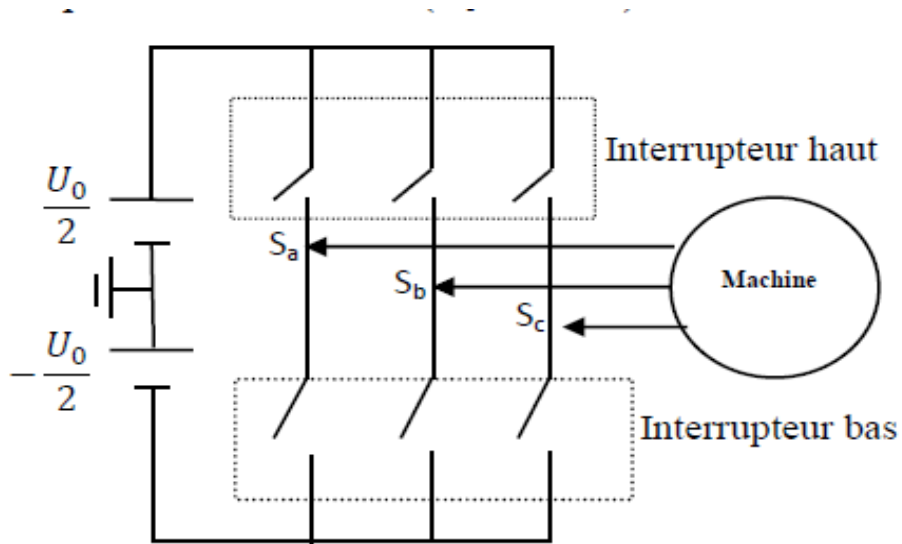
- ❖ Les caractéristiques générales d'une commande directe du couple sont :
- ❖ La DTC est basée sur la sélection des vecteurs optimaux de commutation de l'onduleur
- ❖ La commande indirecte des intensités et tensions de la machine ;
- ❖ L'obtention des flux et des courants proches des formes sinusoïdales ;
- ❖ La réponse dynamique du couple de la machine est très rapide ;
- ❖ L'existence des oscillations du couple qui dépend de la largeur des bandes des comparateurs à hystérésis ;
- ❖ La fréquence de commutation de l'onduleur dépend de l'amplitude des bandes d'hystérésis. Cette méthode de commande présente différents avantages et inconvénients qui sont cités ci-dessous

**III.4. fonctionnement et séquences d'un onduleur de tension triphasé**

Les interrupteurs de l'onduleur de tension (voir Figure III.1) doivent être commandés de manière à maintenir le flux et le couple de la machine. Le vecteur de la tension statorique  $V_s$  peut s'écrire sous la forme :

$$\bar{V}_s = \sqrt{3/2} U_c [S_a + S_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + S_c e^{j\frac{4\pi}{3}}] \quad (\text{III.1})$$

Où ( $S_a$ ,  $S_b$ ,  $S_c$ ) représentent l'état logique des 3 interrupteurs :  $S_i = 1$  signifie que l'interrupteur haut est fermé et l'interrupteur bas est ouvert ( $V_i = +U_0/2$ ) et  $S_i = 0$  signifie que l'interrupteur haut est ouvert et l'interrupteur bas est fermé ( $V_i = -U_0/2$ ).

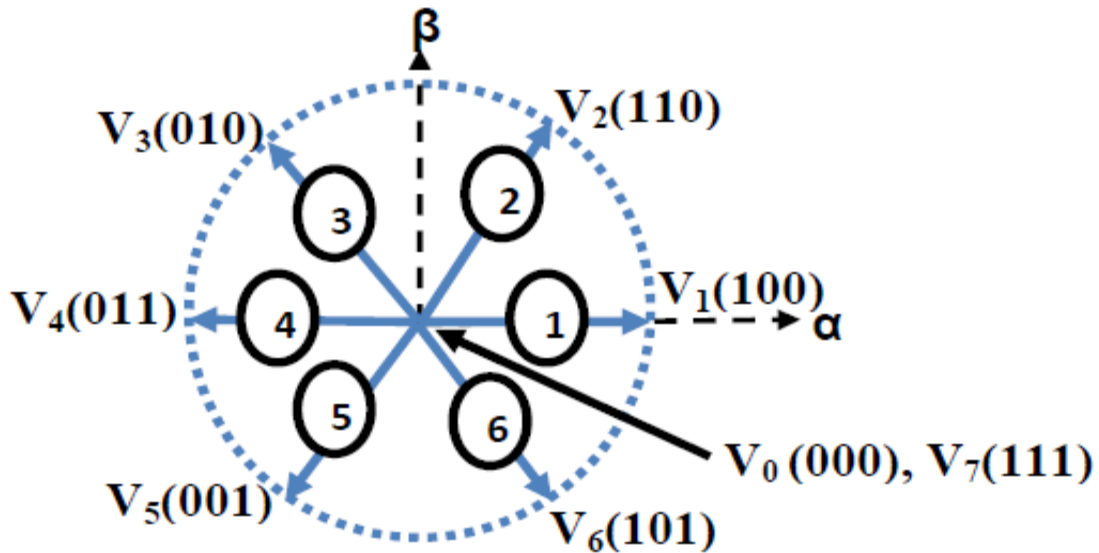


**Figure III.1:** Machine asynchrone commandée par l'onduleur de tension [7]

On cherchera donc à contrôler le flux et le couple via le choix du vecteur de tension qui se fera par une configuration des interrupteurs. Comme nous disposons de 3 interrupteurs,

il y a donc  $2^3 = 8$  possibilités pour le vecteur  $V_s$ . 2 vecteurs ( $V_0$  et  $V_7$ ) correspondent au vecteur nul :  $(S_a, S_b, S_c) = (0, 0, 0)$  et  $(S_a, S_b, S_c) = (1, 1, 1)$ .  $V_0(0,0,0)$  est toujours à côté d'un vecteur impair;  $V_1(1,0,0)$ ;  $V_3(0,1,0)$ ; où  $V_5(0,0,1)$  d'où une seule commutation  $V_7(1,1,1)$  est toujours à côté d'un vecteur pair;  $V_2(1, 1,0)$ ;  $V_4(0, 1,1)$ ; où  $V_6(1, 0,1)$  donc une seule commutation. Dans chaque période de modulation, un bras ne commute pas deux fois.

La (figure (III.2)) montre la représentation dans le plan complexe des six vecteurs de tensions non nuls qui peuvent être générés par un onduleur de tension triphasé à deux Niveaux[7] [BEN10]:



$V_3 [010]$  signifie :

- 0 : interrupteur en haut du 1<sup>er</sup> bras ouvert;
- 1 : interrupteur en haut du 2<sup>ème</sup> bras fermé;
- 0 : interrupteur en haut du 3<sup>ème</sup> bras ouvert;

**Figure III.2:** Séquence de fonctionnement d'un onduleur de tension à deux niveaux [7]

**III.5.1. Contrôle de flux rotorique et du couple électromagnétique**

**III.5.1.1. Principe de contrôle de flux rotorique**

On se place dans le repère fixe  $(\alpha, \beta)$  lié au rotor. Le flux rotorique de la machine asynchrone à double alimentation est obtenu à partir de l'équation suivante:

$$V_r = R_r I_r + \frac{d\varphi_r}{dt} \tag{III.2}$$

Le flux rotorique est estimé à partir de la relation suivante:

$$\varphi_s(t) = \int_0^t (V_r - R_r I_r) dt \tag{III.3}$$

$$\varphi_r(t) = \varphi_{r0}(t) + V_r(t) - R_r \int I_r dt \tag{III.4}$$

Avec l'hypothèse que  $R_r$  reste constante et que le terme  $(R_r I_r)$  est négligeable devant la tension  $V_r$ .

Sur un intervalle périodique de contrôle  $[0, T_e]$  correspondant à une période d'échantillonnage  $T_e$  les commandes  $(S_a, S_b, S_c)$  sont fixées, ainsi on peut écrire [7]

$$\varphi_r(t) \approx \varphi_{r0} + V_r T_e \tag{III.5}$$

Où  $\varphi_{r0}$ : est le vecteur flux à l'instant  $t = 0$ .

Si la période de contrôle "  $T_e$  " est très faible devant la période de rotation du vecteur flux rotorique. En choisissant une séquence appropriée de vecteur tension de l'onduleur sur des intervalles de temps successifs de durée  $T_e$ , on peut donc faire suivre à l'extrémité du vecteur flux  $\varphi_s$  la trajectoire désirée.

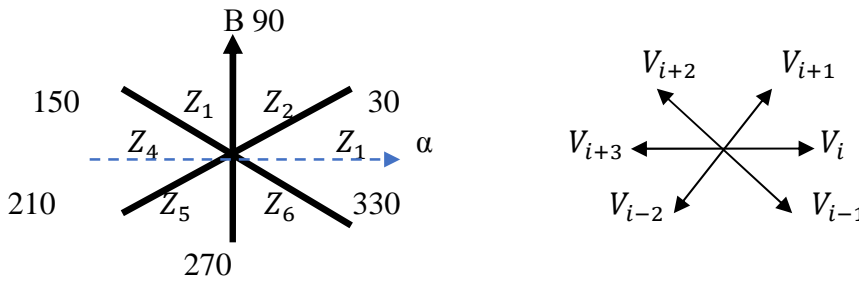


- \* Si  $V_{i-2}$  est sélectionné alors l'amplitude du flux  $\varphi_r$  décroît et le couple  $C_{em}$  décroît
- \* Si  $V_0$  ou  $V_7$  sont sélectionnés, alors la rotation du flux est arrêtée, d'où une décroissance du couple alors que le module du flux  $\varphi_r$  reste inchangé.

Les vecteurs tension à appliquer dépendent de la zone où se trouve le vecteur flux. Les paramètres  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6$  (figure III.4) représentent les six zones possibles du fonctionnement.

Vecteur $V_k$	$V_{i+1}$	$V_{i+2}$	$V_{i-1}$	$V_{i-2}$
$\varphi_r$				
$C_{em}$				

**Tableau III.1 :** Evolution des grandeurs flux et couple en fonction du vecteur  $V_s$  appliqué dans la zone  $Z_i$ .  $k = (i-1, i-2, i+1, i+2)$



**Figure. III.4 :** Répartition des zones [7]

Le niveau d'efficacité des vecteurs tensions appliqués dépend également de la position du vecteur flux dans la zone  $i$ .

En effet, en début de zone, les vecteurs  $\overline{V_{i+1}}$  et  $\overline{V_{i-2}}$  sont perpendiculaires à  $\overline{\varphi_r}$ , d'où une évolution rapide du couple mais une évolution lente de l'amplitude du flux  $\varphi_r$ , alors qu'en fin de zone l'évolution est inverse. Avec les vecteurs  $\overline{V_{i-1}}$  et  $\overline{V_{i+2}}$ , il correspond à des évolutions lente du couple et rapide de l'amplitude du flux  $\overline{\varphi_r}$  en début de zone, alors qu'en fin de zone c'est le contraire. Quelque soit le sens d'évolution du couple ou du flux, dans la zone  $i$ , les deux vecteurs  $V_i$  et  $\overline{V_{i+3}}$  ne sont jamais utilisés. En effet, ceux-ci ont la composante de flux la plus forte (évolution très rapide de  $\overline{\varphi_r}$ ) mais l'effet sur le couple lui, dépend de la position de  $\overline{\varphi_r}$  dans la zone, avec un effet nul en milieu de zone. Le vecteur de tension à la sortie de l'onduleur est déduit des écarts de couple et de flux, estimé par rapport à leur référence, ainsi que la position du vecteur  $\overline{\varphi_r}$ .

Un estimateur de  $\overline{\varphi_r}$  en module et en position ainsi qu'un estimateur de couple sont donc nécessaires.

### III.5.2. Estimateur

Les consignes d'entrée du système de contrôle sont le couple et l'amplitude du flux rotorique. Les performances du système de contrôle dépendent de la précision dans l'estimation de ces grandeurs[28], [29].

**III.5.2.1. Estimation du flux rotorique**

L'estimation du flux peut être réalisée à partir des mesures des grandeurs rotoriques courant et tension de la machine.

A partir de l'équation :

$$\overline{\varphi}_r = \int_0^t (\overline{V}_r - \overline{R}_r * \overline{I}_r) dt \tag{III.7}$$

On obtient les composantes  $\alpha$  et  $\beta$  du vecteur  $\overline{\Phi}_r$ :

$$\overline{\varphi}_{r\alpha} = \int_0^t (V_{r\alpha} - R_r I_{r\alpha}) dt \tag{III.8}$$

$$\overline{\varphi}_{r\beta} = \int_0^t (V_{r\beta} - R_r I_{r\beta}) dt$$

Ces équations représentent les étapes de calcul nécessaire à l'estimation de l'amplitude du flux rotorique

On obtient les composantes  $V_{s\alpha}$  et  $V_{s\beta}$ , après l'application de la transformation de Concordia sur les tensions d'entrée mesurées  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  et  $V_{cn}$ .

