

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

N° : .....



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE ELECTRIQUE

OPTION : ELECTROTECHNIQUE

**Mémoire présenté pour l'obtention**

**Du diplôme de Master Académique**

**Par : Leyla Deghiche**

Iman Nour Elhouda Menallah

**Intitulé**

**Contrôle de puissance généré par machine asynchrone  
double alimentation dans système éolienne.**

**Soutenu devant le jury composé de :**

Mr. Riyadh Rouabhi	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
Mr. Abdelmadjid Chouchou	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Encadreur
Mr. Mr. Hellali Lallouani	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Co-Encadreur
Ms. BELOUNIS Ouassila	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2022 / 2023**

# شكر وتقدير

الحمد لله وكفى والصلاة على الحبيب المصطفى ومن وفى أما بعد

لقول رسولنا الكريم محمد صلى الله عليه وسلم: « لا يَشْكُرُ الله مَنْ لا يَشْكُرُ النَّاسَ »

الحمد لله الذي وفقنا لتثمين هذه الخطوة في مسيرتنا الدراسية بمذكرتنا هذه ثمرة الجهد والنجاح بفضلته تعالى.

نتقدم بالشكر إلى أولياء أمورنا فهم حجر الأساس وبذرة الخير والعتاء ونتمنى من الله دوام صحتهم وأن يبقوا تاجاً على رؤوسنا.

بداية نشكر المشرف الاستاذ **هاللي نعلواني** والدكتور **عبد المجيد شوشو** لما بذله معنا من عطاء وتوجيهات طيلة فترة الدراسة وكان حريصاً على صنع طلبة علم ذو مستوى يليق بالمستوى الأكاديمي. كما نكن الشكر والاحترام تقديراً لجهود اللجنة العلمية كل باسمه، التي ستبذل مجهوداً في قراءة هذه المذكرة وتقييمها

وشكر خاص وتحية احترام وتقدير كبيرين للدكتور **بركاتي السعيد** على ما قدمه لنا في مشوارنا الدراسي ومساعدتنا علمياً ومعنوياً لإكمال

هذه الدراسة بمثل هؤلاء الأشخاص تنهض الأمم ويعلو شأنها.

كما أننا نشكر كل من الدكاترة الأفاضل الذين بذلوا معنا مجهوداتهم وأظهروا لنا حبهم للطالب وإخلاصهم لعملهم

الأستاذ **اسامة موسى**.

والأستاذ **معزوز ابوبكر الصديق**.

تحية شكر وامتنان لطواقم الجامعة كل باسمه ولقبه ومنصبه.

شكر لكم جميعاً

## الإهداء

لَكَ الْحَمْدُ رَبِّي عَلَى كَثِيرِ فَضْلِكَ وَجَمِيلِ عَطَانِكَ وَجُودِكَ ، وَالصَّلَاةُ وَالسَّلَامُ عَلَى مَنْ لَا نَبِيَّ بَعْدَهُ ،

إِلَى مَنْ اتَّسَعَ قَلْبُهُ لِيَحْتَوِيَ حُلْمِي حِينَ ضَافَتِ الدُّنْيَا وَالِدِي الْحَبِيبَ ، الرَّجُلَ الَّذِي احْتَرَقَ لِأُضْيَاءِ فَكَانَتْ نَظْرَتُهُ إِلَيَّ فَرَحْتِي وَحُبِّي لَهُ حَيَاتِي ، حَمَلْتَ أَمْسَهُ بِكُلِّ فَخْرٍ ، عَظِيمٍ وَفِي عَيْنِي أَعْظَمَ الْأَبَاءِ ، الرَّجُلَ الَّذِي لَطَالَمَا تَقَطَّرَ قَلْبُهُ شَوْقًا أَنْ يَرَانِي هُنَا ، وَهَذَا نَحْنُ نَحْصِدُ نَجَا حَنَا سَوِيًّا فَلَا أَحَدٌ يَسْتَحِقُّ الْإِهْدَاءَ قَبْلَكَ أَبِي الْحَبِيبِ (دغيش المخلوفي).

إِلَى جَنَّتِي ، إِلَيَّ أَعْظَمَ نِعْمَةً أَنْعَمَنِي اللَّهُ بِهَا وَأَوْصَانِي ، إِلَيَّ مَنْ قَالَ فِيهَا النَّبِيُّ الْجَنَّةَ تَحْتَ قَدَمَيْهَا ، إِلَيَّ مَصْدَرُ قُوَّتِي وَعَزِي وَافْتِخَارِي ، إِلَيَّ مَنْ بِتَعْلِيمَاتِهَا نَلْتُ عِزًّا وَشَرَفًا وَشَهَادَةً ، إِلَيَّ مَنْ عَلَّمْتَنِي فَاتِحَةَ الْقُرْآنِ وَبِهَا سَلَكْتُ دُرُوبَ الْعِلْمِ وَالنَّجَاحِ .

إِلَى أَخِي فُوَادٍ وَأَخَوَاتِي أَسْمَاءَ وَيُسْرَى وَتَفْوَى ، السَّنْدَ وَحَمَاهُ ظَهْرِي أَصْدِقَاءَ حَيَاتِي ، لَمْ أَخْتَارِكُمْ أَنَا فَاخْتَارَكُمُ اللَّهُ إِلَيَّ أَنْ تَكْتُبُوا فِي حَيَاتِي فَعَرَفَ فِي عِلْمِهِ أَنَّكُمْ نَعَمَ الْإِخْوَةَ وَالسَّنْدَ ، وَكَمَا اتَّفَقْنَا لَمْ يَكُنْ نَجَاحِي بَلْ نَجَاحُنَا جَمِيعًا دُمْتُمْ عَلَى الْوَعْدِ ، وَإِلَى كُلِّ عَائِلَةٍ دغيش .

إِلَى جَدَّتِي وَعَمَّتِي وَزَوْجُهَا شُكْرًا خَاصًّا لَكُمْ .

إِلَى كُلِّ الْأَصْدِقَاءِ الَّذِينَ رَافَقُونِي فِي مَسِيرَتِي الدِّرَاسِيَّةِ شُكْرًا جَزِيلًا .

أَهْدِي ثَمْرَةَ هَذَا الْعَمَلِ الْمُتَوَاضِعِ ، رَاجِيَةً مِنَ اللَّهِ عِزًّا وَجَلًّا أَنْ يَجْعَلَهَا ثَمْرَةَ طَيْبَةٍ يَسْتَنْفَعُ بِهَا طَلِبَةُ الْعِلْمِ .

# الاهراء

## بسم الله الرحمن الرحيم

الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ الَّذِي مَنَحَنَا الْقُوَّةَ وَالسَّدَادَ وَإِلَى مَنْ بَلَغَ الرِّسَالَةَ وَأَدَّى الْأَمَانَةَ، وَنُصِّحَ الْأُمَّةَ . إِلَى نَبِيِّنَا الْكَرِيمِ وَشَفِيعِ

بِعِ الْأُمَّةِ إِلَى يَوْمِ الدِّينِ

سَيِّدِنَا وَحَبِيبِنَا (مُحَمَّدٌ صَلَّى اللَّهُ عَلَيْهِ وَسَلَّمَ)

وَلِقَوْلِ النَّبِيِّ ﷺ : " مَنْ لَا يَشْكُرُ النَّاسَ لَا يَشْكُرُ اللَّهَ "

أَوَّلًا وَقَبْلَ كُلِّ شَيْءٍ ، أودَّ أَنْ أَشْكُرَ اللَّهَ عَلَى الْقُدْرَةِ وَالصَّبْرِ وَالتَّوَجُّبِ الَّذِي مُنَحَنِي إِيَّاهُمْ طَوَالَ هَذِهِ الْفَتْرَةِ  
إِلَى أَبِي « مناللة مصطفى » الَّذِي وَهَبَهُ اللَّهُ بِالْهَيْبَةِ وَ الْوَقَارِ وَالسَّيْرَةِ إِلَيَّ تَبَيُّضَ الْوَجْهِ رَاعِيَهَا . . . طَارِيَهُ لِمَا أَمَرَ  
بِمَجْلِسٍ يَقُولُونَ بِشَرَفِي وَكَلِمَةَ النِّعَمِ تَأْخُذُ النَّسَمَةَ وَمَعَانِيهَا . . . وَأَبُو الْمَكَارِمِ وَسَيِّدَهَا وَرَاعِيَهَا .  
إِلَى سَيِّدِهِ الْكُونِ أُمِّي سِرِّ الْوُجُودِ . . . إِلَى أَعْظَمِ نِعْمَةٍ أَنْعَمَنِي اللَّهُ بِهَا وَأَوْصَانِي عَلَيْهَا ، إِلَى مَنْ قَالَ فِيهَا النَّبِيُّ  
الْجَنَّةُ تَحْتَ قَدَمَيْهَا ، إِلَى مَنْ أَرْفَعُ رَأْسِي فُخْرًا بِهَا ، إِلَى إِخْوَتِي وَأَخْتِي وَحِيدَتِي السَّنَدِ وَحَمَاةِ ظَهْرِي إِلَى  
أَصْدِقَاءِ وَإِخْوَاتِي حَيَاتِي ، لَمْ أَخْتَارِكُمْ أَنَا بَلْ اخْتَارَكُمُ اللَّهُ إِلَى أَنْ تَكْتُبُوا فِي حَيَاتِي فَعَرَفَ فِي عِلْمِهِ أَنَّكُمْ نَعَمُ

الإخوة والسند، وكما ان هذا النجاح لم يكن نجاحي لوحدي بل نجاحنا جميعًا دُمتم على الوعد.

إلى عائلتي واحبائي كل باسمه

إلى خاطبي أغرب عن شكري وامتناني العميق على الدعم الذي قدّمته لي.

إلى الذين وقفوا معي ودعموني في هذه فالحياة

وأخيرًا، للأساتذة والمشرفين الذين قدّموا لي المعروف والإرشاد والتشجيع خلال السنوات الدراسية.

إلى إخواننا وبلداننا العربية الذين هم تحت القصف والتهجير والطغيان .

شكرًا لكم جميعًا

## ملخص:

العمل المقدم في هذه الرسالة هو دراسة النمذجة والتحكم في نظام تحويل طاقة الرياح على اساس آلة غير متزامنة مزدوجة التغذية (MADA). تكمن الفكرة المطبقة في هذه المذكرة هو تطبيق نظام تحكم منفصل عن GADA لضمان جودة أفضل للطاقة وجعل النظام أكثر استقراراً وغير حساس للاضطرابات التي تحدث في النظام. بعد نمذجة سلسلة تحويل طاقة الرياح كاملة مع وحدة تحكم غير مباشرة لتحديد أقصى قدر للطاقة MPPT. تم اقتراح مجموعة من التقنيات التحكم، اولها تقنية تحكم DPC كلاسيكية للتحكم في القدرة النشطة والمتفاعلة ل GADA باستخدام مصححات التباطؤ وجدول التبديل ومع ذلك بقي وجود مشكل في النظام، تم دمج تقنية (SVM) مع DPC لمعالجة المشكل. واخيرا اضفنا تقنية تحكم الوضع المنزلق للحد من الاضطرابات(الثرثرة) وجعل النظام مستقر، وتحقيق كفاءة عالية وجودة انتاجية مثلاً في هذا النظام.

**كلمات مفتاحية:** نظام تحويل طاقة الرياح، آلة غير متزامنة مزدوجة التغذية، النمذجة، التحكم المباشر في الاستطاعة.

## Résumé :

Le travail présenté dans cette mémoire consiste à étudier la modélisation et le contrôle d'un système de conversion de l'énergie éolienne sur la base d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA). L'idée consiste à implémenter un système de contrôle découplé de GADA pour assurer une meilleure qualité énergétique et rendre le système plus stable et insensible aux perturbations survenant dans le système. Après modélisation de la chaîne complète de conversion de l'énergie éolienne avec un contrôleur indirect pour déterminer la puissance maximale MPPT. Un ensemble de Technologies de contrôle a été proposé, la première est une technique de contrôle DPC classique pour contrôler la puissance active et réactive de GADA à l'aide des comparateurs à hystérésis et une table de commutation. Cependant, il restait un problème dans le système, la technique (SVM) a été combinée avec DPC pour résoudre le problème. Enfin, nous avons ajouté une technique de contrôle du mode glissant pour limiter les perturbations (chatterings) et rendre le système stable, en obtenant une efficacité et une qualité de production élevées, dans ce système.

**Mots clés :** Système conversion éolienne, MADA, modélisation, DPC.

## Abstract:

The work presented in this dissertation consists in studying the modeling and control of a wind energy conversion system based on a double-fed asynchronous machine (MADA). The idea is to implement a decoupled control system from GADA to ensure better energy quality and make the system more stable and insensitive to disturbances occurring in the system. After modeling the complete wind energy conversion chain with an indirect controller to determine the maximum MPPT power. A set of control technologies have been proposed, the first is a classical DPC control technique to control the active and reactive power of GADA using hysteresis comparators and a switching table. However, there was still a problem in the system, the technique (SVM) was combined with DPC to solve the problem. Finally, we added a sliding mode control technique to limit chattering and make the system stable, achieving high efficiency and production quality, in this system.

**Key words:** Wind turbine conversion system , DFIG, modeling , DPC .

# SOMMAIRE

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE

## CHAPITRE I

### ETAT DE L'ART ET MODELISATION DES SYSTEME DE CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE

<b>1.1 INTRODUCTION</b>	<b>3</b>
<b>1.2 GENERALITES SUR L'ENERGIE EOLIENNE</b>	<b>3</b>
I.2.1. Historique de l'énergie éolienne.	3
I.2.2. Définition de l'énergie éolienne	4
I.2.3 Le Vent	5
I.2.4 Evaluation de l'Energie Eolienne en Algérie	6
I.2.5 Présentation des différentes technologies des systèmes éoliens	7
I.2.5.1 Eoliennes à axe vertical et l'éolienne à axe horizontal	7
Avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical	8
I.2.5.1.2 Aérogénérateurs à Axe Horizontal	9
Avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal	10
I.2.6 Principaux Composants d'une Eolienne à Axe Horizontal	10
I.2.7 Applications des éoliennes	12
I.2.8. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	13
I.2.8.1 Avantages de l'énergie éolienne	13
I.2.8.2 Inconvénients de l'énergie éolienne	13
I.2.9 Principe de conversion d'énergie éolienne	13

I.2.9.1. Structures des systèmes éoliens	13
I.2.9.1.1. Fonctionnement à vitesse fixe	14
I.2.9.1.2. Fonctionnement à vitesse variable	14
I.2.9.1.3. Avantage éolienne vitesse variable	15
I.2.9.1.4. Inconvénient éolienne vitesse variable	15
<b>I.3 GENERATRICE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION</b>	<b>15</b>
I.3.1 Description de la machine asynchrone à double alimentation	15
I.3.2 Mode de fonctionnement de MADA	16
I.3.2.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone	16
I.3.2.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone	16
I.3.2.3 Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone	17
I.3.2.4 Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone	17
I.3.3 Avantages et inconvénients de la MADA	18
A. Avantages de la MADA	18
B. Inconvénients de la MADA	18
I.3.4 Application des machines asynchrones à double alimentation	19
I.3.4.1 Application moteur	19
I.3.4.2 Application génératrice	19
❖ Application de la GADA dans le domaine éolien	19
<b>I.4 DEFINITION D'UN ONDULEUR</b>	<b>20</b>
I.4.1 Modélisation de l'onduleur à deux niveaux	20
I.4.2 la commande de l'onduleur à deux niveaux	20
<b>I.5MODELISATION DE LA CHAINE EOLIENNE</b>	<b>21</b>
I.5.1 Conversion de l'énergie éolienne	21
I.5.2 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine	21
I.5.2.a) Loi de Betz	22
I.5.2.b) Production aérodynamiques de l'éolienne	24

I.5.3	Modèle du multiplicateur	26
I.5.4	Modèle de la partie mécanique	27
I.5.5	Stratégie de Commande de la Turbine Eolienne	28
I.5.6	Commande de la turbine avec la stratégie MPPT (maximum)	29
<b>I.6</b>	<b>MODELISATION DE LA PARTIE DE CONVERSION ELECTROMECHANIQUE</b>	<b>26</b>
I.6.1	Hypothèses simplificatrices	30
I.6.2	Représentation de la GADA dans un repère triphasé (abc)	31
I.6.3	Transformation de PARK	32
<b>I.7</b>	<b>CONCLUSION</b>	<b>34</b>

## **CHAPITRE II**

### **COMMANDE DIRECTE DE PUISSANCE (DPC-SVM) DE LA GADA**

<b>II.1</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>36</b>
<b>II.2</b>	<b>THEORIE DE LA COMMANDE DIRECTE DE PUISSANCE</b>	<b>36</b>
<b>II.3</b>	<b>PRINCIPE GENERAL DE LA DPC CLASSIQUE (DPC-C)</b>	<b>37</b>
<b>II.4</b>	<b>DPC-C de la MADA</b>	<b>38</b>
II.4.1.	Estimation de la puissance active et réactive	38
II.4.2.	Secteurs du Flux rotorique	38
II.4.3.	Choix des comparateurs à hystérésis	39
II.4.4.	Elaboration de la table de commutation	40
<b>II.5</b>	<b>RESULTATS DE SIMULATION DU DPC_C</b>	<b>42</b>
<b>II.6</b>	<b>DPC PAR LA MODULATION VECTORIELLE (DPC-SVM)</b>	<b>47</b>
II.6.1	PRINCIPE DE LA MLI VECTORIELLE SVM	47
<b>II.7</b>	<b>LES ETAPES DE LA REALISATION D'UNE MLI VECTORIELLE</b>	<b>50</b>
II.7.1	Détermination des secteurs	50
II.7.2	Calcul des temps de commutation	51
II.7.3	Génération des signaux modulants $T_{aon}$ , $T_{bon}$ , $T_{con}$	51
II.7.4	Génération des séries d'impulsions $S_a$ , $S_b$ et $S_c$	52

<b>II.8 DPC-SVM de la MADA</b>	<b>53</b>
<b>II.9 RESULTATS DE SIMULATION DU DPC PAR LA MODULATION VECTORIELLE (DPC-SVM)</b>	<b>56</b>
<b>II.10 CONCLUSION</b>	<b>61</b>

## **CHAPITRE III**

### **COMMANDE DIRECTE DE PUISSANCE PAR LE MODE GLISSANT (DPC-SVM-MG) DE LA GADA**

<b>III.1 INTRODUCTION</b>	<b>65</b>
<b>III.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT</b>	<b>65</b>
<b>III.3 CONCEPTION DE LA COMMANDE PAR MODE GLISSANT</b>	<b>66</b>
III.3.1 Choix de la surface de glissement	<b>66</b>
III.3.2 Conditions l'existence et de convergence au mode glissant	<b>68</b>
III.3.2.1 Fonction de discrète de commutation	<b>68</b>
III.3.2.2 Fonction de Lyapunov	<b>68</b>
III.3.3 Détermination de la loi de commande	<b>69</b>
<b>III.4 ELIMINATION DU PHENOMENE DU BROUITEMENT(Chattering)</b>	<b>72</b>
<b>III.5. APPLICATION DE LA COMMANDE PAR MODE GLISSENT AU MADA :</b>	<b>72</b>
III.5.1 Contrôle de la puissance active	<b>73</b>
III.5.2. Contrôle de la puissance réactive	<b>74</b>
<b>III.6 RESULTATS DE SIMULATION DU DPC PAR LA COMMANDE DPC PAR MODE GLISSANTE (DPC-MG)</b>	<b>76</b>
<b>III.6.1. Comparaison quantitative</b>	<b>80</b>
<b>II.7 CONCLUSION</b>	<b>81</b>
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>82</b>
<b>ANNEXE</b>	<b>83</b>
<b>REFERENCES</b>	<b>84</b>

# Liste des Figures

## CHAPITRE I

<b>Figure I.1</b> : Evolution des dispositifs éoliens de l'Antiquité	4
<b>Figure I.2</b> : Conversion de l'énergie cinétique du vent	5
<b>Figure I.3</b> : Correspondance taille-puissance des éoliennes	5
<b>Figure I.4</b> : La naissance du vent	6
<b>Figure I.5</b> : Le vent algérien à une hauteur de 10 m du sol	7
<b>Figure I.6</b> : Technologie éolienne à axe vertical	8
<b>Figure I.7</b> : Différentes technologie d'éoliennes à axe horizontale : a) Eolienne multipale b) Eolienne horizontale tripale c) Eolienne horizontale bipale et unpale	9
<b>Figure I.8</b> : Configuration à axe horizontal.	9
<b>Figure. I.9</b> : Les principaux composants d'une éolienne à axe horizontal	10
<b>Figure I.10</b> : Éléments d'une nacelle	11
<b>Figure I.11</b> : Aérogénérateur à vitesse fixe	14
<b>Figure I.12</b> : Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA	15
<b>Figure I.13</b> : Structure du stator et des contacts rotoriques de la GADA	16
<b>Figure I.14</b> : fonctionnement en mode moteur hypo synchrone	16
<b>Figure I.15</b> : fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.	17
<b>Figure I.16</b> : fonctionnement en mode générateur hypo synchrone.	17
<b>Figure I.17</b> : fonctionnement en mode générateur hyper synchrone.	17
<b>Figure I.18</b> : Eolienne à vitesse variable basée sur une GADA.	19
<b>Figure I.19</b> : Schéma de principe de l'onduleur triphasé	20
<b>Figure I.20</b> : Tube de courant d'air autour d'une éolienne.	22
<b>Figure 1.21</b> : Coefficient de puissance.	23
<b>Figure I.22</b> : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.	24
<b>Figure I.23</b> : Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de la turbine et de l'angle d'orientation des pales.	25
<b>Figure I.24</b> : Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne.	27
<b>Figure I.25</b> : Caractéristiques vitesse et puissance d'une éolienne.	28
<b>Figure I.26</b> : Schéma bloc de la stratégie MPPT sans mesure de la vitesse.	30
<b>Figure I.27</b> : Passage du triphasé au biphasé et l'inverse.	33
<b>Figure I.28</b> : Représentation de la machine dans le repère diphasé.	34

## CHAPITRE II

<b>Figure II.1</b> : Configuration de la DPC-C de la MADA	37
<b>Figure II.2</b> : Présentation des vecteurs de commutation.	39
<b>Figure II.3</b> : Comparateurs à hystérésis : (a) puissance active, (b) puissance.	40
<b>Figure II.4</b> : Dérivée de la puissance active dans tous les secteurs.	41
<b>Figure II.5</b> : Dérivée de la puissance réactive dans tous les secteurs.	41
<b>Figure II.6</b> : Profil du vent appliqué	42

<b>Figure II.7</b> : Vitesse de la turbine selon le MPPT.	<b>42</b>
<b>Figure II.8</b> : Résultats de simulation de la DPC-C de la GADA pour vitesse du vent fixe.	<b>44</b>
<b>Figure II.9</b> : Profil du vent appliqué	<b>44</b>
<b>Figure II.10</b> : Vitesse de la turbine selon le MPPT	<b>44</b>
<b>Figure II.11</b> : Résultats de simulation de la DPC-C de la GADA pour vitesse du vent variable.	<b>46</b>
<b>Figure II.12</b> : représentation des vecteurs de tensions dans le repère $(\alpha, \beta)$	<b>49</b>
<b>Figure II.13</b> : Décomposition d'un vecteur de tension de référence $Vs_{ref}$	<b>50</b>
<b>Figure II.14</b> : Séquence d'application des vecteurs sur une période $T_e$	<b>51</b>
<b>Figure II.15</b> : Boucle de régulation des courants.	<b>55</b>
<b>Figure II.16</b> : Schéma bloc de la structure de contrôle DPC-SVM appliquée à la MADA	<b>56</b>
<b>Figure II.17</b> : Profil du vent appliqué	<b>57</b>
<b>Figure II.18</b> : Vitesse de la turbine selon le MPPT	<b>57</b>
<b>Figure II.19</b> : Résultats de simulation de la DPC-SVM de la GADA pour vitesse du vent fixe.	<b>58</b>
<b>Figure II.20</b> : Profil du vent appliqué	<b>59</b>
<b>Figure II.21</b> : Vitesse de la turbine selon le MPPT	<b>59</b>
<b>Figure II.22</b> : Résultats de simulation de la DPC-SVM de la GADA pour vitesse du vent variable.	<b>60</b>