Ces tensions sont exprimées à partir de la tension d'entrée de l'onduleur  $U_0$ , et des états de commande ( $S_a, S_b, S_c$ ), soit:

$$\begin{cases} \overline{V}_{s\alpha} = \sqrt{2/3} U_0 [S_a - 1/2(S_b + S_c)] \\ \overline{V}_{s\beta} = \sqrt{1/2} U_0 [S_b - S_c] \end{cases} \tag{III.9}$$

Les courants  $i_{s\alpha}$  et  $i_{s\beta}$ , sont également obtenus à partir des courants réels  $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$  et  $i_{sc}$  ( $i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0$ ) et par application de la transformation de CONCORDIA :

$$\begin{cases} i_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} i_{sa} \\ i_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} (i_{sb} - i_{sc}) \end{cases} \tag{III.10}$$

L'amplitude du flux rotorique est estimée à partir de ses composantes  $\varphi_{r\alpha}$  et  $\varphi_{r\beta}$ , par:

$$\varphi_r = \sqrt{\varphi_{r\alpha}^2 + \varphi_{r\beta}^2} \tag{III.11}$$

L'angle  $\alpha_r$  entre le référentielle rotorique et le vecteur flux  $\varphi_r$  est égal à :

$$\alpha_r = \arctg \frac{\varphi_{r\beta}}{\varphi_{r\alpha}} \tag{III.12}$$

**III.5.2.2. Estimation du couple électromagnétique**

Le couple électromagnétique peut être estimé à partir de l'estimation du flux et de la mesure du courant en utilisant l'expression du couple en fonction du flux et du courant rotorique donnée par l'équation :

$$C_{em} = P(\varphi_{r\alpha} i_{s\beta} - \varphi_{r\beta} i_{s\alpha}) \tag{III.13}$$

**III.6 Elaboration du vecteur de commande**

**III.6.1 Le correcteur de flux**

Son but est de maintenir l'extrémité du vecteur  $\overline{\varphi}_r$  dans une couronne circulaire comme le montre la (figure III.5). La sortie du correcteur doit indiquer le sens d'évolution du module

de  $\overline{\varphi_r}$  afin de sélectionner le vecteur tension correspondant. Pour cela un simple correcteur à hystérésis à deux niveaux convient parfaitement, et permet de plus d'obtenir de très bonnes performances dynamiques. La sortie du correcteur, représentée par une variable booléenne *cflx* indique directement si l'amplitude du flux doit être augmentée ( $cflx = 1$ ) ou diminuée ( $cflx = 0$ ) de façon à maintenir [16] :

$$|(\varphi_r)_{ref} - \varphi_r| \leq \Delta\varphi_r$$

Avec  $(\varphi_r)_{ref}$ : la consigne de flux;

$\Delta\varphi_r$ : La largeur d'hystérésis du correcteur

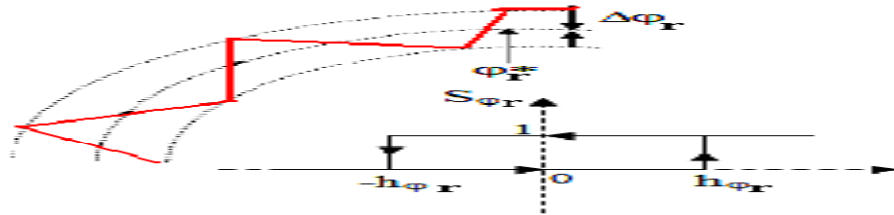


Figure III.5: Comparateur à hystérésis utilisé pour contrôler le flux rotorique

### III.6.2. Le correcteur de couple

Le correcteur de couple a pour fonction de maintenir le couple dans les limites admissible définie comme suit:

$$|C_{ref} - C_{em}| \leq \Delta C$$

avec :

$C_{ref}$ : la référence de couple

$\Delta C$ : la bande d'hystérésis du correcteur.

Cependant une différence avec le contrôle du flux est que le couple peut être positif ou négatif selon le sens de rotation de la machine.

Deux solutions peuvent être envisagées :

#### III.6.2.1. Le correcteur à trois niveaux :

Il permet de contrôler le moteur dans les deux sens de rotation, soit pour un couple positif ou négatif. La sortie du correcteur, représentée par la variable booléenne indique directement si l'amplitude du couple doit être augmentée en valeur absolue ( $ccpl = 1$ ) pour une consigne positive et  $ccpl = -1$  pour une consigne négative) ou diminuée ( $ccpl = 0$ ). La (figure III.6) montre ce type de correcteur.

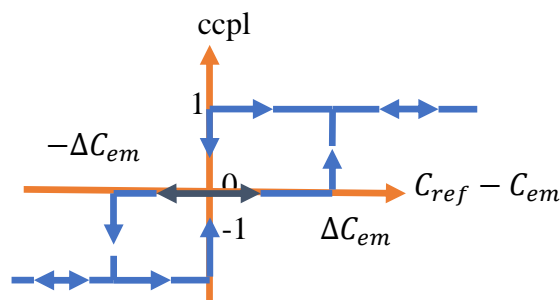


Figure. III.6: Correcteur de couple à trois niveaux.



**III.6.2.2. Le correcteur à deux niveaux**

Ce correcteur n'autorise le contrôle du couple que dans un seul sens de rotation. Ainsi seuls les vecteurs  $\overline{V_{i+1}}$  et  $\overline{V_{i+2}}$ , peuvent être sélectionnés pour faire évoluer le flux  $\overline{\varphi_r}$ . Par conséquent, la diminution du couple est uniquement réalisée par la sélection des vecteurs nuls. Avec ce correcteur, pour inverser le sens de rotation de la machine il est nécessaire de croiser deux phases de la machine.

Cependant ce correcteur est plus simple à implanter. De plus en sélectionnant correctement les vecteurs nuls suivant les zones  $N_i$ , on s'aperçoit que pour chaque zone  $i$ , il y a un bras de l'onduleur qui ne commute jamais, et permet ainsi de diminuer la fréquence moyenne de commutation des interrupteurs, diminuant ainsi les pertes par commutation au niveau de l'onduleur[16].

**III.7 Elaboration de la table de commande**

La table de commande est construite en fonction de l'état des variables  $cflx$  et  $ccpl$ , et de la zone  $N_i$  de position de  $\overline{\varphi_r}$ . Elle se présente donc sous la forme suivante :

L'application des vecteurs optimaux se résume donc à une simple table de référence donnée ci-après. La commande est construite en fonction de l'état des variables ( $cflx$ ) et ( $ccpl$ ), et de la zone  $N_i$  de la position de flux  $\overline{\varphi_r}$ . [11].

		Number du secteurs					
		N=1	N=2	N=3	N=4	N=5	N=6
Flux	Couple	Vecteur tension					
	$ccpl=1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_1$
1	$ccpl=0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$V_0$
	$ccpl=-1$	$V_6$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$
0	$ccpl=1$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_1$	$V_2$
	$ccpl=0$	$V_0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$
	$ccpl=-1$	$V_5$	$V_6$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$

**Table. III.2 :** Table de commutation [11]

**III.7.1. Structure générale du contrôle direct de couple**

La commande DTC est une commande échantillonnée dont la période d'échantillonnage  $T_e$  est très petite vis-à-vis des constantes des temps de la machine. Le choix du vecteur  $\overline{V_s}$  est effectué à chaque période d'échantillonnage  $T_e$ , de plus, on applique un filtrage sur les grandeurs statoriques de courants afin de limiter les bruits sur le signal de flux calculé et l'effet d'échantillonnage.

L'un des éléments essentiels de cette structure est la table de commutation permettant de définir le choix du vecteur  $\overline{V_r}$  sans avoir recours à la position du rotor qui nécessite généralement un capteur de vitesse. Cette dernière, en combinaison avec les comparateurs à hystérésis, représente la table de commutation qui remplace le générateur MLI des structures classiques du contrôle par onduleur de tension à MLI. En plus, avec l'utilisation de ce type de contrôle les exigences de régulateur du courant, régulateur PI de flux et du couple sont éliminés ce qui améliore les performances dynamiques du système [7].

**\*\* Avantages de la DTC**

- ❖ Il n'est pas nécessaire de faire la transformation des coordonnées, car les courants et les tensions sont dans un repère lié au stator.
- ❖ Utilise un modèle simplifié de la machine.
- ❖ Il n'existe pas de bloc qui calcule la modulation de la tension (MLI).
- ❖ Il n'est pas nécessaire de faire un découplage des courants par rapport aux tensions de commande, comme dans le cas de la commande vectorielle.
- ❖ Elle exige deux comparateurs à hystérésis, tandis que dans la commande vectorielle indirecte exige 4 régulateurs PI et un modulateur de PWM.
- ❖ Il n'est pas nécessaire de connaître avec une grande précision l'angle de position rotorique, car seule l'information de secteur dans lequel se trouve le vecteur de flux est nécessaire.
- ❖ La réponse dynamique du couple est très rapide.
- ❖ Robustesse vis-à-vis des variations paramétriques.

**\*\* Inconvénients de la DTC**

- ❖ L'existence de problèmes à basse vitesse.
- ❖ La nécessité de disposer des estimations de flux et du couple.
- ❖ L'existence des oscillations au niveau du couple.
- ❖ La fréquence de commutation n'est pas constante (utilisation des comparateurs à hystérésis).

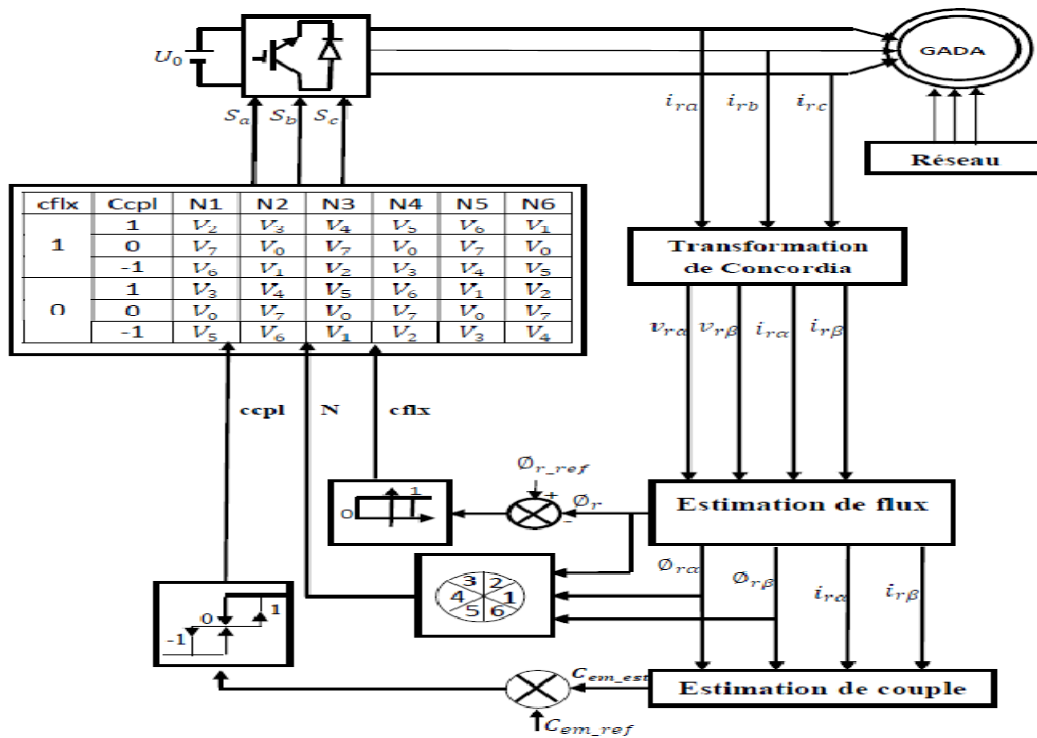
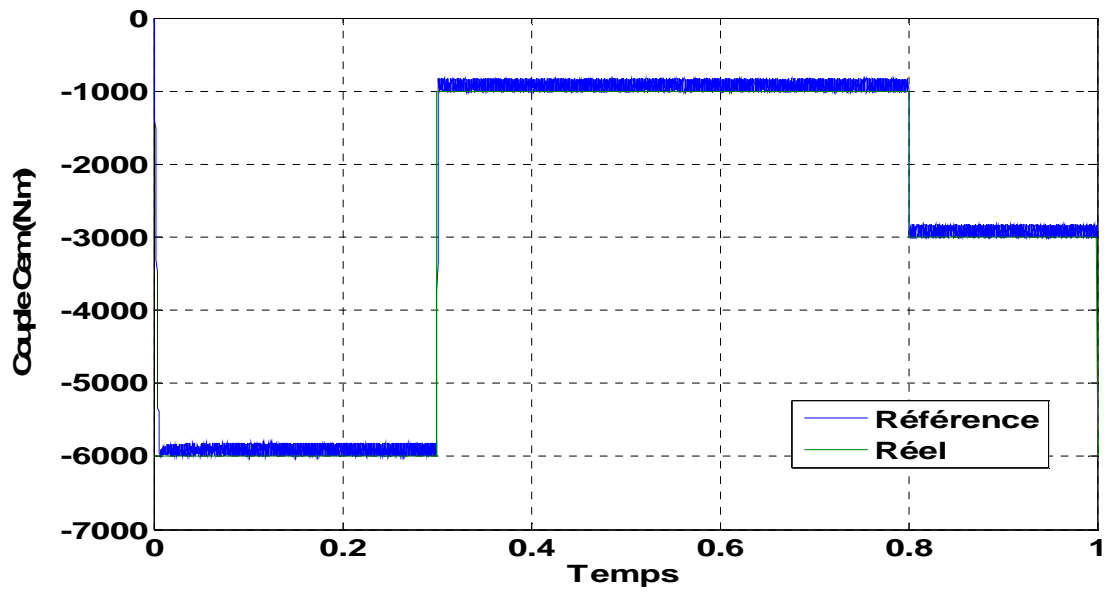
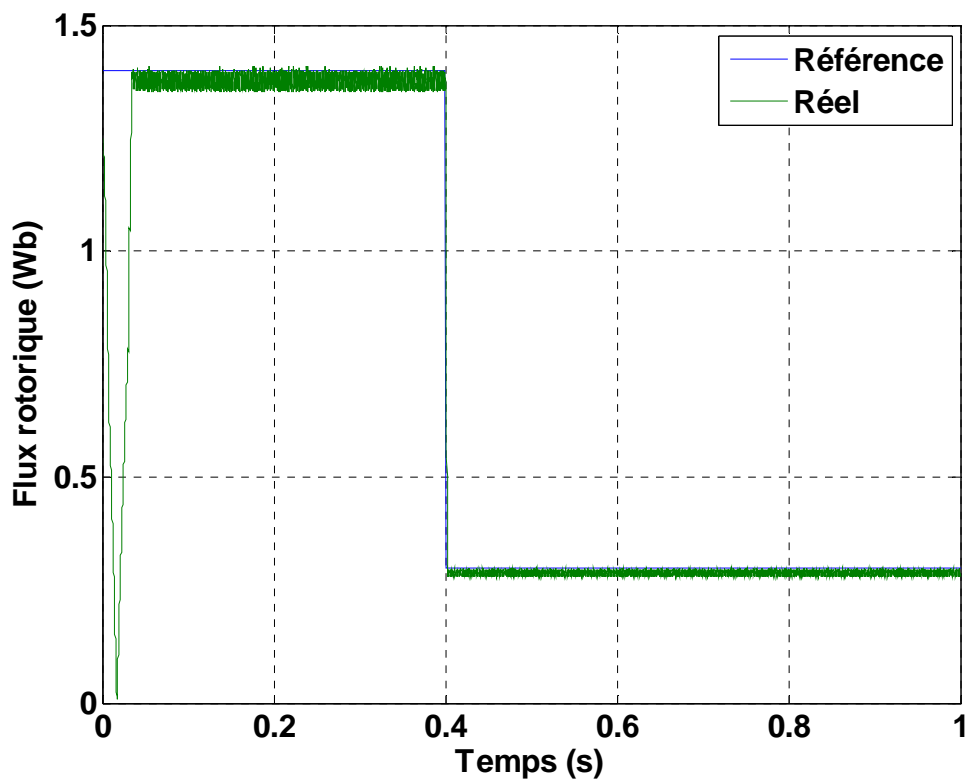