### CHAPITRE III

<b>Figure III.1</b> : Les modes de trajectoire dans le plan de phase	<b>66</b>
<b>Figure III.2</b> : Linéarisation exacte de l'écart	<b>68</b>
<b>Figure III.3</b> : Trajectoire de l'état vis-à-vis la surface de glissement	<b>69</b>
<b>Figure III.4</b> : Valeur continue $u_{eq}$ prise par la commande lors de la commutation entre $u^+$ et $u^-$	<b>70</b>
<b>Figure III.5</b> : Fonction <i>Sign</i> (Commande de type relais)	<b>71</b>
<b>Figure III.6</b> Phénomène de broutement	<b>71</b>
<b>Figure III.7</b> : Fonction de saturation (Commande adoucie).	<b>72</b>
<b>Figure III.8</b> : Schéma bloc de la commande par mode glissant de la GADA	<b>76</b>
<b>Figure III.9</b> : Profil du vent appliqué	<b>76</b>
<b>Figure III.10</b> : Vitesse de la turbine selon le MPPT	<b>76</b>
<b>Figure III.11</b> : Résultats de simulation de la DPC-MG de la GADA pour vitesse du vent fixe.	<b>78</b>
<b>Figure III.12</b> : Profil du vent appliqué	<b>78</b>
<b>Figure III.13</b> : Vitesse de la turbine selon le MPPT	<b>78</b>
<b>Figure III.14</b> : Résultats de simulation de la DPC-MG de la GADA pour vitesse du vent variable.	<b>80</b>

# Liste des tableaux

## CHAPITRE II

<b>Tableau II.1</b> : Changement des puissances active et réactive dans le secteur $\gamma_1$ .	<b>41</b>
<b>Tableau II.2</b> : Vecteurs de tension choisis pour le secteur $\gamma$ .	<b>42</b>
<b>Tableau II.3</b> : Table de commutation classique.	<b>42</b>
<b>Tableau II.4</b> : Calcul des Tensions rotoriques.	<b>49</b>
<b>Tableau II.5</b> : Identification du secteur.	<b>51</b>
<b>Tableau II.6</b> : Signaux de commande des interrupteurs du CCM.	<b>53</b>

## CHAPITRE III

<b>Tableau III.1</b> : Indicateurs de performance pour les différentes stratégies de CTD proposées .	<b>82</b>
---	-----------

# Liste des symboles et abréviations

## • Paramètre de modélisation de la turbine

$V_w$	: Vitesse du vent.
$V_{est}$	: Vitesse estimation.
$V_1$	: Vitesse en amont.
$V_2$	: Vitesse en aval.
$m$	: Masse d'air.
$E_C$	: L'énergie cinétique du vent.
$P_m$	: Puissance du vent.
$P_{mT}$	: Puissance du vent de turbine.
$\rho$	: Masse volumique d'aire.
$R_T$	: Rayon des pâles de l'éolienne.
$S$	: Surface circulaire balayée par les pales de la turbine.
$\beta$	: Angle d'orientation des pales.
$\lambda$	: Ratio de vitesse spécifique.
$\lambda_{optim}$	: Vitesse spécifique optimale.
$C_P$	: Coefficient de puissance.
$C_{P\_max}$	: Coefficient de puissance maximale.
$\Omega_T$	: Vitesse angulaire de rotation des pâles.
$\Omega_{em}$	: Vitesse électromagnétique.
$C_t$	: Couple capté par la turbine
$P_{aer}$	: Puissance aérodynamique.
$P_{aer\_ref}$	: Puissance aérodynamique référence.
$J$	: Inertie totale.
$J_g$	: Inertie générateur.
$J_T$	: Inertie de la turbine.
$C_{em}$	: Couple électromagnétique développé par la génératrice.
$C_{em\_ref}$	: Couple électromagnétique de référence.
$\Omega_{mec}$	: Vitesse de rotation (mécanique).
$C_g$	: Couple du générateur.
$C_c$	: Coefficient de couple.
$C_m$	: Couple mécanique.
$C_{vis}$	: Couple visqueux.
$f_r$	: Coefficient de frottement.
$G$	: Gain du multiplicateur.

## • Paramètres de modélisation de la MADA :

$\omega_s$ et $\omega_r$	Pulsations statorique et rotorique de la MADA.
$R_s$ et $R_r$	Résistances statorique et rotorique.
$I_{as}, I_{bs}, I_{cs}$ et $I_{ar}, I_{br}, I_{cr}$	Courants statoriques et rotoriques des phases a, b et c.

$V_{as}, V_{bs}, V_{cs}$ et $V_{ar}, V_{br}, V_{cr}$	Tensions simples statoriques et rotoriques des phases a, b et c.
$\varphi_{as}, \varphi_{bs}, \varphi_{cs}$ et $\varphi_{ar}, \varphi_{br}, \varphi_{cr}$	Flux respectivement statoriques et rotoriques des phases a, b et c
$l_s$ et $l_r$	Inductances propres des phases statoriques et rotoriques.
$M_s$ et $M_r$	Inductances mutuelles entre les phases statoriques et rotoriques .
$V_{ds}, V_{qs}$ et $V_{dr}, V_{qr}$	Tensions directes et en quadratures statoriques et rotoriques
$I_{sd}, I_{sq}$ , et $I_{rd}, I_{rq}$	Courants directs et en quadratures statoriques et rotoriques.
$\varphi_{ds}, \varphi_{qs}$ et $\varphi_{dr}, \varphi_{qr}$	Flux directs et en quadratures statoriques et rotoriques.
$\theta_s$ et $\theta_r$	Angle électrique statorique, rotorique.
$P_s$ et $Q_s$	Puissance active et réactive statorique.

- **Repère :**

( $S_a, S_b, S_c$ )	Axes magnétiques liés aux enroulements triphasés statorique.
( $d, q$ )	Axes de référentiel de Park (tournant à la vitesse de synchronisme).
( $\alpha, \beta$ )	Axes de référentiel de Concordia/Clarke (repère de Park fixe au stator).

- **Transformations :**

$p$	: Opérateur de Laplace,
$P(\theta)$	: Transformation de Park : $X_{s\ a,b,c} \rightarrow X_{s\ d,q}$ et $X_{r\ a,b,c} \rightarrow X_{r\ d,q}$
$C_{32}$	: Transformation de Concordia/Clarke : $X_{s\ a,b,c} \rightarrow X_{s\ \alpha,\beta}$ et $X_{r\ a,b,c} \rightarrow X_{r\ \alpha,\beta}$ ,

## ABRÉVIATIONS

### 1. EN FRANÇAIS

<b>MADA</b>	: Machine Asynchrone à Double Alimentation.
<b>GADA</b>	: Génératrice Asynchrone à Double Alimentation.
<b>SCE</b>	: Systèmes de Conversion Eolienne.
<b>CCM</b>	: Convertisseur Coté Machine.
<b>CCR</b>	: Convertisseur Coté Réseau.
<b>CMG</b>	: Commande par modes glissants
<b>CSV</b>	: Commande à structure variable

### 2. EN ANGLAIS

<b>MPPT</b>	: Maximum Power Point Tracking.
<b>AC</b>	: Alternatif Current.
<b>MOSFET</b>	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.
<b>IGBT</b>	: Insulated Gate Bipolar Transistor.
<b>DPC</b>	: Direct Power Control.
<b>DCP-SVM</b>	: Direct Power Control With Space Vector Modulation.
<b>SVM</b>	: Space Vector Modulation.
<b>HYPER</b>	: Hyper synchronisme
<b>HYPO</b>	: Hypo synchronisme
<b>PI</b>	: Proportionnel intégrateur
<b>VAWT</b>	: Vertical Axis Wind Turbine
<b>HAWT</b>	: Horizontal Axis Wind Turbine

*Introduction*

*générale*

## **INTRODUCTION GENERALE :**

Au cours des dernières années, le secteur de l'énergie a été confronté à l'apparition du virus, qui a imposé des restrictions à de nombreux secteurs économiques afin de contenir la propagation du virus. Il y a eu une baisse de la consommation d'énergie, car plusieurs pays ont souffert de forts prix à la lumière de l'inflation galopante et des inquiétudes exacerbées quant à la sécurité des approvisionnements internationaux. Dans ce contexte, plusieurs pays ont cherché à élargir la recherche de nouvelles sources d'énergie renouvelable, compte tenu de la détresse économique et géopolitique.

L'énergie électrique est devenue l'un des éléments les plus fondamentaux et des facteurs nécessaires à la vie quotidienne humaine. Par conséquent, la consommation mondiale d'électricité augmente de jour en jour dans de nombreux domaines, activités quotidiennes et besoins utilisant l'électricité. Environ 32% de l'électricité mondiale. Une grande partie de cette énergie provient d'énergies fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, etc.) qui causent des problèmes environnementaux. Ces menaces se manifestent principalement par la pollution et le réchauffement climatique par effet de serre. La principale préoccupation du monde est d'atténuer cette pollution et de trouver des solutions. L'environnement doit être protégé, mais les énergies fossiles vont se raréfier au fil des années.

Face à ce problème, le monde s'oriente largement vers de nouvelles formes d'énergies dites "renouvelables" facilement accessibles et très adaptées à la production. Les énergies décentralisées et renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout en réduire la dépendance aux ressources, à condition d'en accepter les fluctuations naturelles et parfois aléatoires. Parmi celles-ci, l'énergie éolienne a été identifiée comme l'une des énergies renouvelables les plus prometteuses pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre. La généralisation des éoliennes a conduit les chercheurs en génie électrique à les mettre en œuvre afin d'améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. Les éoliennes peuvent également être classées comme équipées de ventilateurs inclinés à pale variable pour s'adapter aux différentes conditions de vent. L'éolienne est entièrement contrôlée de manière à ce que l'éolienne maximise en permanence la puissance délivrée en trouvant le point de fonctionnement à la puissance maximale communément appelé « MPPT », peut affecter significativement la qualité de la tension et du courant dans le réseau où elle est injectée.

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation des énergies renouvelables, notamment pour les applications solaires et éoliennes. En effet, vu l'importance de l'intensité du rayonnement solaire reçu au sol, ainsi que la durée d'insolation qui dépasse les dix heures par jour pendant plusieurs mois, ainsi qu'un gisement éolien considérable.

Une grande partie des éoliennes installées de nos jours sont équipées de machines asynchrones à double alimentation (MADA). Cette génératrice permet une production d'électricité à vitesse variable ceci permet alors de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent. De plus, si l'on arrive à faire en sorte que les éoliennes

puissent fournir des services systèmes au réseau, tels que, la fourniture de puissance réactive pour la correction du facteur de puissance et l'amélioration de la qualité de l'énergie par le filtrage des harmoniques de courant alors son insertion dans les réseaux sera sûrement plus simple. C'est donc dans ce cadre que. Nous allons développer notre étude sur un système éolien à vitesse variable basée sur la machine asynchrone à double alimentation.