Figure. III.7 Schéma bloc de la structure de contrôle DTC-C appliquée à la GADA

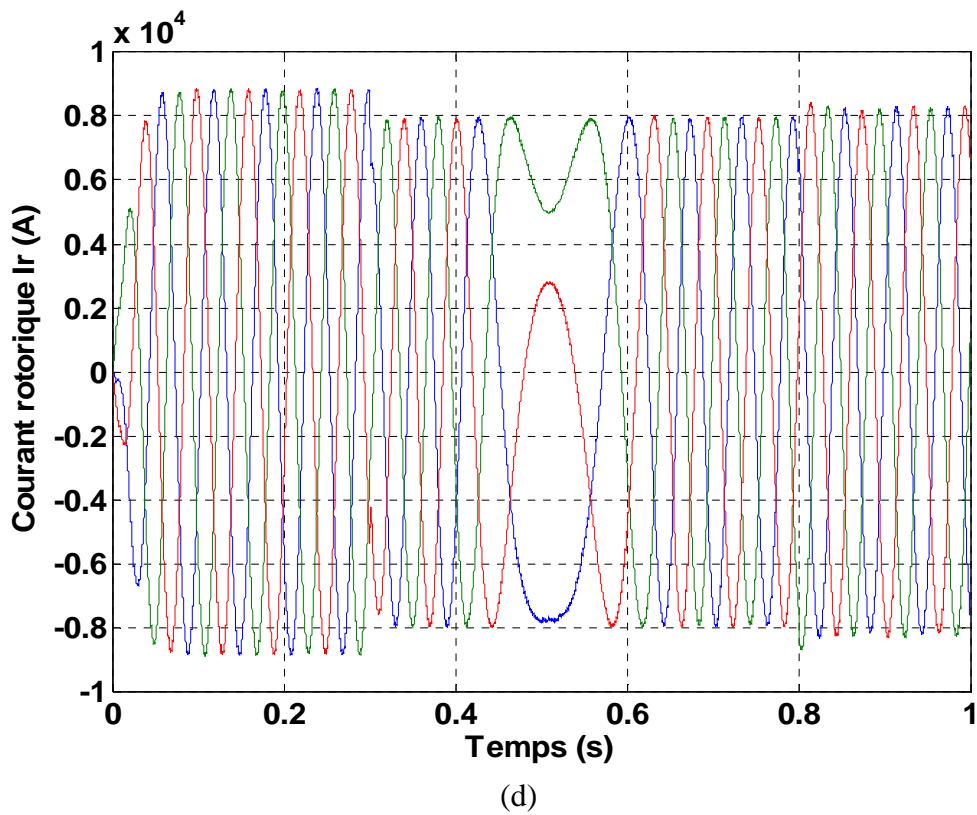
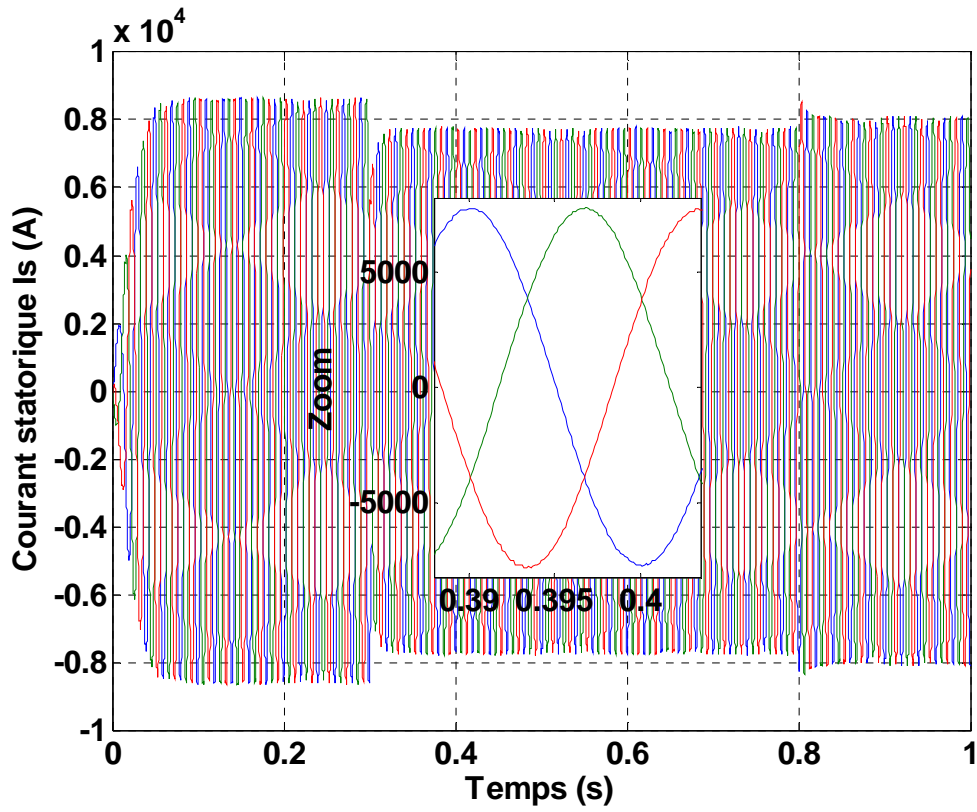
III.8. Résultats de la simulation

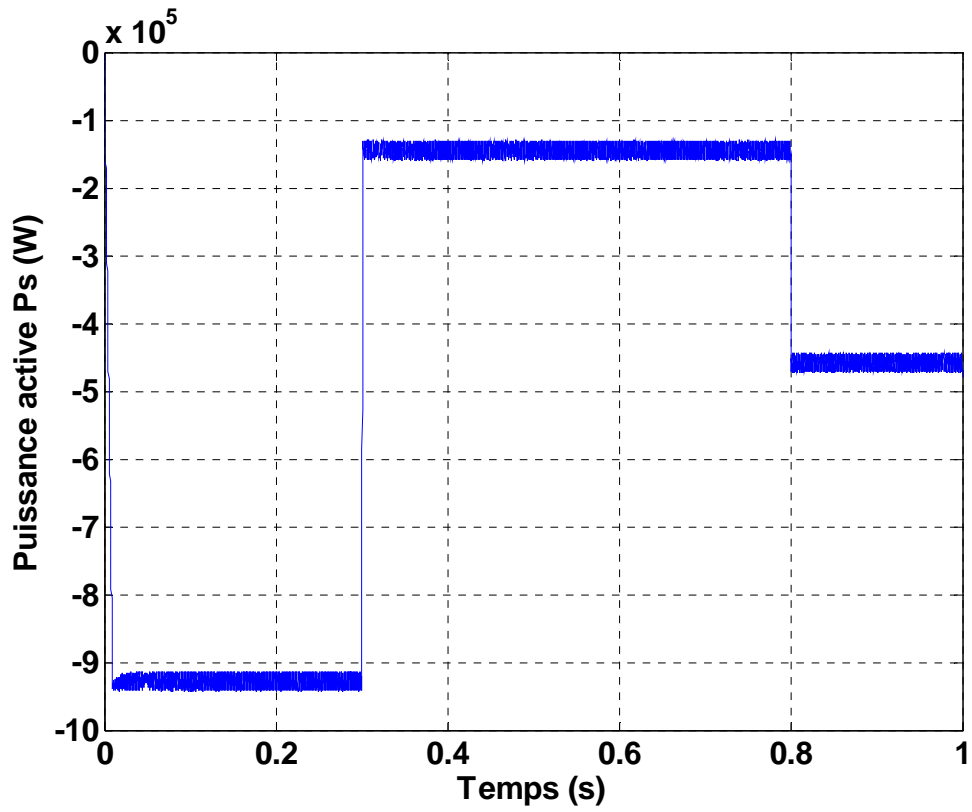


(a)

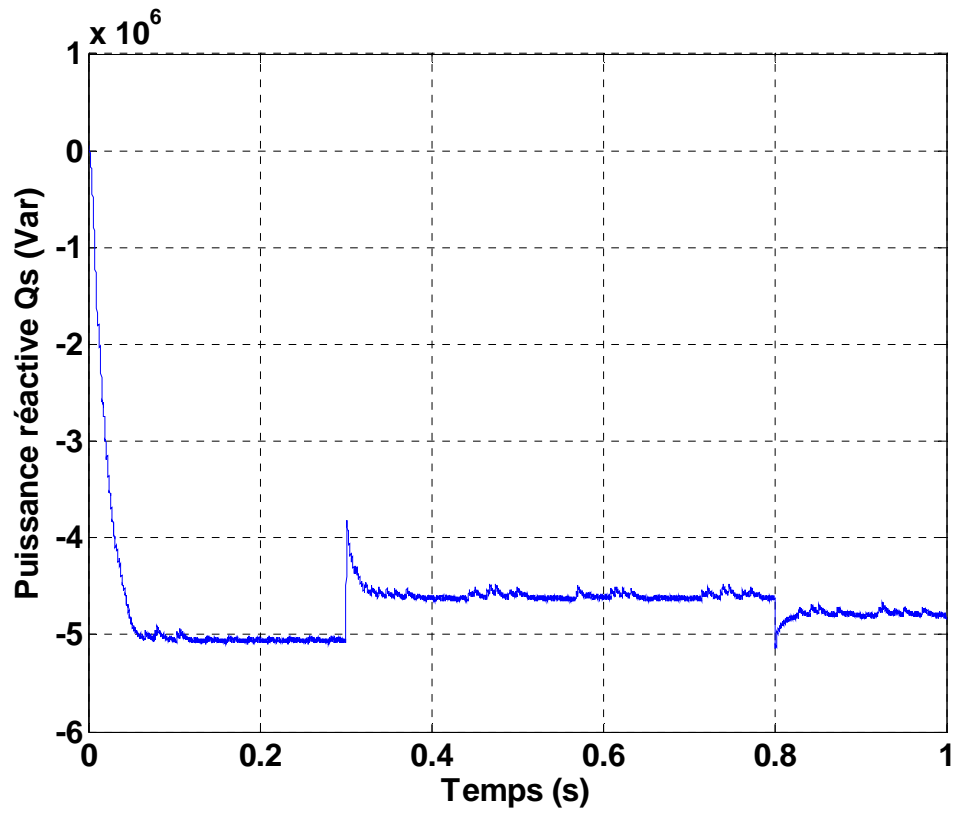


(b)

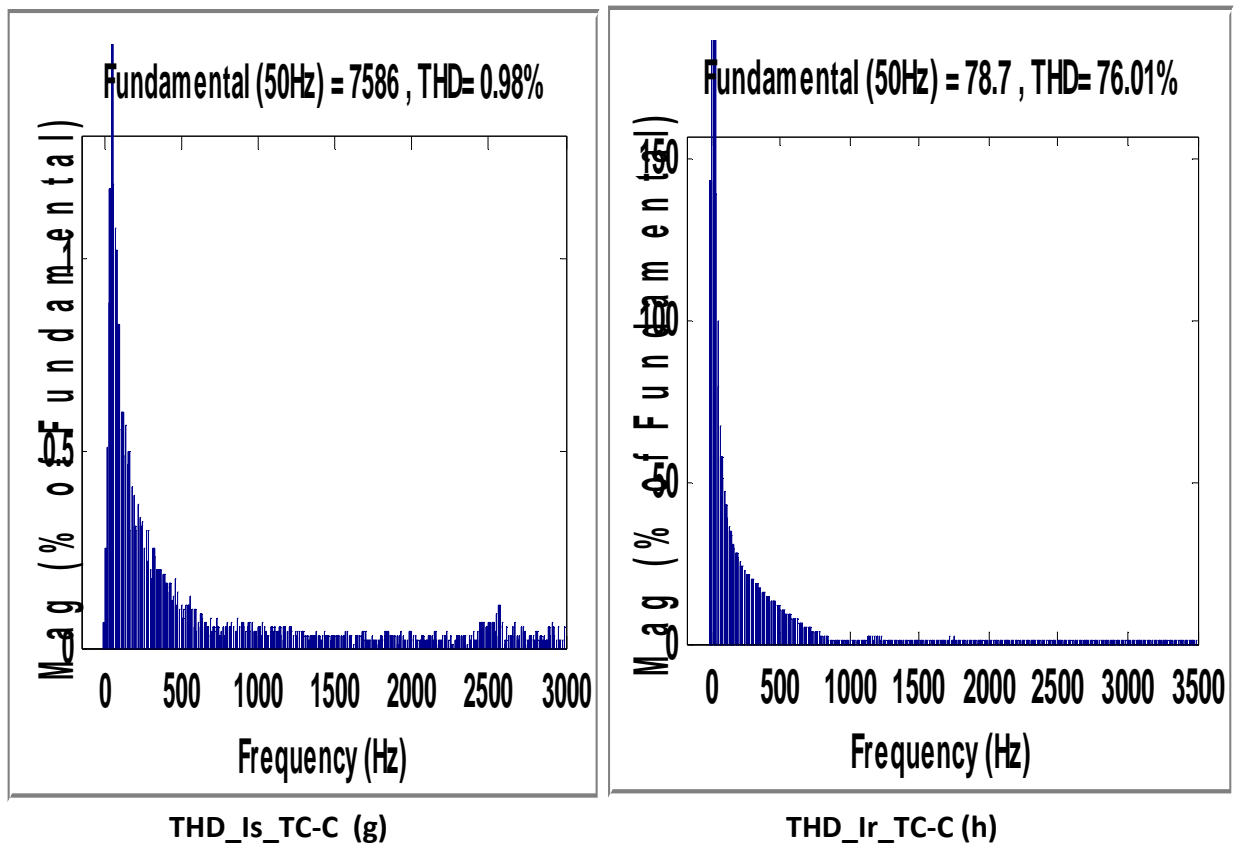




(e)



(f)



**Figure III.8.** Résultats de simulation de la DTC-C à flux rotorique variable

D'après les résultats obtenus dans le figure III.8 on observe une bonne dynamique du couple et de flux rotorique dont les valeurs moyennes suivent de façon acceptable les valeurs de consigne avec quelques dépassements des bandes d'hystérésis définie auparavant (figure III.8.a et III.8.b).

La figure 3.8.c montre l'allure sinusoïdale du courant statorique triphasé. La figure 3.8-d, montre le passage du mode hypo synchronisme au mode hyper synchronisme de la vitesse de rotation de la MADA à l'instant 0.5s ; ceci est due à la fréquence de commutation variable ce qui conduit à des pertes de commutation des interrupteurs, qui représentent l'inconvenant majeur de la DTC-C pour notre cas.