Dans le premier chapitre, nous présentons les derniers développements dans le domaine de l'énergie éolienne à partir de la date de son exploitation et donnons également une définition de l'énergie éolienne. Nous mettons également en évidence les différents types d'éoliennes et leur développement au cours des dernières décennies, et les diverses combinaisons machine transformateur, utilisées pour convertir une machine asynchrone à double puissance basée sur le vent que vous étudierez. Dans le second lieu, nous présenterons la modélisation d'un système éolien à vitesse variable basé sur MADA (mode générateur GADA). Nous présenterons la modélisation des différents éléments constituant le système pour établir la commande associée. Ce chapitre présent également la stratégie MPPT (Maximum Power Point Tracking), cette dernière repose sur le principe de l'extraction du maximum de puissance de l'éolienne pour chaque vitesse du vent. Une fois cette partie mécanique en fonctionnement, nous allons nous attacher à la génération d'électricité par la modélisation de la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation (GADA) et de son convertisseur statique qui alimente le rotor.

Le deuxième chapitre, nous étudierons et appliquerons la commande directe de puissance (DPC) à une machine asynchrone à double alimentation. Ce type de commande est basé sur le concept du contrôle direct du couple appliqué aux machines électriques. Le but est de contrôler directement la puissance active et réactive de la MADA à travers le convertisseur CCM. Les états de commutation du convertisseur sont sélectionnés à partir d'une table de commutation, ce dernier est alimentée par deux comparateurs à hystérésis dont les entrées sont les erreurs instantanées obtenues de la différence entre la valeur de référence et estimée de la puissance active et réactive ce qui représente la DPC classique (DPC-C). Pour sur monter les inconvénients de la DPC-C, tels que les ondulations des puissances et la fréquence de commutation variable, la DPC est combinée avec la technique MLI vectorielle (SVM). Les résultats de simulations sur Matlab Simulink seront présentés.

Le troisième chapitre sera consacré au développement d'une technique basée sur la commande par mode glissant. Pour améliorer les performances de la DPC\_SVM. Cette méthode consiste à remplacer les régulateurs PI appliquées aux DPC-SVM de la GADA par des régulateurs de type mode glissant. Donc trois stratégies de commande seront évaluées et comparées dans ce chapitre à savoir DPC classique (DPC-C), DPC avec modulation vectorielle (DPC-SVM) et DPC avec SVM en mode glissant (DPC-SVM-MG).

Cette mémoire est parachevée par une conclusion générale dans laquelle sont valorisés les différents développements effectués. Des perspectives pour ce travail sont également envisagées.

# Chapitre 1:

*Etat de l'art et modélisation des systèmes de  
conversion d'énergie éolienne*

## **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 éoliennes sont en tout point positif pour la société et l'environnement ; moins de pollution, pas de gaz à effet de serre, pas des déchets toxiques ou radioactifs notamment ! Cependant, si l'on remonte à son origine, on peut voir que cette forme d'énergie durable, efficace sur le long terme. Les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante de nombreux dispositifs existent et pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones ou asynchrones[1].

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne est une étape primordiale dans la compréhension du système éolien. Dans ce chapitre, on s'intéressera essentiellement à 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 l'Algérie, Ensuite, la modélisation de la turbine éolienne basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation qui reste la machine la plus utilisée dans les systèmes éoliens à vitesse variable. Cette modélisation permet en premier lieu de comprendre le comportement dynamique et l'interaction électromécanique de la génératrice avec la turbine[2].

## **I.2 GENERALITES SUR L'ENERGIE EOLIENNE :**

### **I.2.1 Historique de l'énergie éolienne :**

On estime que le principe de l'éolienne était déjà connu en 200 avant J-C, chez les Perses qui utilisaient alors des moulins à vents afin de moudre le grain. Il faut attendre le XII<sup>e</sup> siècle pour voir les premiers moulins apparaître en Europe. Les paysans les utilisèrent pour échapper aux impôts taxant l'utilisation des cours d'eau sur les terres seigneuriales. Mais c'est surtout au Moyen Age que les moulins à vent se sont considérablement développés notamment aux Pays Bas qui s'en servaient (encore aujourd'hui) pour pomper l'eau des rivières et des canaux. La fabrication de l'huile et du papier a alors connu un véritable essor pendant cette période.

La première éolienne destinée à produire de l'électricité fut construite par Charles F. Brush en 1887. Composée de 144 pâles et d'un diamètre de 17 m, elle ne produisait que 12 k

Le météorologiste danois Poul La Cour (1846-1908) qui voyait dans l'électricité une des techniques qui auraient le plus d'importance dans l'avenir, fit des recherches pour améliorer l'efficacité des moulins à vent et améliorer l'invention de Charles F. Brush. Il découvrit qu'une éolienne à rotation rapide ayant un nombre de pales limité produisait plus d'électricité. Il découvrit ceci grâce à ses recherches dans une soufflerie aérodynamique. Il mit au point une éolienne plus performante que Charles F. Brush doté de moins de pales et tournant beaucoup plus vite ce qui augmenta les rendements d'électricité produit. La crise économique de la seconde guerre mondiale va se révéler une aubaine pour le marché de éolienne, en effet la pénurie de charbon et de pétrole va présenter l'énergie éolienne comme une véritable alternative et permettre à l'éolien de trouver des fonds pour se développer. Johannes Juul, un

des élèves de Poul la Cour, va construire en 1956 la première éolienne à produire du courant alternatif. Composée de 3 pâles et d'une puissance de 200 kW, c'est elle qui a inspiré les éoliennes d'aujourd'hui. Plus tard, Darrieus, un ingénieur français fit construire en 1983 la première éolienne à axe vertical. Il l'avait fait brevété en 1931, cette éolienne dite de type Darrieus dont le fonctionnement repose sur l'effet de portance subit par un profil soumis à l'action d'un vent relatif (effet qui s'exerce sur les ailes d'un avion). Cette configuration présente un important avantage sur les éoliennes classiques : sa capacité à fonctionner quelle que soit la direction du vent. Des recherches sont en cours actuellement visant à améliorer ce système qui reste fragile en cas de vents trop violents. Plus tard, Darrieus, un ingénieur français fit construire en 1983 la première éolienne à axe vertical. Il l'avait fait brevété en 1931, cette éolienne dite de type Darrieus dont le fonctionnement repose sur l'effet de portance subit par un profil soumis à l'action d'un vent relatif (effet qui s'exerce sur les ailes d'un avion). Cette configuration présente un important avantage sur les éoliennes classiques : sa capacité à fonctionner quelle que soit la direction du vent. Des recherches sont en cours actuellement visant à améliorer ce système qui reste fragile en cas de vents trop violents. Puis il y a aussi l'éolienne classique de que l'on voit couramment[3].



**Figure I.1:** Evolution des dispositifs éoliens de l'Antiquité

### **I.2.2 Définition de l'énergie éolienne :**

Un aérogénérateur plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice, qui est dans notre cas un générateur asynchrone à double alimentation (GADA), (Figure I.2) [4] [5] [6] [7] .

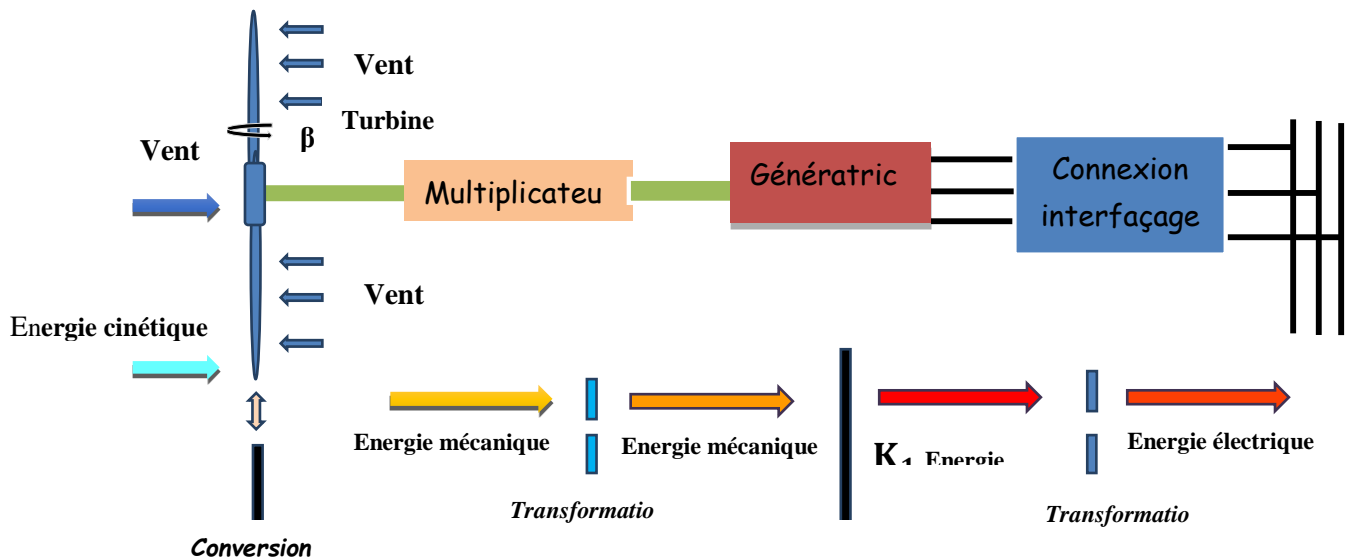


Figure I.2 : Conversion de l'énergie cinétique du vent[8]

Selon leur puissance nominale, les éoliennes sont divisées en trois catégories :

- Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW.
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW.

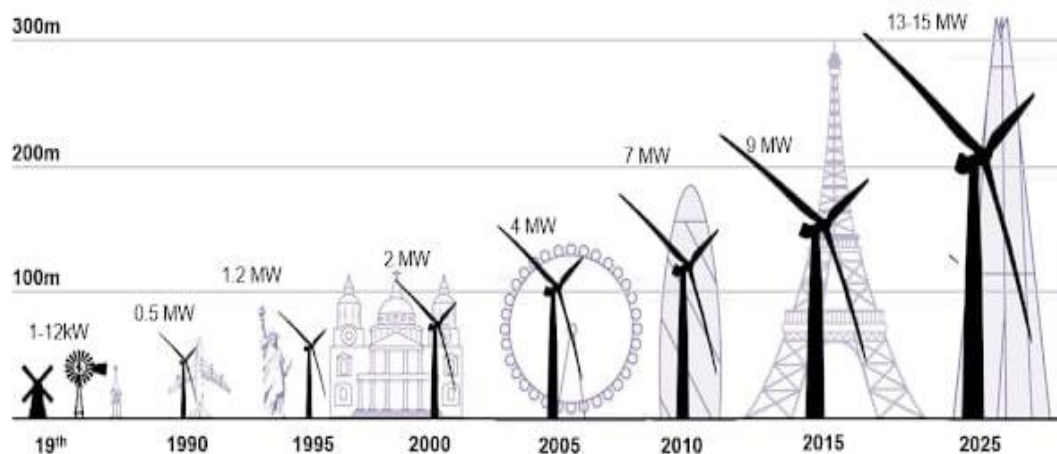


Figure I.3 : Correspondance taille-puissance des éoliennes

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.

**I.2.3 Le Vent :** Le vent est une forme d'énergie renouvelable. Si on veut donner une idée générale du vent, alors on peut dire qu'il s'agit d'une provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres une différence de pression est créée et les masses

d'air sont en perpétuel déplacement. C'est en capturant leur énergie cinétique que les éoliennes se mettent à fonctionner.[1] [9] [6] [5].