Le taux de distorsion harmonique (THD) est de 76,01% pour le courant rotorique (figure III.8.h) et de 0.98% pour le courant statorique (figure III.8.g).

### III.9.Conclusion

Les résultats de simulation obtenus ont montrés que la DTC classique donne des bonnes performances en matière poursuite grâce au principe de la régulation par hystérésis de couple électromagnétique et de flux rotorique. Néanmoins, elle engendre de fortes oscillations au niveau de ces deux grandeurs à cause de variation de la fréquence de commutation. Afin de s'affranchir des contraintes sévères de temps de calcul et d'améliorer les limites de la technique DTC classique, nous avons développé une technique qui réduit les oscillations de couple et de flux en imposant une fréquence de modulation constante. Cette technique que nous avons appelé DTC à fréquence de modulation constante DTC-SVM (Space Vector Modulation).

**CHAPITRE IV**  
**AMÉLIORATION DE LA DTC**  
**PAR LA MODULATION**  
**VECTORIELLE DTC-SVM**

### **IV.1.introduction**

Dans cette chapitre on présente une méthode modifiée du contrôle direct du couple pour la GADA. Cette commande diffère de la commande DTC classique par l'utilisation d'une modulation vectorielle (aussi appelée SVM pour Space Vector Modulation) qui assure ainsi un fonctionnement à fréquence de modulation constante pour le convertisseur coté rotor. Le couple et flux sont régulés par deux régulateurs type PI classique ou les tables de vérité et les correcteurs à hystérésis ont été éliminés.

Cette commande DTC-SVM possède les avantages du contrôle vectoriel et du DTC classique et permet de surpasser le problème des entractes du couple et de flux. Les régulateurs proportionnel-intégral et la technique de modulation vectorielle sont employés pour obtenir une fréquence de commutation fixe et moins de pulsations de couple et de flux.

### **IV.2 amélioration de la DTC par la modulation vectorielle DTC-SVM**

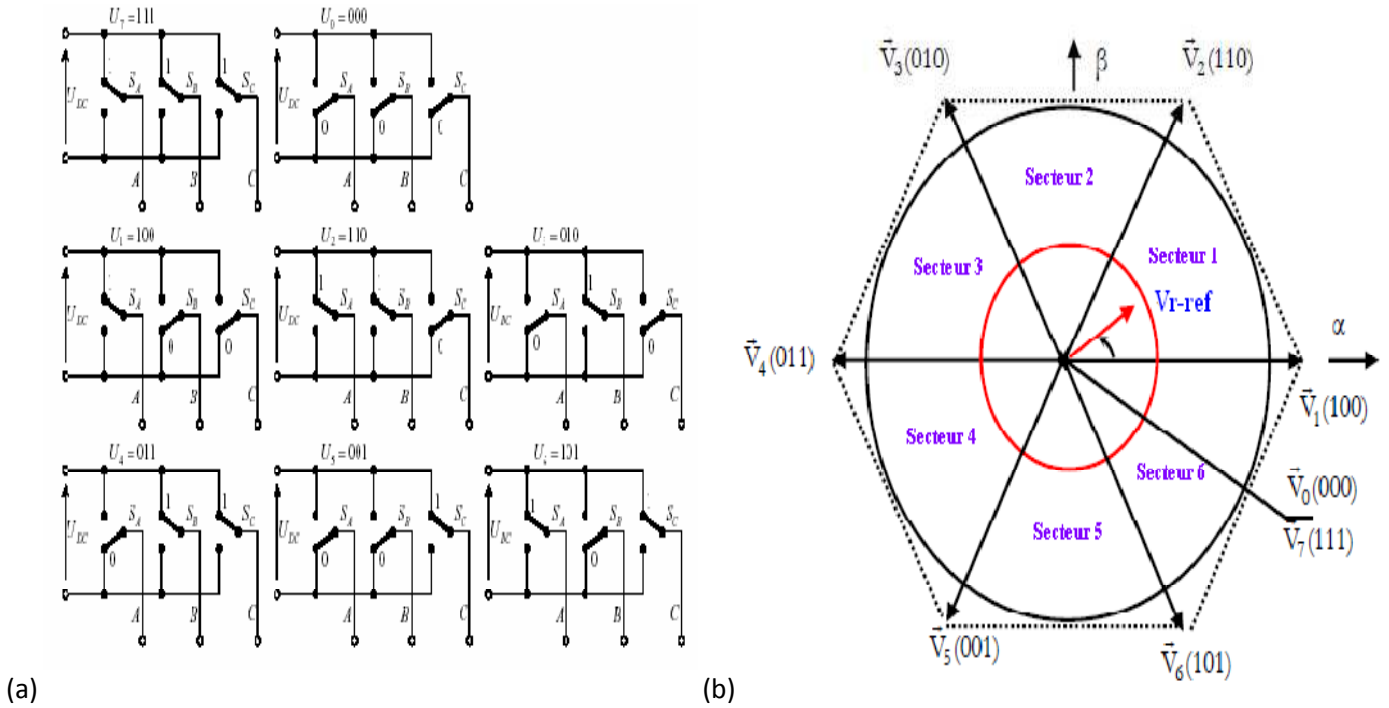
#### **IV.2.1 Principe de la MLI vectorielle SVM**

Le principe de MLI vectorielle, consiste à projeter le vecteur  $V_r$  de tension rotorique désiré sur les deux vecteurs de tension adjacents correspondant à deux états de commutation de convertisseur coté rotor Fig. IV.1.a

Les valeurs de ces projections assurant le calcul des temps de commutations désirées correspondent à deux états non nuls de commutation du convertisseur. Si nous notons  $T_i$  et  $T_{i+1}$  ces deux temps, leur somme doit être inférieure à la période  $T_s$  de commutation du convertisseur. Pour maintenir la fréquence de commutation constante, un état nul du convertisseur CCM est appliqué durant une durée complémentaire à  $T_s$ . [9]

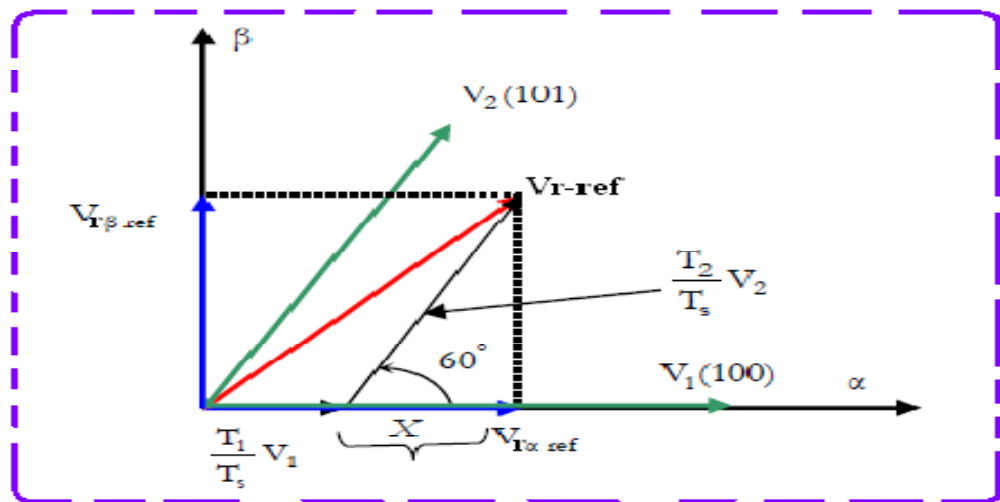
Un vecteur tension de référence  $V_{r-ref}$  est calculé globalement et approximé sur une période de modulation  $T_s$  par un vecteur tension moyen  $V_{r-moy}$  ;ce dernier est élaboré par l'application des vecteurs tensions adjacents et des vecteurs nuls  $V_0$  et  $V_7$ . Les huit vecteurs de tension redéfinis par la combinaison des interrupteurs sont représentés dans le plan  $(\alpha, \beta)$  par la figure (IV.1.b)





**Figure. IV.1.** (a) : États des interrupteurs pour chaque vecteur tension et  
 (b) : Représentation des vecteurs de tension dans le repère  $(\alpha, \beta)$

La figure (IV.2) représente le cas où le vecteur référence se trouve dans le secteur 1 et les vecteurs adjacents sont représentés par  $V_1$  et  $V_2$ . La MLI vectorielle (SVM) consiste à projeter le vecteur de tension statorique de référence  $V_{r-ref}$  désiré sur les deux vecteurs de tension adjacent correspondant  $V_1$  et  $V_2$ . Si nous notons par  $T_1$  et  $T_2$  les deux temps d'application de ces vecteurs  $T_0$ , temps d'application des vecteurs nuls, leur somme doit être inférieure à la période  $T_s$  de commutation du CCM.



**Figure. IV.2.** Décomposition d'un vecteur tension de référence  $V_{r-ref}$ .

le vecteur de tension référence  $V_{r-ref}$  moyenne est donné comme suit :

$$V_{r-ref} T_s = T_1 V_1 + T_2 V_2 \quad T_s = T_1 + T_2 + T_0 \quad (IV.1)$$

Où

$T_s$  =: Représente la période de commutation,

$T_1$  =: Temps d'application du vecteur  $V_1$  ,

$T_2$  : Temps d'application du vecteur  $V_2$  ,

$T_0$  : Durée d'application de la séquence de roue-libre.

En supposant qu'initialement, le vecteur  $V_{r-ref}$  coïncide avec le vecteur  $V_1$  , deux séquences sont actives. La séquence qui correspond au vecteur  $V_1$  est appliquée durant la durée  $T_1$  et la séquence de roue-libre est appliquée durant la durée  $T_0$  . La séquence qui correspond au vecteur  $V_2$  est inactive car la durée  $T_2$  est nulle. Au fur et à mesure que le vecteur  $V_{r-ref}$  s'éloigne du vecteur  $V_1$  et on s'approche du vecteur  $V_2$ .  $T_1$  diminue  $T_2$  et augmente. Quand le vecteur  $V_{r-ref}$ , atteint le vecteur  $V_2$  ,  $T_1$  sera nul et  $T_2$  , sera maximale.

**IV.2.2. Les étapes de la réalisation d'une MLI vectorielle (SVM)**

**1) Détermination des vecteurs tensions de références  $V_{r\alpha}$   $V_{r\beta}$**

A partir de la relation (III.1.a) nous pouvons définir les tensions aux bornes des enroulements de la machine. Pour obtenir ces tensions dans le repère  $(\alpha, \beta)$  nous utiliserons l'équation (3.8), ce qui, pour les huit vecteurs de commutation du CCM, fournira le résultat tableau (IV.1). [9]

$S_a$	$S_b$	$S_c$	$V_{ran}$	$V_{rbn}$	$V_{rcn}$	$V_{r\alpha}$	$V_{r\beta}$
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	$\frac{2U_{bc}}{3}$	$-\frac{U_{bc}}{3}$	$-\frac{U_{bc}}{3}$	$\frac{2U_{bc}}{3}$	0
1	1	0	$\frac{U_{bc}}{3}$	$\frac{U_{bc}}{3}$	$-\frac{2U_{bc}}{3}$	$-\frac{U_{bc}}{3}$	$\frac{U_{bc}}{\sqrt{3}}$
0	1	0	$-\frac{U_{bc}}{3}$	$\frac{2U_{bc}}{3}$	$-\frac{U_{bc}}{3}$	$-\frac{U_{bc}}{3}$	$\frac{U_{bc}}{\sqrt{3}}$
0	1	1	$-\frac{2U_{bc}}{3}$	$\frac{U_{bc}}{3}$	$\frac{U_{bc}}{3}$	$-\frac{2U_{bc}}{3}$	0
0	0	1	$-\frac{U_{bc}}{3}$	$-\frac{U_{bc}}{3}$	$\frac{2U_{bc}}{3}$	$-\frac{U_{bc}}{3}$	$-\frac{U_{bc}}{\sqrt{3}}$
1	0	1	$\frac{U_{bc}}{3}$	$-\frac{2U_{bc}}{3}$	$\frac{U_{bc}}{3}$	$\frac{U_{bc}}{3}$	$-\frac{U_{bc}}{\sqrt{3}}$
1	1	1	0	0	0	0	0

**Table. IV.1.** Tensions rotoriques

**2) Détermination des secteurs**

Le secteur est déterminé selon la position du vecteur  $V_{r-ref}$  dans le plan complexe  $(\alpha, \beta)$ , tel que cette position présente la phase  $\varphi_r$  de ce vecteur définie comme suite :

$$\varphi_r = \arctan \frac{V_{r\beta-ref}}{V_{r\alpha-ref}} \tag{IV.2}$$

La table (IV.2) détermine le secteur  $N_i = (1, 2, 3, 4, 5, 6)$  pour les différents angles  $\varphi_r$

$\varphi_r$	$0 \leq \varphi_r < \frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{3} \leq \varphi_r < \frac{2\pi}{3}$	$\frac{2\pi}{3} \leq \varphi_r < \pi$	$\pi \leq \varphi_r < \frac{4\pi}{3}$	$\frac{4\pi}{3} \leq \varphi_r < \frac{5\pi}{3}$	$\frac{5\pi}{3} \leq \varphi_r < 2\pi$
$N_i$	Secteur 1	Secteur 2	Secteur 3	Secteur 4	Secteur 5	Secteur 6

**Table. IV.2.** Identification du secteur

**3) Calcul des variables X, Y et Z**

La détermination des périodes  $T_1$  et  $T_2$  est donnée par une simple projection, figure IV.2

$$\begin{cases} V_{r\beta-ref} = \frac{T_2}{T_s} |V_2| \cos(30) \\ V_{r\alpha-ref} = \frac{T_1}{T_s} |V_1| + x \\ x = \frac{V_{r\beta-ref}}{\tan 60} \end{cases} \quad (IV.3)$$

les périodes d'application de chaque vecteur sont donné par :

$$T_1 = \frac{T_s}{2U_{bc}} (3V_{r\alpha-ref} - \sqrt{3}V_{r\beta-ref}) \quad (IV.4)$$

$$T_2 = \sqrt{3} \frac{T_s}{U_{bc}} V_{r\beta-ref}$$

Pour le reste de la période en appliquant le vecteur nul. En effectuant le même calcul pour chaque secteur. Le temps d'application des vecteurs peut être lié aux variables X, Y, Z suivants

$$\begin{aligned} x &= \sqrt{3} \frac{T_s}{U_{bc}} V_{r\beta-ref} \\ y &= \frac{T_s}{2U_{bc}} (\sqrt{3}V_{r\beta-ref} + 3V_{r\alpha-ref}) \\ y &= \frac{T_s}{2U_{bc}} (\sqrt{3}V_{r\beta-ref} - 3V_{r\alpha-ref}) \end{aligned} \quad (IV.5)$$

**4) Calcul de  $T_1$  et  $T_2$  pour chaque secteur**

La durée  $T_1$  et  $T_2$  d'application des vecteurs adjacents pour chaque secteur à partir des valeurs de X, Y et Z sont donnés par la table IV.3.

Secteur	1	3	3	4	5	6
$T_i$	-z	Y	X	Z	-y	-x
$T_{i+1}$	X	Z	-y	-x	-z	Y

**Table. IV.3.** Calcul des temps d'application des vecteurs non nuls.

**5) Génération des signaux modulateurs  $T_{aon}$ ,  $T_{bon}$  et  $T_{con}$**

Les trois rapports cycliques nécessaires sont :

$$\begin{aligned} T_{aon} &= \frac{T_s (T_i + T_{i+1})}{2} \\ T_{bon} &= T_{aon} + T_i \\ T_{con} &= T_{bon} + T_{i+1} \end{aligned} \quad (IV.6)$$

**6) Génération des séries d'impulsions  $S_a$ ,  $S_b$  et  $S_c$**

La détermination des signaux de commande ( $S_a$ ,  $S_b$  et  $S_c$ ) en fonction  $T_{xon}$  de est donnée par la table suivante :

Secteur	1	2	3	4	5	6
Signaux						
$S_a$	$T_{aon}$	$T_{bon}$	$T_{con}$	$T_{con}$	$T_{bon}$	$T_{aon}$
$S_b$	$T_{bon}$	$T_{aon}$	$T_{aon}$	$T_{bon}$	$T_{con}$	$T_{con}$
$S_c$	$T_{con}$	$T_{con}$	$T_{bon}$	$T_{aon}$	$T_{aon}$	$T_{bon}$

**Table. IV.4.** signaux de commande des interrupteurs du convertisseur coté rotor CCM.

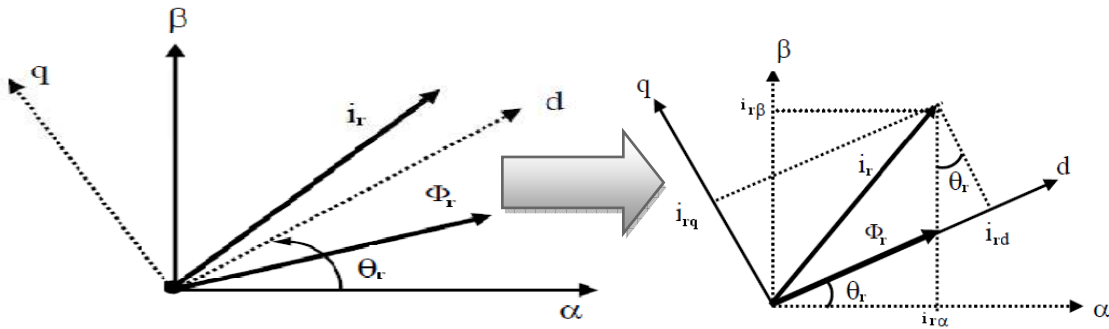
**IV.3. structure de la DTC-SVM**

Cette méthode proposée conserve l'idée de base de la DTC classique. Pour la technique d'orientation du flux rotorique est utilisée. Ainsi, les tensions de commande peuvent être générées par des régulateurs de type PI et imposées par la technique MLI vectorielle (SVM). Le schéma bloc de la structure de contrôle est illustré par la (figure IV.5.)

**IV.3 structure de la DTC-SVM**

**IV.3.1. Contrôle de flux rotorique**

Dans le cas de l'orientation selon le flux rotorique dans le référentiel (d, q) figure (IV.3.a), c'est à dire que l'axe *d* soit confondu avec la direction du vecteur flux rotorique  $\Phi_r$ . La composante d'axe *d* du courant rotorique  $i_{rd}$  est alors directement proportionnelle à l'amplitude du flux rotorique. En régulant et en maintenant constante l'amplitude de la composante du courant rotorique  $i_{rd}$ , nous obtenons ainsi le découplage entre la commande du couple et celle du flux de la machine asynchrone à double alimentation.



**Figure. IV.3.** Représentation vectorielle de la stratégie d'orientation de flux rotorique.

$$\Phi_{rd} = \Phi_r \text{ et } \Phi_{rq} = 0 \tag{IV.7}$$

Alors les tensions rotorique d'axe d et q deviennent:

$$V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_r}{dt}$$

$$V_{rq} = R_r i_{rq} + \omega_r \Phi_r \tag{IV.8}$$

Le couple électromagnétique devient

$$C_{em} = 3/2p\Phi_r i_{rq} \tag{IV.9}$$

Les courants et flux statoriques peuvent être exprimés, en fonctions des courant rotoriques, par

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{1}{L_m} (\Phi_r - L_r i_{rd}) \\ i_{sq} = -\frac{L_r}{L_m} i_{rq} \\ \Phi_{sd} = \frac{L_s}{L_m} (\Phi_r - \sigma L_r i_{rd}) \\ \Phi_{sq} = \frac{\sigma L_r L_s}{L_m} i_{rq} \end{cases} \quad (IV.10)$$

Avec :

A partir de (IV.10) et en tenant compte de la transformée de Laplace, on aura :

$$\Phi_r = \frac{L_r(1+\sigma T_s s) i_{rd} + \sigma T_r i_{rq} \omega_{gl}}{1+T_r s} \quad (IV.11)$$

$$i_{rq} = \frac{T_s \omega_{gl} (\Phi_r + \sigma L_s i_{rd})}{L_r(1+\sigma T_s s)} \quad (IV.12)$$

Avec  $T_s$ ,  $T_r \omega_{gl}$  sont les constante du temps statorique et rotorique et la pulsation de glissement. Ainsi, en exprimant la composante  $d$  du courant rotorique en fonction de la composante  $q$  et du flux rotorique, les tensions rotoriques deviennent :

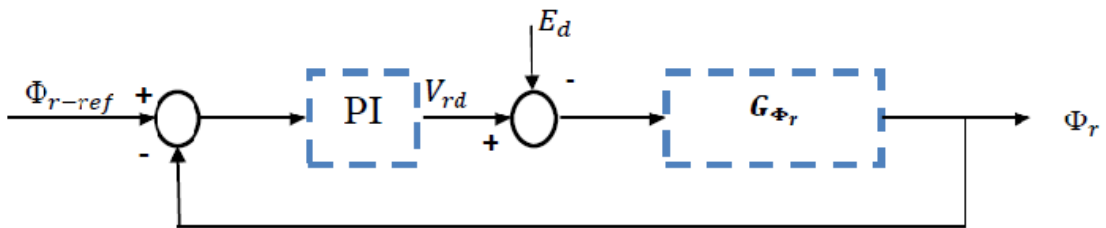
$$\begin{cases} V_{rd} = \frac{\Phi_r}{G_{\Phi_r}} + E_d \\ V_{rd} \approx \omega_r \Phi_r \end{cases} \quad (IV.13)$$

Avec :

$$G_{\Phi_r} = \frac{T_r(1+\sigma T_s s)}{1+(T_r+T_s)s+\sigma T_s T_r s^2} \quad (IV.14)$$

$$E_d = -\frac{\sigma R_r T_r i_{rq} \omega_{gl}}{1+\sigma T_r s} \quad (IV.15)$$

Donc le flux rotorique peut être contrôlé par la composante  $d$  de la tension rotorique. La figure (IV.3.a) montre la relation entre  $\Phi_r$  et  $V_{rd}$  ; un système équivalent du second ordre avec une perturbation  $E_d$ .



**Figure. IV.3.a.** Schéma fonctionnel de la régulation du flux.

### IV.3.2. Contrôle du couple électromagnétique pour DTC-SVM

A partir de l'équation (IV.11), (IV.12), le courant suivant la composante q peut être exprimée par :

$$i_{rd} = \frac{(1-\sigma)T_r / (L_s \phi_r \omega_{gl})}{(1+\sigma T_r s)^2 + (\sigma T_r \omega_{gl})^2} \quad (IV.16)$$

La substitution de (IV.16), dans (IV.9) donne :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \frac{(1-\sigma)T_r / (L_s \phi_r^2 \omega_{gl})}{(1+\sigma T_r s)^2 + (\sigma T_r \omega_{gl})^2} \quad (IV.17)$$

La pulsation de glissement est relativement petite et son carré peut être néglige, donc l'équation (IV.17) devient :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \frac{(1-\sigma)T_r / (L_s \phi_r^2)}{(1+\sigma T_r s)} (\omega_s + \omega_r) \quad (IV.18)$$

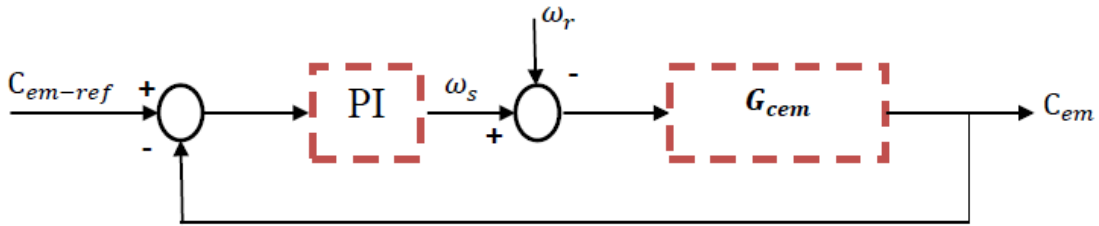
Le couple électromagnétique est proportionnel à la pulsation de glissement, ainsi, l'équation (IV.18) s'écrit comme suit :

$$C_{em} = C_{cem} (\omega_s + \omega_r) \quad (IV.19)$$

Avec :

$$C_{cem} = \frac{3}{2} p \frac{(1-\sigma)T_r / (L_s \phi_r^2)}{(1+\sigma T_r s)} \quad (IV.20)$$

Ainsi que le couple peut être contrôlé par la pulsation statorique, la figure (IV.3.b) montre la relation entre  $C_{em}$  et  $\omega_s$ . Un régulateur PI utilisé pour obtenir les performances désirées et maintenir le couple à sa valeur de référence  $C_{em-ref}$ .



**Figure. IV.3 b.** Schéma fonctionnel de la régulation du couple.

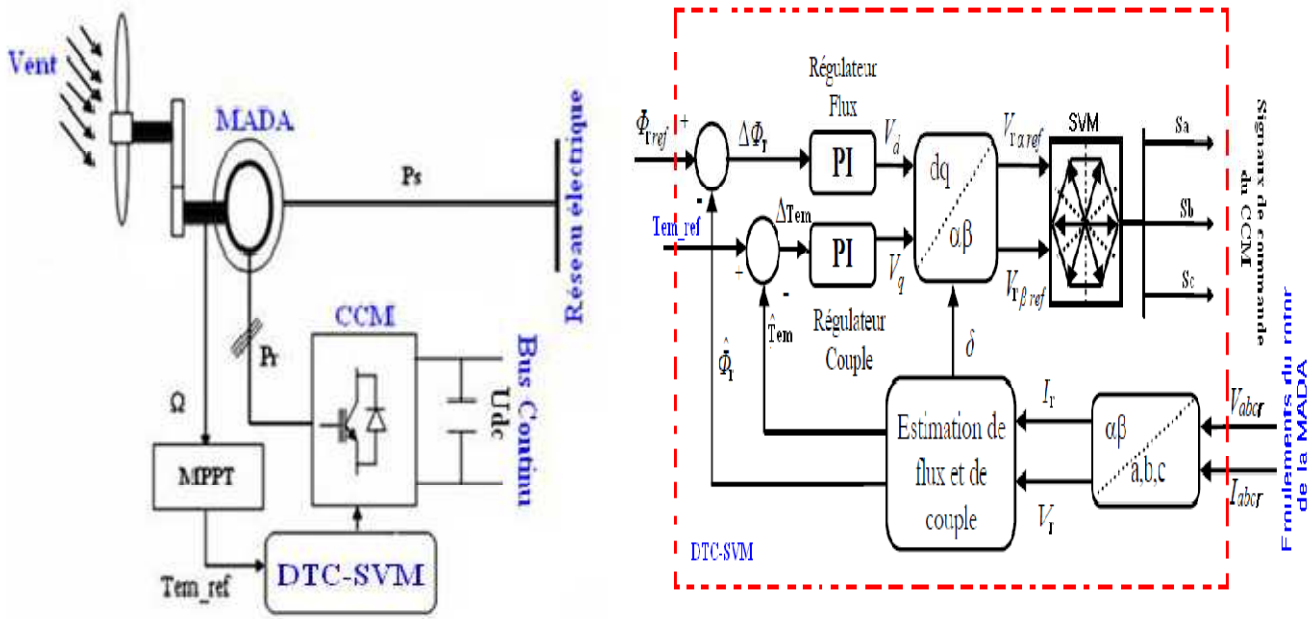
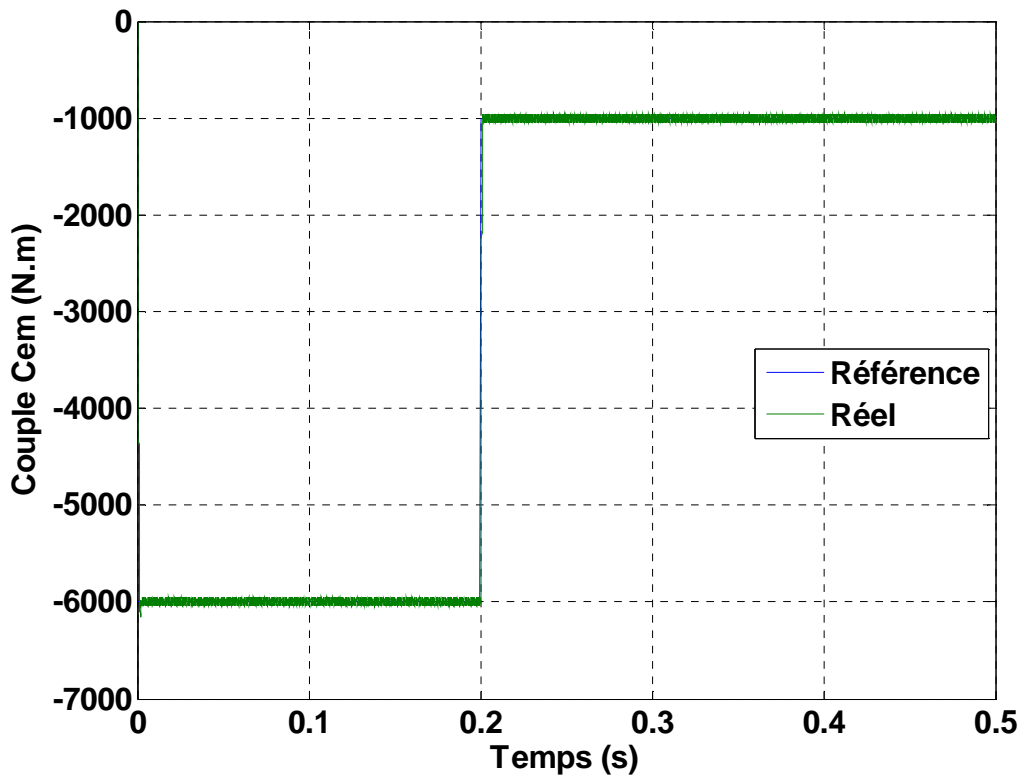