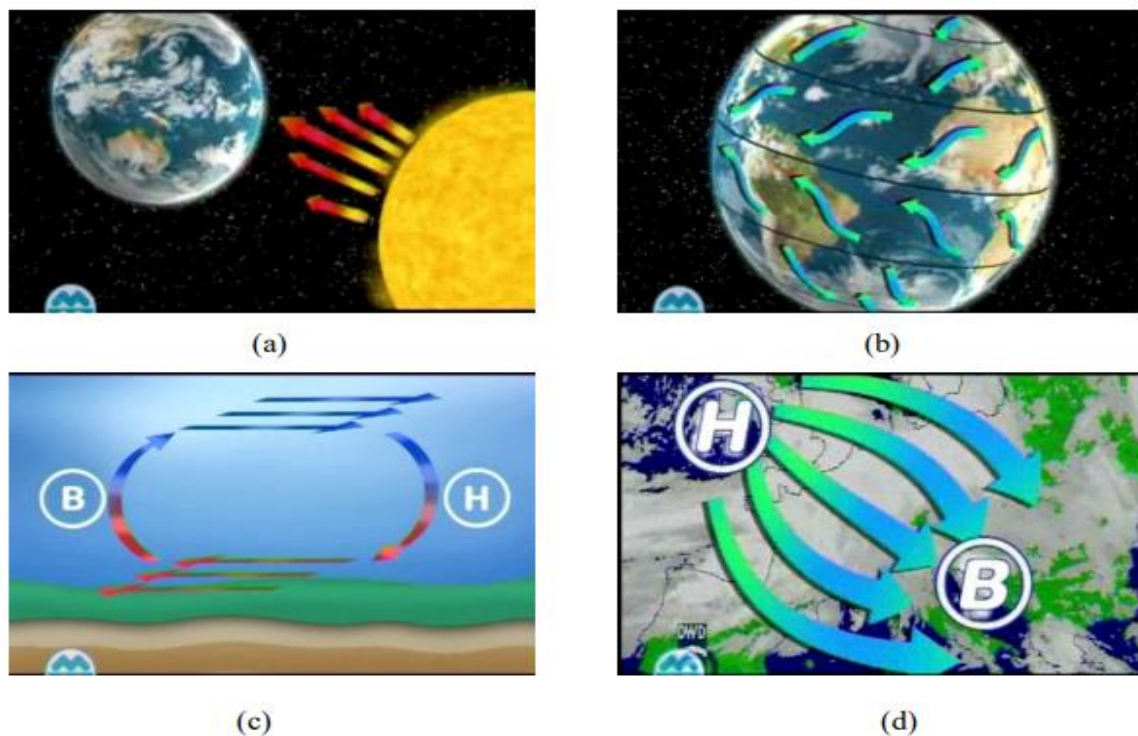
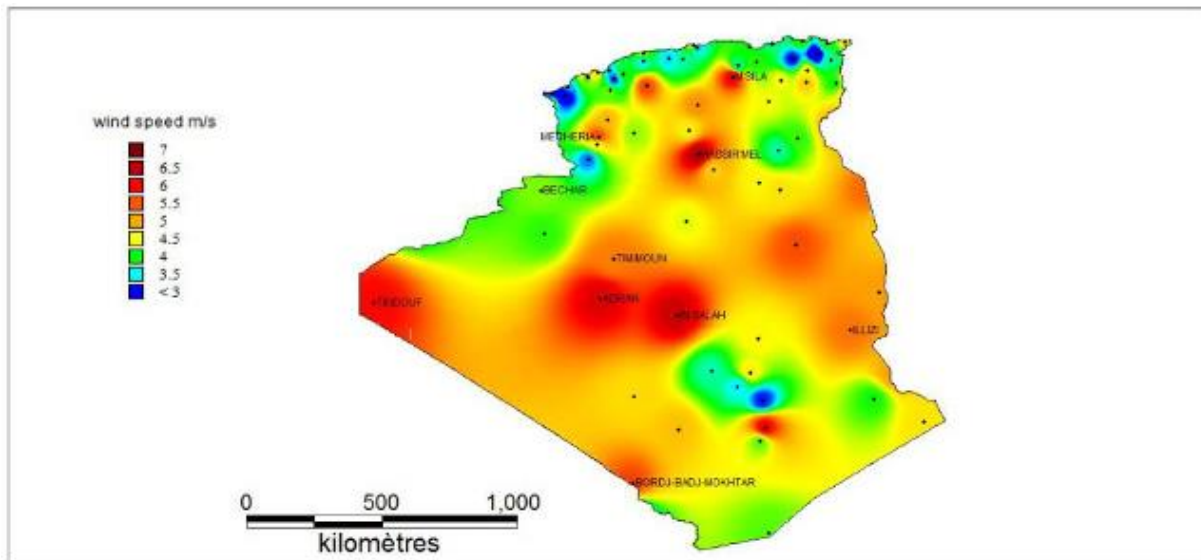


Figure I.4 : La naissance du vent

#### I.2.4 Evaluation de l'Energie Eolienne en Algérie :

Grâce à la répartition géographique quasi uniforme entre le sud et le nord, le éolien Algérie à une altitude de 10 mètres du sol reflète les changements estimés de la source des vents par rapport aux atlas précédents, notamment dans le désert. Aussi, le site d'Ain Saleh affiche une vitesse moyenne de 6,4 m/s près d'Adrar qui a enregistré 6,3 m/s. L'état d'Illizi, qui compte des dizaines de stations, affiche des vitesses de plus de 5 m/s. Dans le nord de nombreux microclimats sont également découverts d'ouest en est. Dans les hauts plateaux de l'extrême ouest, la région de Meshreya affiche une vitesse moyenne très importante de 5,6 m/s. En passant un peu à l'est, Tiaret et Djelfa enregistrent des vitesses atteignant respectivement 5,6 et 5,1 m/s. M'sila ressort comme une zone très importante avec une vitesse moyenne annuelle de 5,3 m/s. Il est à noter que certains des sites tels que Ksar Chellala, Bou-Saada et Tébessa affichent des pourcentages importants de valeurs nulles (> 50%), ce qui peut fortement réduire leur potentiel[6,10]



**Figure I.5 :** Le vent algérien à une hauteur de 10 m du sol

### I.2.5 Présentation des différentes technologies des systèmes éoliens :

Les aérogénérateurs il existe différent façon de classer à basée sur l'orientation de l'axe (Éoliennes à axe horizontal (HAWT). Éoliennes à axe vertical (VAWT) de rotation de la turbine par rapport au vent. Aujourd'hui, pratiquement les seules éoliennes commerciales sont à axes horizontales. Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol facilement accessibles mais leur plus faible rendement aérodynamique ainsi que les fluctuations élevées de la puissance électrique générée les ont écartées du marché[11] [12] [13] [7].

#### I.2.5.1 Eoliennes à axe vertical et l'éolienne à axe horizontal :

##### I.2.5.1.1 Aéroturbines à axe vertical (VAWT) :

Ils ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologies ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieus (Figure I.6)



a: Darrieus

a: Darrieus de type H

b: Savonius

**Figure I.6 :** Technologie éolienne à axe vertical

- ◆ **Le rotor Darrieus :** Leur fonctionnement est basé sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles (Figure (I-6.a)), est soumis à des forces d'intensité et de direction variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif [5] [14] .
- ◆ **Le rotor de Savonius:** Les pales du rotor Savonius se présentent sous la forme de deux demi-cylindres, qui tournent sur eux-mêmes avec l'action du vent. Il se peut que les éoliennes verticales de type « Savonius » soient composées de plusieurs étages, chacun des étages étant lui-même composé de deux demi-cylindres. Ces pales utilisent la force de traînée du vent pour produire de l'électricité (Figure (I-6.b)) [9] .
- ✚ **Avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical :**

Les principaux avantages des éoliennes à axes verticales sont [13] [15] :

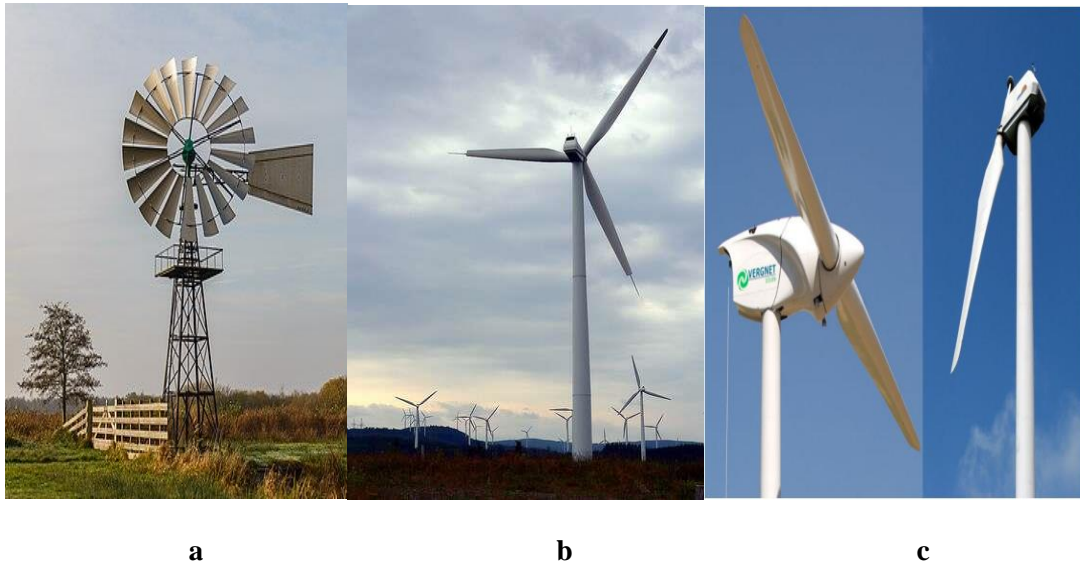
- ✓ Simplicité de conception.
- ✓ Facilité d'entretien et de maintenance de la génératrice et du multiplicateur qui sont posés directement au sol.
- ✓ Absence d'un système d'orientation du rotor car le vent peut faire tourner la structure quel que soit sa direction.
- ✓ Faible bruit du système puisqu'elles tournent à faible vitesse.

Ce type d'éoliennes a été abandonné à cause des inconvénients suivants [16] [17] :

- ✓ Faible rendement et variations importantes de la puissance produite.
- ✓ Occupation importante du terrain pour les puissances élevées.
- ✓ Faible vitesse du vent à proximité du sol.
- ✓ Nécessité d'un dispositif auxiliaire de démarrage.

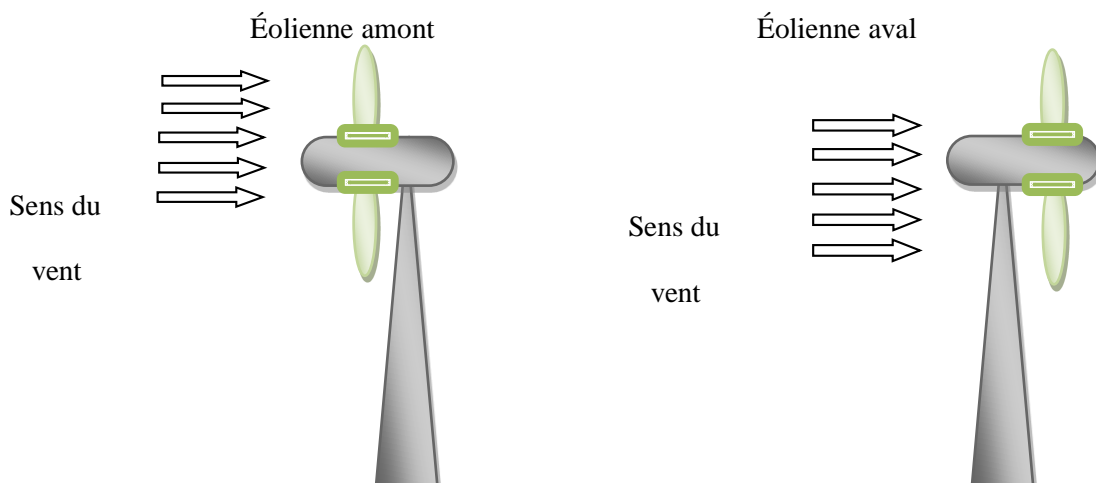
### I.2.5.1.2 Aérogénérateurs à Axe Horizontal :

L'éolienne se compose de 3 pales (en général) portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical qui doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum de l'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol . Cet ensemble est fixé par une nacelle qui regroupe les éléments mécaniques permettant de coupler la génératrice électrique à l'arbre de l'éolienne. Un moteur électrique permet d'orienter la partie supérieure afin qu'elle soit toujours face au vent. Les pales permettent de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique[1] [18]