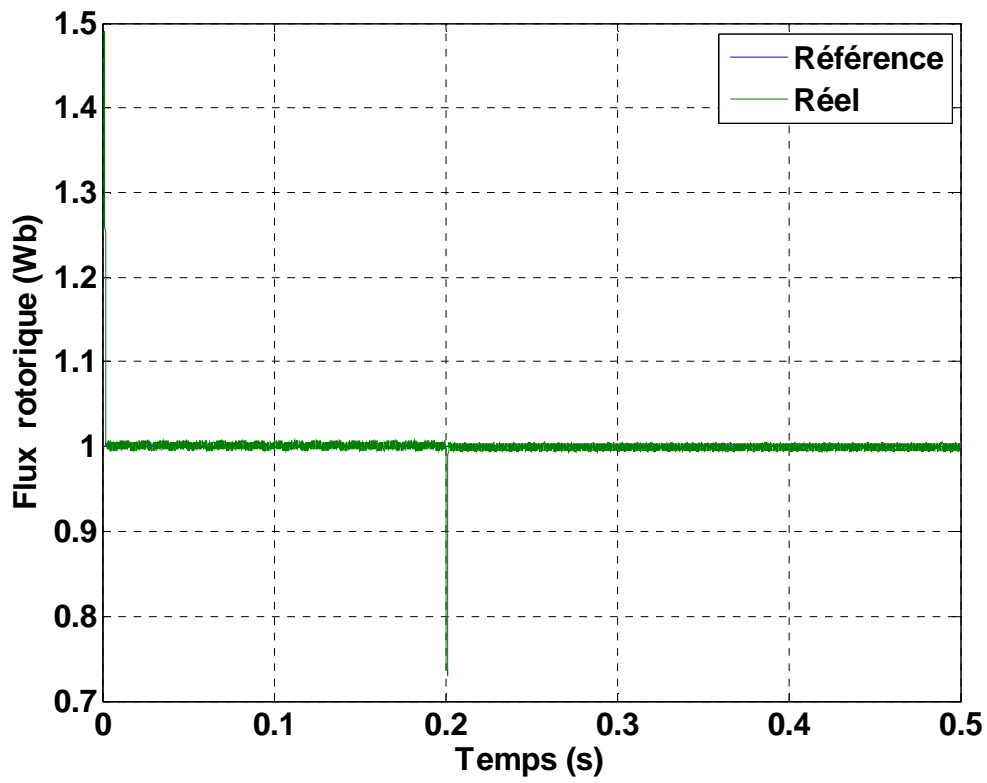
Figure. IV.4. Schéma bloc de la structure de contrôle DTC-SVM appliquée à la MADA

IV.4. Résultats de simulation de la commande DTC-SV

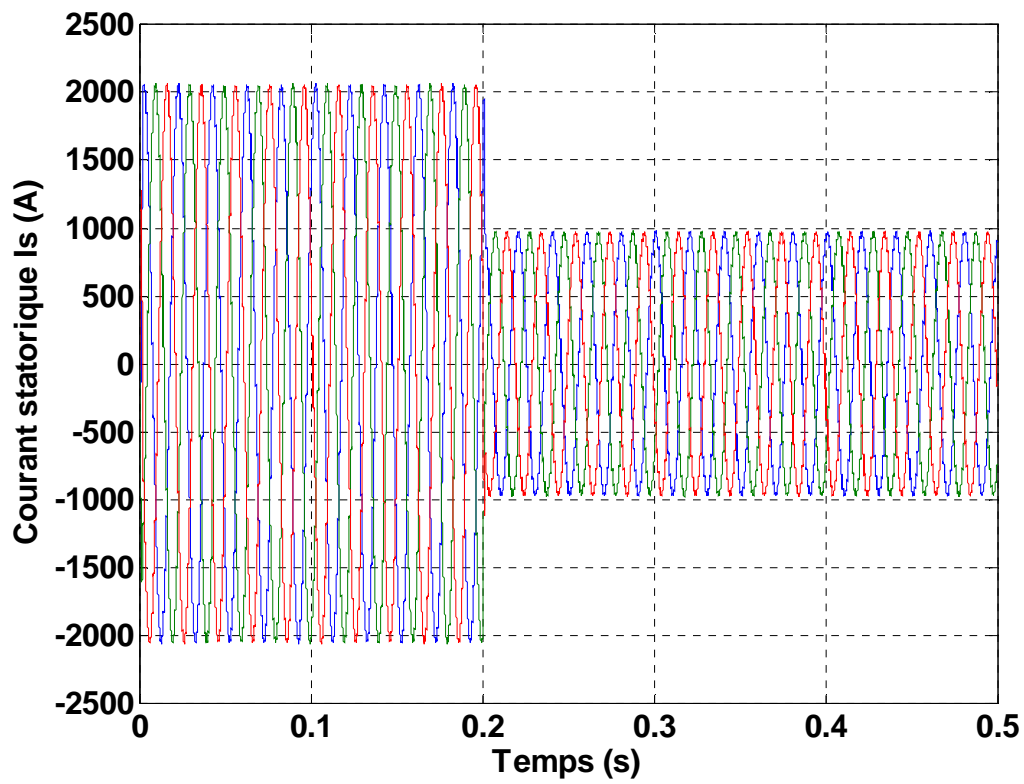
Pour approuver la commande proposée DTC-SVM appliquée au système éolien, on a effectué des testes de simulation dans les mêmes conditions que celle de la technique DTC-C.



( a )

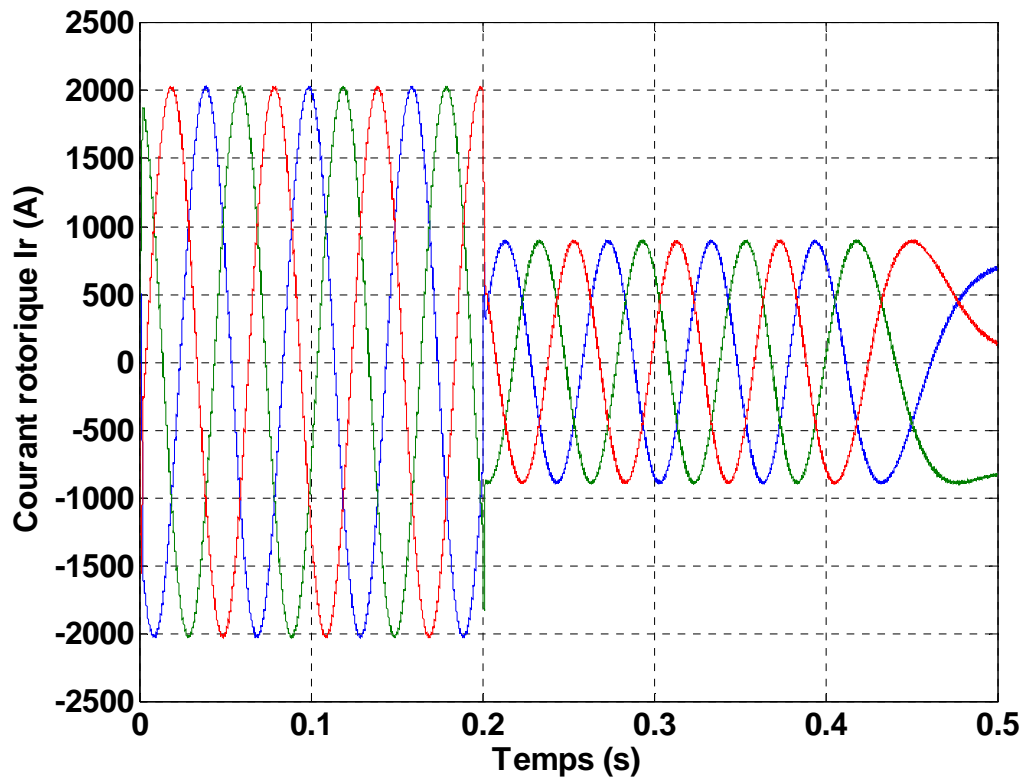


(b)

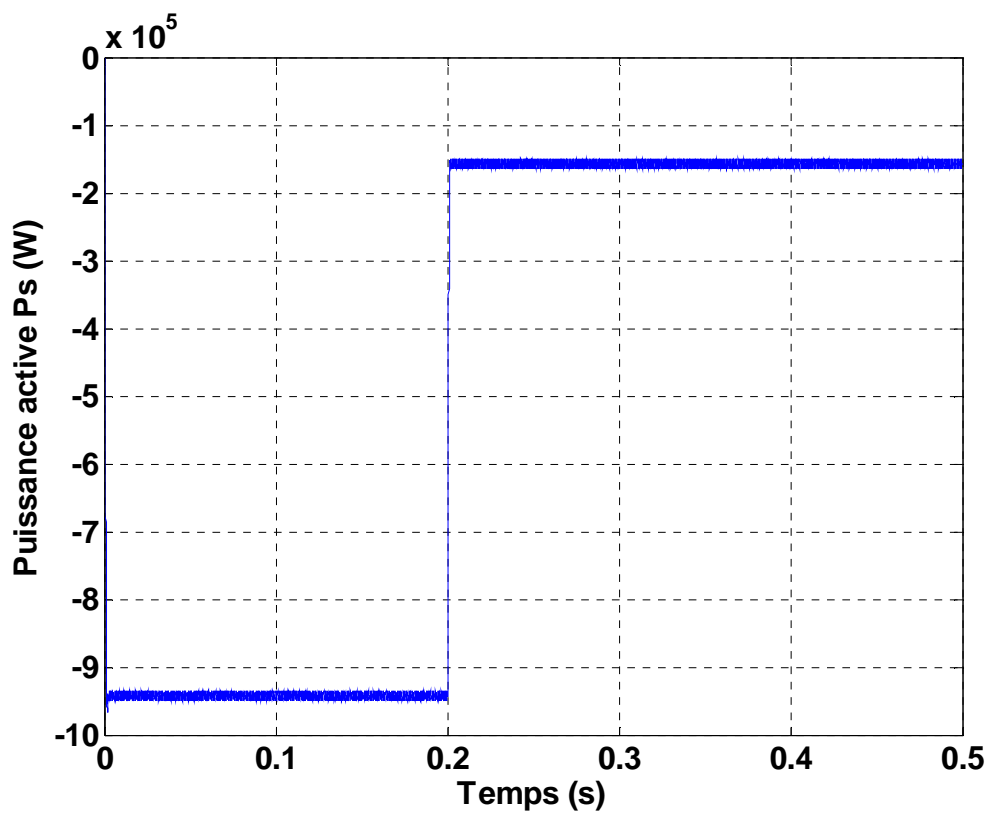


(c)

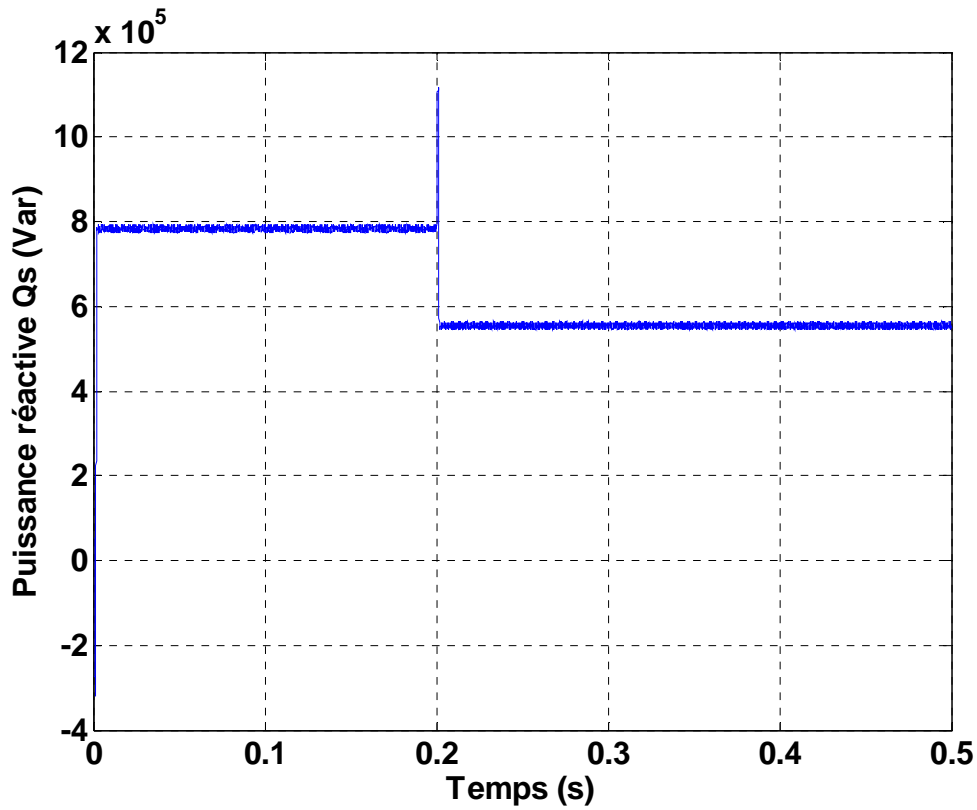




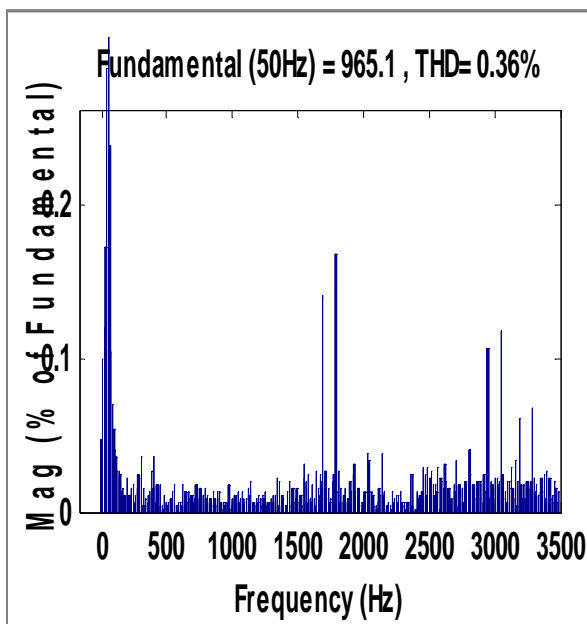
(d)



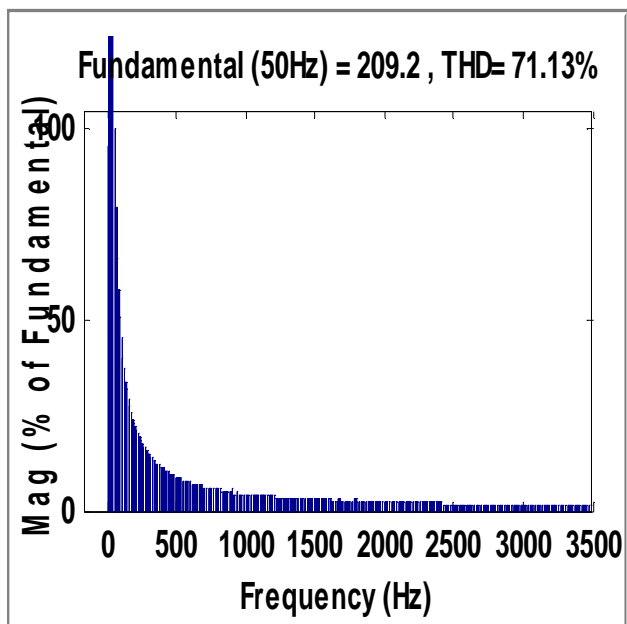
(e)



(f)



(h) THD\_Is\_DTC-SVM



(g) THD\_Ir\_DTC-SVM

**Figure IV.5** Résultats de simulation de la DTC-SVM de la MADA

La figure IV.5 illustre des ondulations faibles du couple et du flux notamment dans le cas d'une alimentation par un onduleur commandé par la technique MLI vectorielle (SVM).

La figure IV.5.c montre l'allure sinusoïdale du courant statorique triphasé. Le courant rotorique est aussi de forme sinusoïdale (figure IV.5.d) mais bruité et haché (figure IV.5.d), ce qui signifie une bonne qualité d'énergie fournie au réseau.

Donc à partir des résultats de la figure IV.5.g-h, on peut remarquer que le taux harmonique des courants est considérablement réduit par rapport à la DTC-C, soit pour les courants statorique (0.36%) (figure IV.5.(h)) ou pour les courant rotoriques (71.13%). (figure IV.5.(g))

Le passage de La puissance active statorique.de -9.500000 W à -1.500000 W s'effectue à t=0 s et à t=0.5 respectivement, On remarque qu'après un temps très court figure IV.5.e

Alors, l'utilisation la technique MLI vectorielle en générale permet d'améliorer certaines performances du DTC classique, tels que les ondulations du couple et de flux et la fréquence de commutation des interrupteurs

### IV.5.Résultat comparaison entre DTC-C et DTC-SVM

Dans le but de tester la robustesse de la commande DTC-SVM de la GADA, l'influence des variations paramétriques sur les performances de la régulation a été également étudiée. Une comparaison entre les deux types de commandes (DTC-C et DTC-SVM) est effectuée dans ce test.

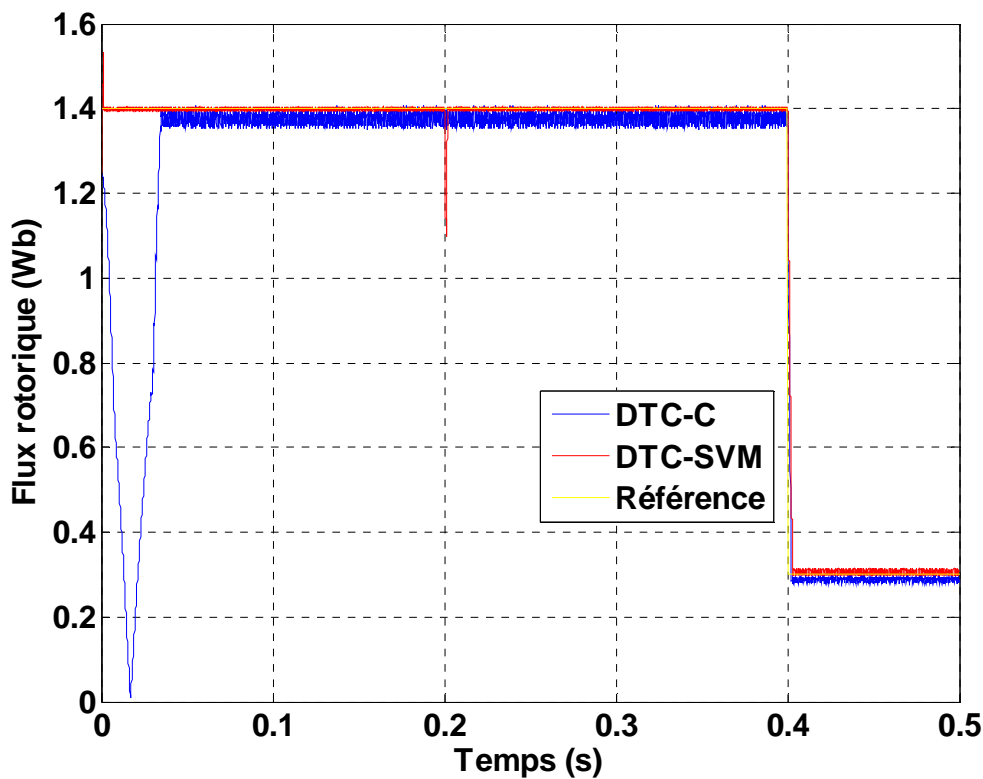


Figure IV.6.a. flux rotorique obtenus (DTC-C, DTC-SVM)

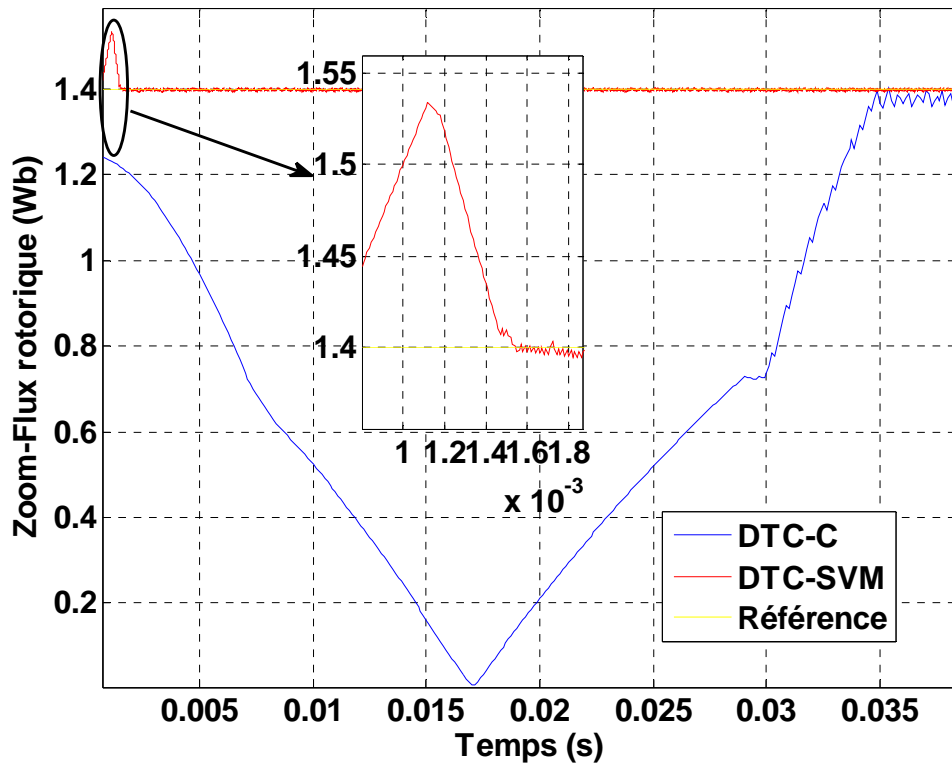


Figure IV.6.a.zoom flux rotorique obtenus (DTC-C, DTC-SVM)

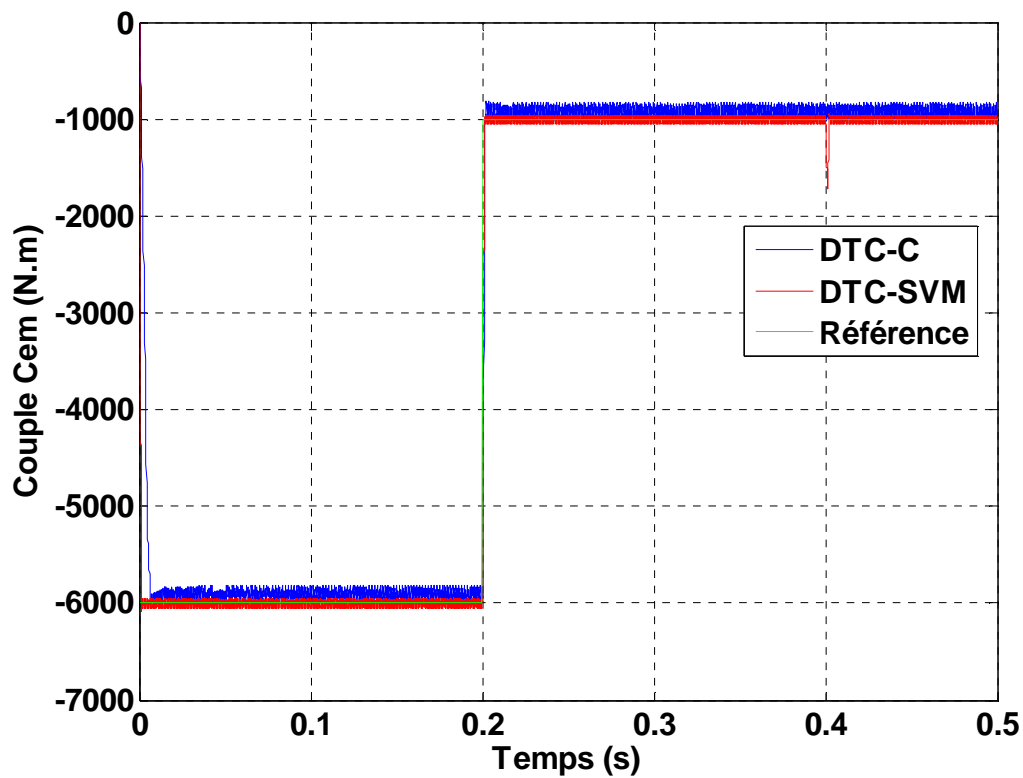


Figure IV.6.b Couple électromagnétiques (DTC-C, DTC-SVM)

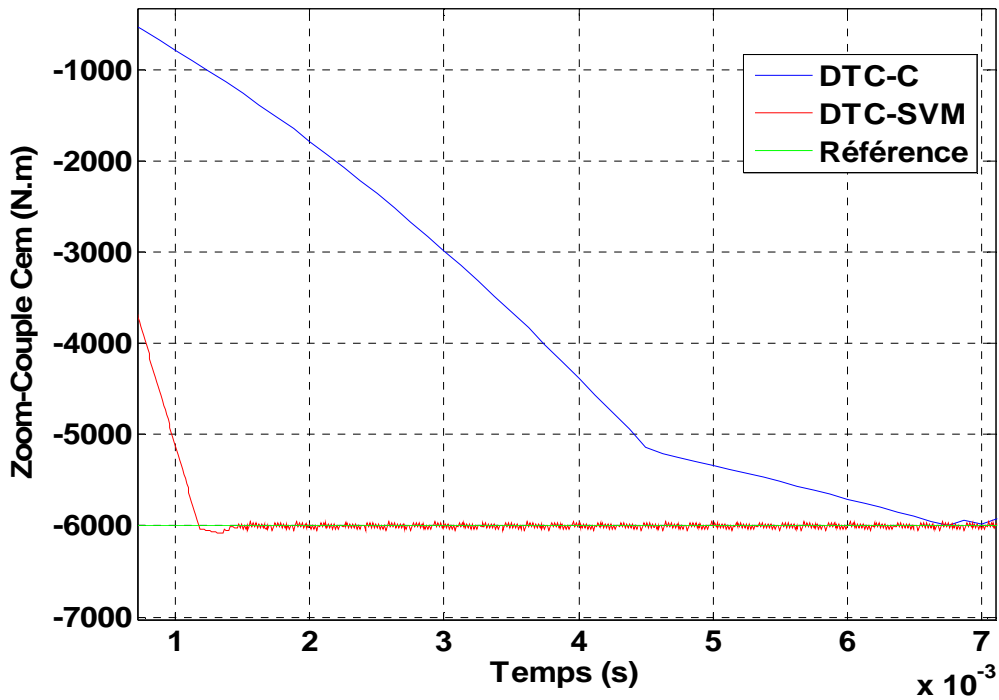


Figure IV.6.b zoom Couple électromagnétiques (DTC-C, DTC-SVM)

Figure IV.6 Couple électromagnétiques et flux rotorique obtenus (DTC-C, DTC-SVM)

Enfin, les résultats des comparaison *entre DTC-C et DTC-SVM* (figure 4.7) montrent que le DTC-SVM est plus robuste que la commande DTC-C. Ces résultats permettent de conclure que le contrôle DTC-SVM est le plus efficace pour réduire l'ondulation de couple et de flux rotorique par rapport au contrôle classique DTC-C.