**Figure I.7:** Différentes technologies d'éoliennes à axe horizontal : a) Éolienne multipale b) Éolienne horizontale tripale c) Éolienne horizontale bipale et unipale

- ◆ **Amont** : Le vent souffle à l'avant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est dirigé dans la direction du vent par un dispositif[19].
- ◆ **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable. La disposition turbine en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité. Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction[19]



**Figure I.8:** Configuration à axe horizontal.**✚ Avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal :**

Les principaux avantages des éoliennes à axe horizontal sont [16, 19]:

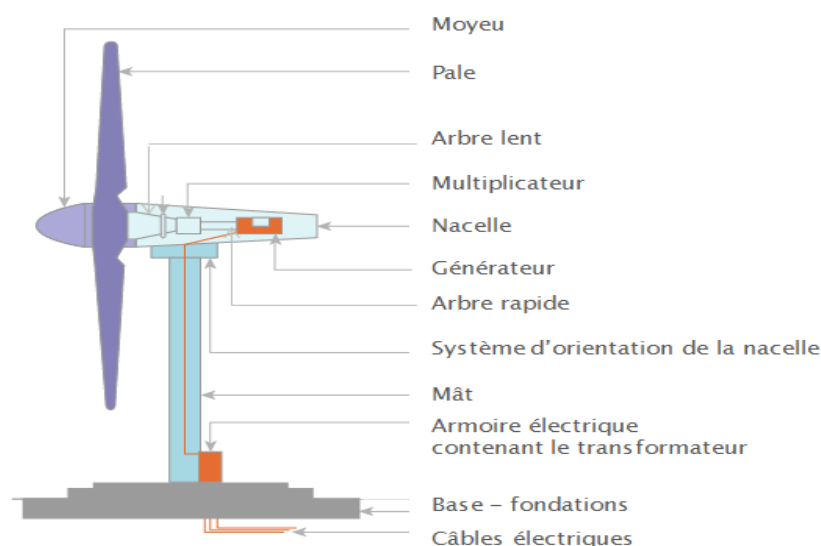
- ✓ Ces éoliennes captent le vent en hauteur et loin du sol; à cette hauteur le vent est beaucoup moins ralenti par le relief. A dimension d'hélice identique, on pourra produire plus de puissance par le biais de cette structure par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- ✓ Une très faible emprise au sol par rapport à l'éolienne à axe vertical ;
- ✓ Le générateur et les appareils de command sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage ;
- ✓ Possibilité du contrôle de la vitesse pour avoir le maximum de la puissance générée ;
- ✓ Elles ne nécessitent pas de dispositif auxiliaire de démarrage ;
- ✓ Elles sont efficaces et possèdent un bon rendement.

Les principaux inconvénients des éoliennes à axe horizontal sont [13] [19] [16]:

- ✓ La difficulté d'intervention pour la maintenance des appareilles qui se trouvent au sommet de la tour ;
- ✓ La nécessité d'un système d'orientation des pales ;
- ✓ L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident
- ✓ Coût de construction très élevé

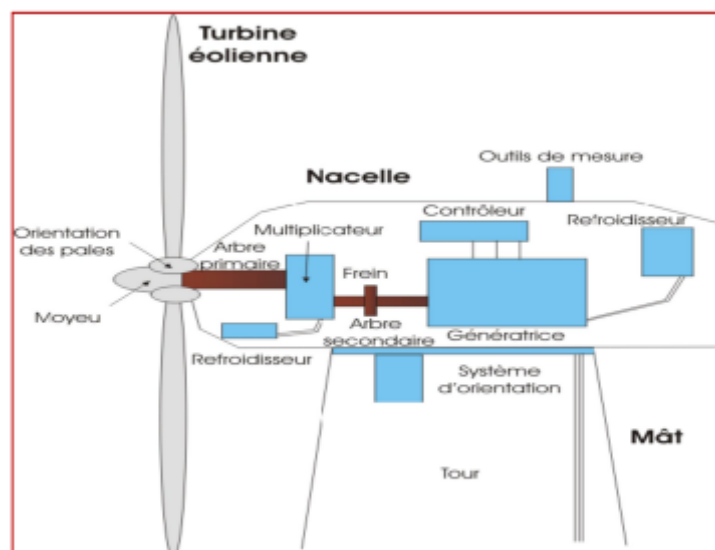
**I.2.6 Principaux Composants d'une Eolienne à Axe Horizontal :**

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux[20] [21] :



**Figure. I.9** : Les principaux composants d'une éolienne à axe horizontal

- ◆ **Le mât** : C'est un élément utilisé pour supporter l'ensemble (rotor + nacelle), généralement constitué par un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol et un bon niveau pour capter l'énergie produit par le vent. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur. A l'intérieur du mât (tour) se trouvent les éléments de contrôle, les appareillages de raccordement au réseau de distribution, les câbles de transmission d'énergie électrique et une échelle d'accès à la nacelle.
- ◆ **La nacelle** : regroupe tous les éléments mécaniques servant à relier le rotor éolien à la génératrice électrique. Elle comprend [1] [22]:
  - ⇒ Un arbre : qui relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.
  - ⇒ Un multiplicateur : Permet de adapté la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique. Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne et Le frein à disque permet aussi d'arrêter le système en cas de surcharge.
  - ⇒ Un anémomètre : Les signaux électroniques émis par l'anémomètre sont utilisés par le système de contrôle-commande de l'éolienne pour démarrer l'éolienne lorsque la vitesse du vent atteint approximativement 5m/s. De même, le système de commande électronique arrête automatiquement l'éolienne si la vitesse du vent est supérieure à 25m/s afin d'assurer la protection de l'éolienne.
  - ⇒ Une girouette : indique la direction de vent, qui permet à la nacelle de rester orientée face au vent.
  - ⇒ Le générateur : Son rôle principal est de convertir l'énergie mécanique disponible sur l'arbre de sortie du multiplicateur en énergie électrique. Le générateur qui est généralement une machine synchrone, asynchrone ou asynchrone a double alimentation.
  - ⇒ Système de refroidissement : Ce système permet d'éviter l'échauffement du l'ensemble (génératrice - multiplicateur), par ventilateurs et radiateurs d'eau ou d'huile.



**Figure I.10 : Éléments d'une nacelle**

- ◆ **Le rotor** : formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit, On distingue deux types de rotors [19] [23] :
- **Rotors à vitesse fixe** : sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ainsi, ce système allie ainsi simplicité et faible coût.
- **Rotors à vitesse variable** : sont souvent moins chers car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé. Cependant, l'interface de l'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est essentielle. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique).

### I.2.7 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 de rotation (tenant compte bien entendu du rendement de la machine).

Cette énergie 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...) [1] .

### **I.2.8 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :**

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement [2, 13] [24] [25] [16] [26].

#### **I.2.8.1 Avantages de l'énergie éolienne :**

- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, écologique, fiable, économique, et inépuisable, c'est une énergie qui respecte l'environnement.
- ✓ L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas des déchets toxiques ou radioactifs.
- ✓ C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables
- ✓ Ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà
- ✓ Ne nécessite pas beaucoup de surface comme pour le cas des panneaux solaires.
- ✓ Elle est gratuite puisque ne nécessite pas une énergie ou une matière première.
- ✓ La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles.
- ✓ Génération d'une puissance électrique de meilleure qualité

#### **I.2.8.2 Inconvénients :**

- ✓ Le bruit des pales (nuisances sonores).
- ✓ Les éoliennes nuisent à la migration des oiseaux.
- ✓ L'énergie éolienne reste liée à la météo et à l'environnement.
- ✓ Les éoliennes génèrent des bruits mécaniques (multiplicateurs) et aérodynamiques (vitesse de rotation du rotor) qui peuvent atteindre jusqu'à 55dB.
- ✓ La qualité d'énergie électrique produite n'est pas toujours bonne à cause de la vitesse du vent qui n'est pas toujours constante.
- ✓ Les éoliennes présentent des risques d'accidents lors des fortes vitesses du vent qui peuvent rompre les structures du système.

### **I.2.9 Principe de conversion d'énergie éolienne :**

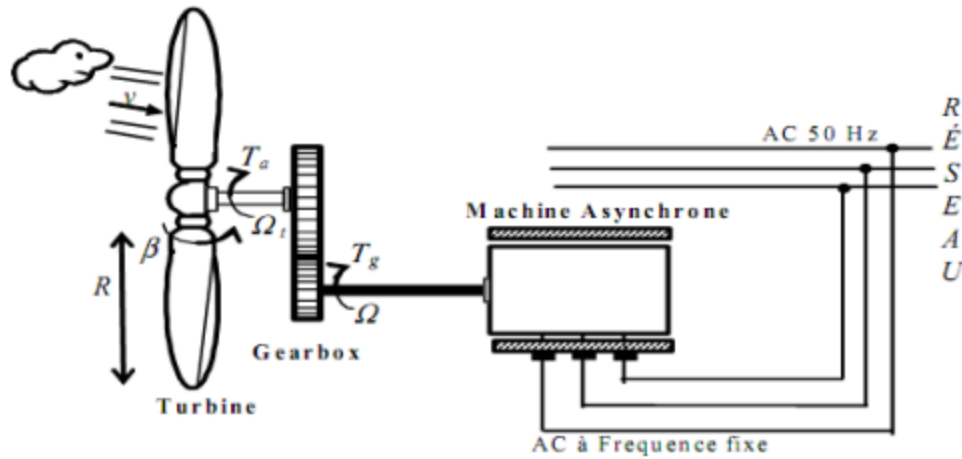
Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes [1] :

- Au niveau de la turbine, qui reçoit 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 qui transmise ensuite sur le réseau électrique.

Il doit donc y avoir conversion et transmission régulières de l'énergie la seule possibilité de stockage étant inertielle au prix d'une accélération de la turbine ce fonctionnement général est illustré par la figure (I.6) [19].

**I.2.9.1 Structures des systèmes éoliens :** 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 [21] :

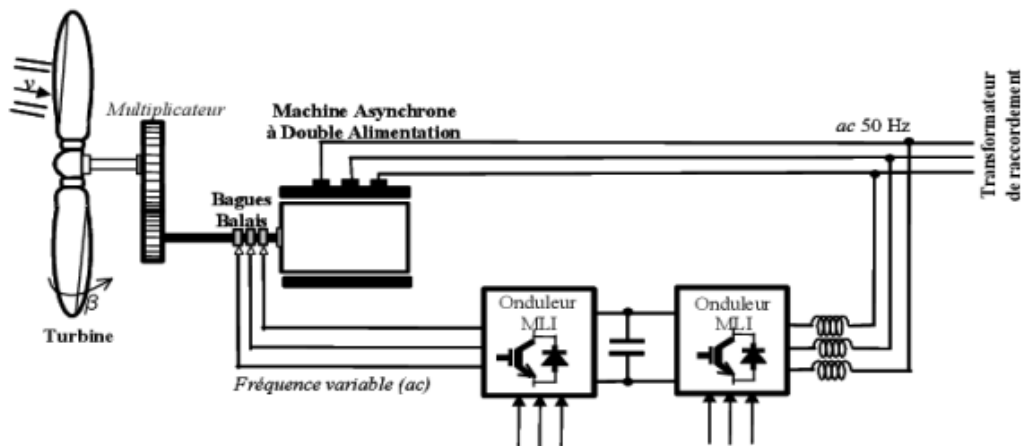
**I.2.9.1.1 Fonctionnement à vitesse fixe :** Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Sa vitesse mec est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice [9] [11].



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

Le couple mécanique entraînant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hyper synchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau. Pour une génératrice standard à deux paires de pôles, la vitesse mécanique ( $\Omega_{mec}$ ) est légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme  $N_s = 1500 \text{tr/mn}$ , ce qui nécessite l'adjonction d'un multiplicateur pour adapter la vitesse du rotor de l'éolienne à celle du rotor de la génératrice [27]. On peut distinguer deux technologies d'éoliennes à vitesse fixe : Les éoliennes à décrochage aérodynamique et les éoliennes à pales orientables.