Performances	DTC-C	DTC-SVM
Minimisation des ondulations de couple	Bien	Très bon
Minimisation des ondulations de flux	Bien	Très bon
Temps de réponse (ms), Flux rotorique	3.5	1.5
Temps de réponse (ms), Couple Cem	7	1.2
THD (%) Ir	76.01	71.13
THD (%) Is	0.98	0.36

Table. IV.5: comparaison Performances entre DTC-C et DTC-SVM

## **IV.6 Conclusion**

Les résultats de simulation obtenus ont montrés que Cette technique que nous avons appelé DTC à fréquence de modulation constante DTC-SVM (Space Vector Modulation). Le contrôle DTC-SVM proposé conserve l'idée de base de la commande DTC classique et la technique d'orientation du flux rotorique est utilisée. Dans ce travail la table de commutation est remplacée par deux régulateurs PI, un pour le couple et l'autre pour le flux afin de générer les tensions de commande. Cette structure de commande a été employée parce qu'elle dispose les avantages du contrôle vectoriel et du contrôle direct du couple et permet de surpasser les problèmes de la DTC classique. Les résultats de simulation de la commande DTC-SVM ont confirmés l'amélioration des performances et les avantages à savoir, la maîtrise de la fréquence de commutation. Ces privilèges ont permis la réduction des harmoniques dans notre système de conversion d'énergie éolienne.

## Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail est d'étudier et de réaliser par la simulation numérique une commande de la génératrice asynchrone double alimentation qui peut être utilisée dans la production de l'énergie éolienne. Nous avons choisis deux stratégies de commande DTC-C DTC-SVM

Le premier chapitre nous a permis de dresser un panel des solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel de notions fondamentales nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leurs modes de fonctionnement ont été décrits. Ensuite on a présenté les différentes associations machine-convertisseur statique, utilisées pour la conversion éolienne

Dans le deuxième chapitre, l'intérêt a été porté sur la modélisation de la chaîne de conversion éolienne à base de la MADA. Dans cette partie, des modèles analytiques des différents organes mécaniques constituant le système éolien ont été établis. Cette modélisation se démarque principalement par l'approche différentielle qui a été faite de la partie mécanique qui fait appel aux calculs d'aérodynamique pour déterminer les relations liant la vitesse du vent, le couple et la vitesse de la turbine. et .La génératrice asynchrone est destinée pour la production d'énergie dans le domaine éolien, il est donc très utile de raisonner en terme de puissance. Pour cela, la commande vectorielle élaborée dans ce chapitre est en puissance active et réactive statoriques . Deux méthodes ont été envisagées: la commande directe (CVD) et la commande indirecte (CVI) Dans cette partie, on a présenté l'étude théorique de la commande vectorielle, ou on a exprimé les grandeurs statoriques de la GADA en fonction des grandeurs rotoriques ayant pour but le pilotage de la GADA par le rotor

Dans le troisième chapitre, la technique de la commande directe du couple (DTC) d'une GADA a été élaborée. Les résultats de simulation de la GADA nous ont permis de juger la qualité de la commande qui est caractérisée par l'absence de dépassement par rapport au consigne et par des faibles oscillations transitoires et des courts temps de réponse. En outre, la fréquence de commutation est variable et difficile à maîtriser du fait de l'utilisation des contrôleurs à hystérésis. Ce point constitue l'un des inconvénients majeurs de la DTC.

Dans le quatrième chapitre Les résultats de simulation obtenus ont montré que Cette technique que nous avons appelé DTC à fréquence de modulation constante DTC-SVM (Space Vector Modulation). Le contrôle DTC-SVM proposé conserve l'idée de base de la commande DTC classique et la technique d'orientation du flux rotorique est utilisée ,et les résultats des *comparaison entre DTC-C et DTC-SVM* montrent que le DTC-SVM est plus robuste que la DTC-C en présence de variations paramétriques du GADA. Ces résultats permettent de conclure que le contrôle DTC-SVM est le plus efficace pour réduire l'ondulation de couple et de flux rotorique par rapport au contrôle classique DTC-C.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE**

- [1] K. AKKOUCHI, "Commande directe du couple (DTC) d'une machine asynchrone", mémoire de magister, université Badji Mokhtar- Annaba. 2007.
- [2] H. M. Amine, Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques, Mémoire Magister en Electrotechnique Sétif, 2012.
- [3] B. A. ASMA, Etude de la commande d'un système éolien basé sur une GADA, Université Hadj Lakhdar - Batna, 2016.
- [4] H. BEKHADA, Contrôle Robuste d'aérogénérateur, Mémoire De Magister En Génie Electrique, école normale supérieure de l'enseignement technologique d'Oran, 2011/2012.
- [5] Y. BEKAKRA, "Contribution à l'étude et à la commande robuste d'un aérogénérateur asynchrone à double alimentation", Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra. 21/10/2014.
- [6] Saïah. BEKKAR, Djelloul. SAIAHA, Amine. Boudghene. STAMBOULI, "Prospective analysis for a long-term optimal energy mix planning in Algeria: Towards high electricity generation security in 2062", *Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 73, Pages 26-43, June 2017*.
- [7] L. BENALIA, "Commande en tension des moteurs à induction double alimentés", thèse doctorat, Université de Batna. 02 /06/2010.
- [8] B. A. Ben Nadji Hocine, commande de la puissance active et réactive du GADA par la méthode de mode glissant, El-Oued, septembre 2015
- [9] M. Z. BOUDJEMAA, M. BOUNADJA, Commande Non Linéaire par retour d'état d'un Moteur Asynchrone à Double Alimentation par Régulateur PI-Flou, Revue des Sciences et de la Technologie –RST- Volume 1 N°2, janvier 2010.
- [10] **Z. Boudjema**, " Etude et commande d'un système de production d'électricité renouvelable locale (énergie éolienne et photovoltaïque) ";Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université Djillali Liabes, Sidi Bel-Abbes, Algérie, Février 2015.
- [11] F. BOUMARAF, "Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle", thèse de doctorat, université de Batna. 24/06/2014.
- [12] A. BOYETTE, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne", thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy . 11/12/2006.
- [13] A. BOYETTE, Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne, Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, 11 décembre 2006
- [14] A. CHIKHI "Commande Directe du Couple du Moteur Asynchrone-Apport de la Logique Floue", mémoire de magister, Université de Batna. 2008
- [15] A. DENDOUGA, "Contrôle de Puissance Active et Réactive de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (DFIG) ", mémoire de magister, Université de Batna. 2010 .
- [16] A. ELBACHA, M. T. LAMCHICH, M. CHERKAOUI and Y. ZIDANI. "Contrôle direct de couple d'une machine asynchrone, système de régulation de



vitesse avec anti emballement" .Physical and Chemical News (PCN). Morocco. October 2005..

[17] P. Frédéric, ETUDE ET COMMANDE DE GENERATRICES ASYNCHRONES POUR L'UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE -Machine asynchrone à cage autonome -Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, Thèse de Doctorat en Electronique et Génie Electrique à l'Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.

[18] T. Grinoux, R. Gibert, P. Neau, C. Buthion, " Eoliennes en milieu urbain -État de l'art", Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies «Il-de-France » Actualisation"; janvier 2006 (P.SALVI), pp. 1-129.

[19] Brahim HADDAH, Abdelkrim LIAZID, Paula FERREIRA, "A multi-criteria approach to rank renewables for the Algerian electricity system", *Renewable Energy Vol. 107*, pp. 462-472, July 2017.

[20] M.A HASSAD, "Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques", Mémoire de Magister, université Sétif 1 (Algérie).2012.

[21] M. T LATRECHE, "Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif 24 /06 /2012.

[22] P. LECONTE, M. RAPIN, E. SZECHENYI, "Éoliennes", Techniques de l'Ingénieur. 04/11/2008.

[23] M. LOPEZ, "contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée," *Thèse Doctorat, Université de Paris-Sud11, France, 2007.*

[24] A. MELLOUL, "Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à doublealimentation d'une éolienne", mémoire de magister université Ferhat Abbas — Sétif07/06/2011.

[25] B. Meriem, Contribution à la Commande Robuste de la Machine Asynchrone à Double Alimentation MADA, Mémoire De Magister En Génie Electrique Ecole Nationale Polytechnique d'Oran, 2013 / 2014.

[26] S. METATLA, Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à Base d'une MADA, mémoire de magister Ecole Nationale polytechnique, 2009

[27] S. MOKRANE, " modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération", université du Québec en Abitibi-Temiscamingue, mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie. Août 2013.

[28] A.Moualdia, MO.Mahmoudi, L.Nezli "DPC and DTC Control of a Wind Speed Based on the Doubly Fed Asynchronous Machine," *Journal of Electrical Engineering JEE*, vol. 12, Edition.2, pp 39-46, 2010.

[29] A.Moualdia, MO.Mahmoudi, L.Nezli, "Commande DTC et DPC d'un Eolienne à Vitesse Variable Basée sur la MADA", *International Conférence on Energie Renewable, (ICRE'12)*, Université A.Mira, Bejaia, Algeria, Avril-15- 16, 2012

[30] S. Belkacem, F. Nacéri and R. Abdessemed, "Improvement in DTC-SVM of AC Drives Using a New Robust Adaptive Control Algorithm" Accepted for Publication at

the International Journal of Control Automation and System, IJCAS, vol. 9, no. 2, 2011.

[31] A.L.NEMMOUR, contribution à la command véctorielle de la machine asynchrone à double alimentation, mémoire de magister, université de Batna, Algerie , 2002.

[32] Frederic POITIERS, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-Machine asynchrone à cage autonome- Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau", *Thèse Doctorat en Sciences en Electronique et Génie Electrique, Université de Nantes Français, 19 décembre 2003.*

[33] Lea RIACHY, "Contribution à la commande d'un onduleur multi niveaux, destinée aux énergies renouvelables, en vue de réduire le déséquilibre dans les réseaux électriques ", *Thèse Doctorat en Génie Electrique, Université le Havre Normandie, 15 Décembre 2017.*

[34] S. SARRAY. "Étude et simulation d'une commande directe de couple pour l'entraînement électrique d'une machine asynchrone". Thèse de maitrise en génie de la production automatisée M.ING doctorat. Montréal / décembre 2000.

[35] A. M. SIDDO .&. I. S. NOUHOU, Étude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne, Mémoire de fin étude d'ingénieur en électrotechnique, École Nationale Polytechnique, El-Harrach, 2007.

[36] H. TAMRABET, Robustesse d'un Contrôle Vectoriel de Structure Minimale d'une Machine Asynchrone, mémoire de magister, université de Batna, 20 /05 /2006.

[37] Z. TIR, "Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif. 06 /07 /2010.

[38] M. K. TOUATI, "Étude D'une Génératrice Éolienne Connectée Au Réseau Électrique", Mémoire de Magister, Université de Batna, 15/01/2015.

[39] **J. Vergauwe, André Martinez, Alberto Ribas**, " Optimization of a wind turbine using permanent magnet synchronous generator (PMSG)"; Proceedings of the International Conference on Renewable and power Quality, Balearic Island, ICREPQ 2006.

[40] D. YUCEF, Commande par réseaux de neurones d'une MADA intégrée à un système éolien, MÉMOIRE Magister en Électrotechnique, SIDI BEL-ABBÈS, 2009.

[41] , M. Zelechowski, Space Vector Modulated – Direct Torque Controlled (DTC-SVM) Inverter- Fed Induction Motor Drive, Ph.D Thesis, Warsaw University of Technology, 2005.

## Résumé :

Cette thèse traite la modélisation, le contrôle et la simulation d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) connectée directement au réseau par son stator et pilotée par son rotor par deux convertisseurs statiques. L'idée consiste à implémenter un système de contrôle découplé de la GADA pour assurer une meilleure qualité d'énergie et rendre le système insensible aux perturbations. deux types de contrôle vectoriel ont fait l'objet de l'analyse pour le contrôle indépendant de la puissance active et réactive : la commande directe et la commande indirecte, basées sur des régulateurs classiques de type PI.

Nous avons choisis deux stratégies de commande DTC-C et DTC -SVM. Les résultats de simulation de la GADA nous ont permis de juger la qualité de la commande qui est caractérisée par l'absence de dépassement par rapport au consigne et par des faibles oscillations transitoires et des courts temps de réponse. En outre, la fréquence de commutation est variable et difficile à maîtriser du fait de l'utilisation des contrôleurs à hystérésis.

Les résultats de simulation de la commande DTC-SVM ont confirmés l'amélioration des performances et les avantages à savoir la maîtrise de la fréquence de commutation. Ces privilèges ont permis la réduction des harmoniques (THD) dans notre système de conversion d'énergie éolienne.

ملخص :

تتناول هذه الأطروحة النمذجة و التحكم والمحاكاة لنظام تحويل طاقة الرياح على أساس مولد غير مترامن ثنائي الطاقة (GADA) متصل مباشرة بالشبكة عن طريق الجزء الثابت ويدفعه الدوار بواسطة محولين ثابتين. الفكرة هي تنفيذ نظام تحكم منفصل عن GADA لضمان جودة أفضل للطاقة وجعل النظام غير حساس للاضطرابات. تم تحليل نوعين من التحكم الشعاعي كانتا موضوع تحليل من أجل التحكم المستقل في القدرة النشطة والمتفاعلة: التحكم المباشر والتحكم غير المباشر، استنادًا إلى المنظمين التقليديين من نوع PI.

لقد اخترنا استراتيجيتين للتحكم DTC-C و DTC-SVM. سمحت لنا نتائج المحاكاة لـ GADA بالتحكم على جودة الأمر، والذي يتميز بغياب التجاوز من نقطة الضبط وبتذبذبات عابرة منخفضة وأوقات استجابة قصيرة. بالإضافة إلى ذلك، فإن تردد التبديل متغير ويصعب التحكم فيه بسبب استخدام أجهزة التحكم في التخلفية أكدت نتائج المحاكاة لعنصر التحكم DTC-SVM الأداء المحسن وفوائد التحكم في تردد التبديل. لقد مكنت هذه الامتيازات من تقليل التوافقيات (THD) في نظام تحويل طاقة الرياح لدينا

Abstract :

This thesis deals with the modeling, control and simulation of a wind energy conversion system based on a dual power asynchronous generator (GADA) connected directly to the grid by a stator and driven by a rotor by two static transformers. The idea is to implement a control system separate from GADA to ensure better power quality and make the system insensitive to disturbances. Two types of radial control that were the subject of analysis were analyzed for independent control of active and reactive power: direct control and indirect control, based on conventional PI-type regulators.

We chose two control strategies DTC-C and DTC -SVM. The simulation results of GADA allowed us to judge the quality of the command, which is characterized by the absence of overshoot from the setpoint and by low transient oscillations and short response times. In addition, the switching frequency is variable and difficult to control due to the use of hysteresis controllers

The simulation results of the DTC-SVM control confirmed the improved performance and benefits of switching frequency control. These advantages have enabled the reduction of harmonics (THD) in our wind power conversion system