**I.2.9.1.2 Fonctionnement à vitesse variable :** Afin d'optimiser la puissance de sortie en fonction du vent, il est souhaitable de pouvoir régler la vitesse de rotation de l'éolienne. L'idée est de faire un générateur avec une fréquence fixe et une vitesse variable. Les générateurs à vitesse variable peuvent fonctionner dans une large gamme de vents, de sorte que lorsqu'ils fonctionnent à des vitesses de vent faibles, ils peuvent restaurer une puissance maximale tout en réduisant la pollution sonore. A vitesse variable, le système est réglé de manière à ce que pour chaque vitesse de vent, l'éolienne tourne à sa puissance maximale et c'est ce qu'on appelle le suivi du point de puissance maximale [13].



**Figure I.12 :** Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA

#### I.2.9.1.3 Avantage éolienne vitesse variable :

- ✓ Réduit le stress sur les composants mécaniques de l'éolienne.
- ✓ Permet de maximiser l'efficacité aérodynamique pour une grande plage de vitesses de vent.
- ✓ Permet le lissage de la puissance de sortie de la turbine.
- ✓ Permet le contrôle de la tension et de la fréquence sur les réseaux (contrôle du flux de puissance).
- ✓ Permet l'utilisation d'une boîte de vitesse réduite (ou absente produisant moins de pertes par frottement pleine vitesse variable seulement).

#### I.2.9.1.4 Inconvénient éolienne vitesse variable :

- ✓ Nécessite un contrôle complexe.
- ✓ Les convertisseurs de puissance sont dispendieux et engendrent des pertes de puissance électrique

### I.3 GENERATRICE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION :

#### I.3.1 Description de la machine asynchrone à double alimentation :

Une MADA a un stator identique à celui d'une machine asynchrone à cage ou d'une machine synchrone. C'est le rotor qui diffère radicalement car il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écurieul mais d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques. On peut voir sur la figure I.13 que les enroulements rotoriques sont connectés en étoile et les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants (balais bagues collectrices) permettant d'avoir accès aux tensions et courants du rotor [28].

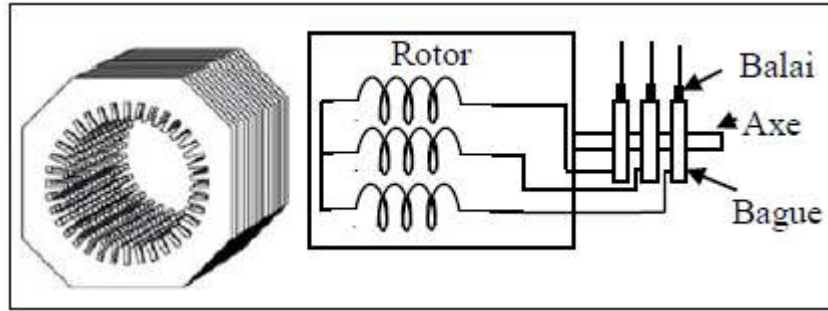


Figure I.13 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la GADA[29]

### I.3.2 Mode de fonctionnement de MADA :

En générale, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, mais la différence avec les autres types de machine réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur [30] .

#### I.3.2.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone :

Lorsque la machine tourne en dessous de la vitesse de synchronisme l'énergie absorbée du réseau est transformée partiellement en énergie mécanique. L'autre partie est injectée au réseau à travers les contacts glissants du rotor. Pour les moteurs à cage, l'énergie de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor[31, 32].

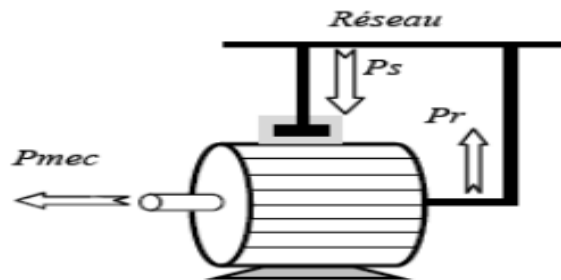
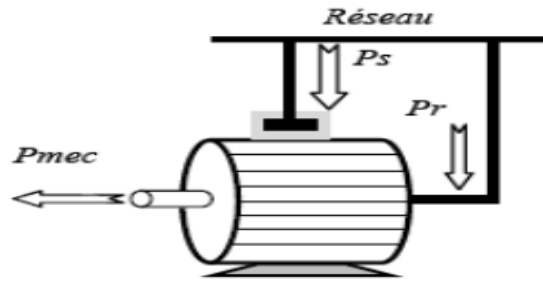


Figure I.14 : fonctionnement en mode moteur hypo synchrone[33]

#### I.3.2.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone :

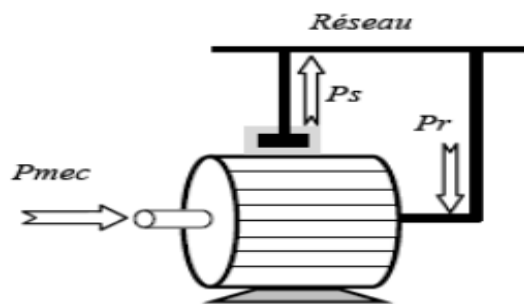
Le fonctionnement en mode hyper-synchrone du moteur est réalisé lorsque la vitesse de la machine peut varier au-delà de la vitesse de synchronisme, la puissance statorique est fournie par le réseau ainsi que la puissance de glissement. Les machines à cage ne peuvent avoir ce type de fonctionnement car celui-ci ne peut être obtenu qu'à l'aide d'un accès au rotor via un circuit électronique [31, 32].



**Figure I.15:** fonctionnement en mode moteur hyper synchrone[33].

### I.3.2.3 Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone:

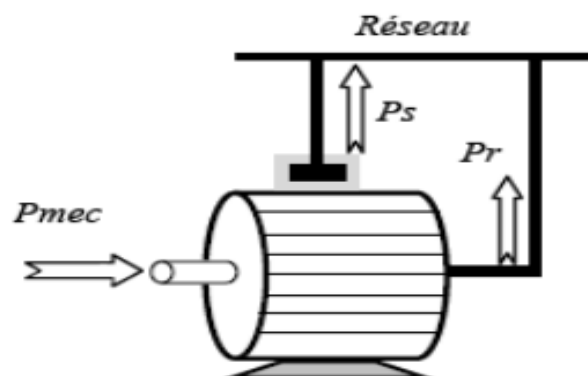
La figure (I.16) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator ( $P_s$  alimente le réseau). La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement[30].



**Figure I.16:** fonctionnement en mode générateur hypo synchrone[33].

### I.3.2.4 Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone :

La figure (I.17) montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes joule dans le rotor[30].



**Figure I.17 :** fonctionnement en mode générateur hyper synchrone[33].

### **I.3.3 Avantages et inconvénients de la MADA :**

#### **A. Avantages de la MADA :**

- La possibilité de modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse.
- En fonctionnement générateur, 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 synchrones et asynchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée.
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale[7, 34].

#### **B. Inconvénients de la MADA :**

- Machine plus volumineuse que celle à cage. Généralement, elle est plus longue à cause des balais.
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage. Nous soulignons que des études récentes, tenant compte de la chute du prix du silicium, donnent maintenant un petit avantage à la MADA[31].
- Elle nécessite une maintenance périodique[35].

### **I.3.4 Application des machines asynchrones à double alimentation :**

#### **I.3.4.1 Application moteur :**

La MADA représente une nouvelle solution dans le domaine des entraînements de forte puissance, notamment ceux exigeant un large domaine de fonctionnement étendu à puissance constante et une grande plage de variation de la vitesse comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime[1] [36].

#### **I.3.4.2 Application génératrice :**

Dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable, la MADA est aussi une bonne solution pour la production de l'énergie électrique. L'alimentation à fréquence variable du rotor permet de générer des tensions à fréquence et amplitude fixes au stator quel que soit la vitesse de rotation de l'arbre de la machine. Cette application présente la MADA comme un meilleur choix par rapport aux machines synchrones classiques pour la production d'énergie décentralisée à savoir [5] [37]:

- Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable.
- Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable.
- Génération des réseaux de bord des navires ou des avions.
- Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

### ❖ Application de la GADA dans le domaine éolien :

Comme expliqué dans la section sur la conversion de l'énergie éolienne, il a été montré que la puissance produite par une éolienne dépend de sa vitesse de rotation et de la vitesse du vent. Sachant que la cette dernière n'est guère constante dans la nature, une utilisation à vitesse variable est imposée pour positionner le fonctionnement sur le point optimale de production de la puissance. La GADA devient la solution adaptée à ce type d'application grâce à sa capacité à fonctionner dans une large gamme de vitesses. Elle est plus intéressante dans le cas où la puissance produite n'est pas écrêtée lorsque la puissance nominale de la machine est atteinte. Pour les éoliennes utilisant GADA, le stator de celle-ci est directement connecté au réseau tandis que son rotor est connecté au réseau par une interface composée de deux convertisseurs statiques (convertisseur coté GADA et convertisseur coté réseau)[5] .

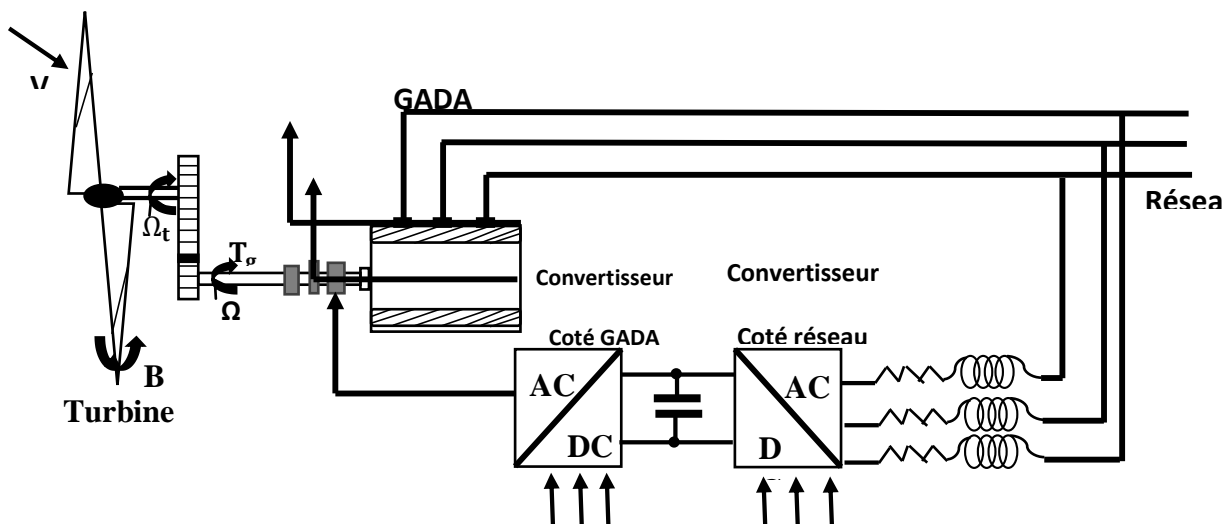


Figure I.18 : Eolienne à vitesse variable basée sur une GADA.

### I.4 Définition d'un onduleur :

L'onduleur est un convertisseur statique du domaine de l'électronique de puissance. Il assure la transformation de l'énergie d'une source continue (DC) en une énergie alternative (AC). Il fonctionne en commutation forcée. Il est conçu généralement à base de transistors (IGBT, GTO, MOSFET...). Sa commande peut être réalisée par une commande adjacente ou par la technique de SVM [35] .

$$f_i = \begin{cases} 1 & \text{l'interrupteur } i \text{ est fermé } (k_i \text{ conduit, } \bar{k}_i \text{ bloqué)} \\ 0 & \text{l'interrupteur } i \text{ est ouvert } (k_i \text{ bloqué, } \bar{k}_i \text{ conduit)} \end{cases}$$

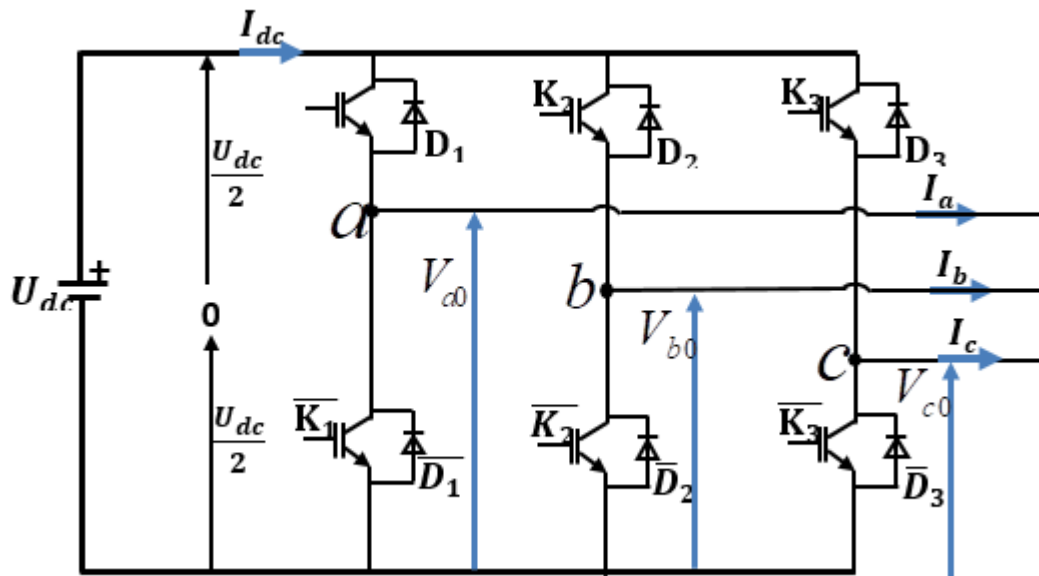


Figure I.19 : Schéma de principe de l'onduleur triphasé

#### I.4.1 Modélisation de l'onduleur à deux niveaux

La modélisation de l'onduleur de tension s'effectue en supposant que [38]

- ✓ la commutation des interrupteurs est instantanée,
- ✓ la chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable,
- ✓ la charge équilibrée et couplée en étoile avec neutre isolé.

On note  $K_1, K_2, K_3$  les interrupteurs du haut, et  $\bar{K}_1, \bar{K}_2, \bar{K}_3$  les interrupteurs du bas. On suppose que les commandes des interrupteurs d'un même bras sont complémentaires.

L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques  $S(a, b, c)$  :

- ✓ si  $S_{a1} = 1$ , alors  $K_1$  est fermée et  $\bar{K}_1$  est ouvert,
- ✓ si  $S_{a1} = 0$ , alors  $K_1$  est ouvert et  $\bar{K}_1$  est fermée.

Les tensions composées  $V_{an}, V_{bn}, V_{cn}$ , sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur comme suit :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (\text{I.1})$$

Où  $V_{ao}, V_{bo}, V_{co}$ , sont les tensions simples des phases

La machine a été modélisée à partir des tensions simples  $V_{an}, V_{bn}$  et  $V_{cn}$ . L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques  $S_j$ . Les tensions de sortie de l'onduleur s'expriment comme suit :

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

Appliquons la transformation triphasé/biphasé respectant le transfert de puissance :

$$\begin{bmatrix} V_{r\alpha} \\ V_{r\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (I.3)$$

## I.5 Modélisation de la chaîne éolienne :

### I.5.1 Conversion de l'énergie éolienne :

Une éolienne (ou aérogénérateur) est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur l'arbre de transmission par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse  $G$  sans lequel la génératrice ne peut débiter, car sa vitesse de rotation ne peut être trop faible. L'énergie mécanique reçue sur l'arbre de rotation de la génératrice électrique est ainsi transformée en énergie électrique.

Dans notre cas, le système éolien est constitué principalement des organes suivants[16]:

- une turbine à axe horizontal comprenant trois pales orientables et possédant des coefficients propres d'inertie, d'élasticité et de frottement par rapport à l'air et par rapport au support de la turbine,
- une boîte multiplicatrice de vitesse de gain  $G$  (gearbox en anglais),
- une génératrice possédant une inertie et un coefficient de frottement.

Dans cette partie, nous décrivons les principes de base de l'interaction entre les pales de la turbine éolienne et le vent pour en déduire les expressions simplifiées de la puissance convertie.

### I.5.2 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine :

Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans le cadre d'étude électromécanique sont relativement simples et obéissent à l'hypothèse simplificatrice suivante [24] [39] [40] :

- La vitesse du vent est supposée à répartition uniforme sur toutes les pales, ce qui permet de considérer l'ensemble des pales comme un seul et même système mécanique.
- Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air (dB) est très faible et peut être ignoré.
- Les pertes par frottement du rotor turbine sont considérées négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté génératrice.

**I.5.2.a) Loi de Betz :** [16] [22] [21]

La loi de Betz définit le rapport entre l'énergie de vent et l'énergie récupérée par la turbine, donc l'énergie récupérable est inférieure à l'énergie cinétique de l'air situé en amont de l'éolienne, puisque l'air doit conserver une énergie cinétique résiduelle pour qu'il subsiste un écoulement. Albert Betz a démontré que la puissance maximale récupérable est égale aux 16/27 de la puissance incidente.

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (I.20) 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 :

$$V_w = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{I.4})$$

la masse d'air en mouvement de densité  $\rho$  traversant la surface  $S$  des pales en une seconde est:

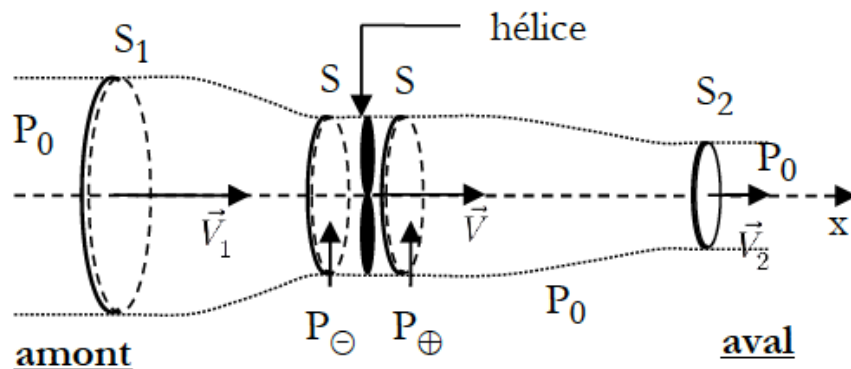
$$m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{I.5})$$

La puissance  $P_m$  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) :

$$P_m = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{I.6})$$

Soit en remplaçant  $m$  par son expression dans (I.5) :

$$P_m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (\text{I.7})$$



**Figure I.20 :** Tube de courant d'air autour d'une éolienne.

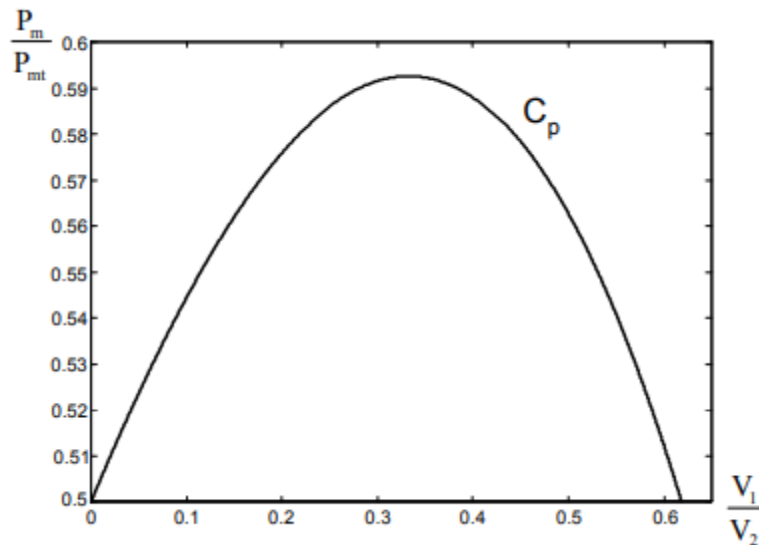
Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface  $S$  sans diminution de vitesse, soit à la vitesse  $V_1$ , la puissance  $P_{mT}$  correspondante serait alors :

$$P_{mT} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (\text{I.8})$$

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

$$\frac{P_m}{P_{mT}} = \frac{(1 + (\frac{V_1}{V_2})) (1 - (\frac{V_1}{V_2})^2)}{2} \quad (\text{I.9})$$

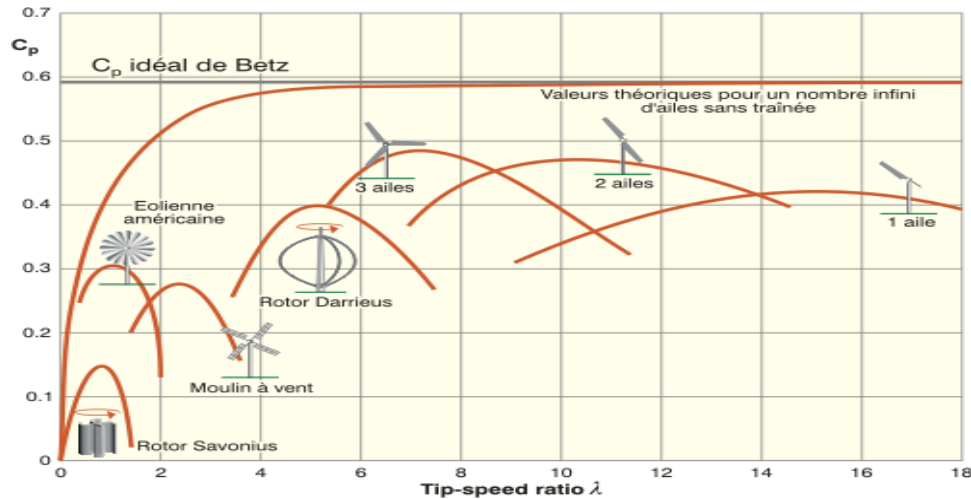
Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure I.21), on s'aperçoit que le ratio  $P_m/P_{mT}$  appelé aussi coefficient de puissance  $C_p$  présente un maxima de  $16/27$  soit 0.59 C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale 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 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.[16] [2] [41]



**Figure I.21 :** Coefficient de puissance

C'est-à-dire que  $C_p$  dépend de la vitesse spécifique :  $\lambda = \frac{R\omega}{V_w}$  (I.10)

On peut aussi définir le coefficient de couple :  $C_q = \frac{C_p}{\lambda}$  (I.11)



**Figure I.22 :** Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

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.22) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à 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 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts.

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.22) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au-dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s

### I.5.2.b) Production aérodynamiques de l'éolienne :

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique [16] [42] :

#### ✚ Puissance du vent :

L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent. L'énergie cinétique d'une quantité de vent de masse  $\rho$  et de vitesse  $v_w$  est donnée par la relation suivante :

$$E_c = \frac{1}{2} \rho v_w^2 \quad (\text{I.12})$$

Avec  $\rho$  : Masse d'air.

La puissance cinétique du vent à travers un disque éolien de rayon  $R$ , est donnée par l'équation suivante :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v_w^3 = \frac{1}{2} \rho \pi R_T^2 v_w^3 \quad (\text{I.13})$$

Avec :

$\rho$  : Masse volumique de l'air (celle-ci est de 1.225 Kg/m<sup>3</sup> en atmosphère normale) ;

$S$  : Surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale :  $S = \pi \cdot R^2$  ;

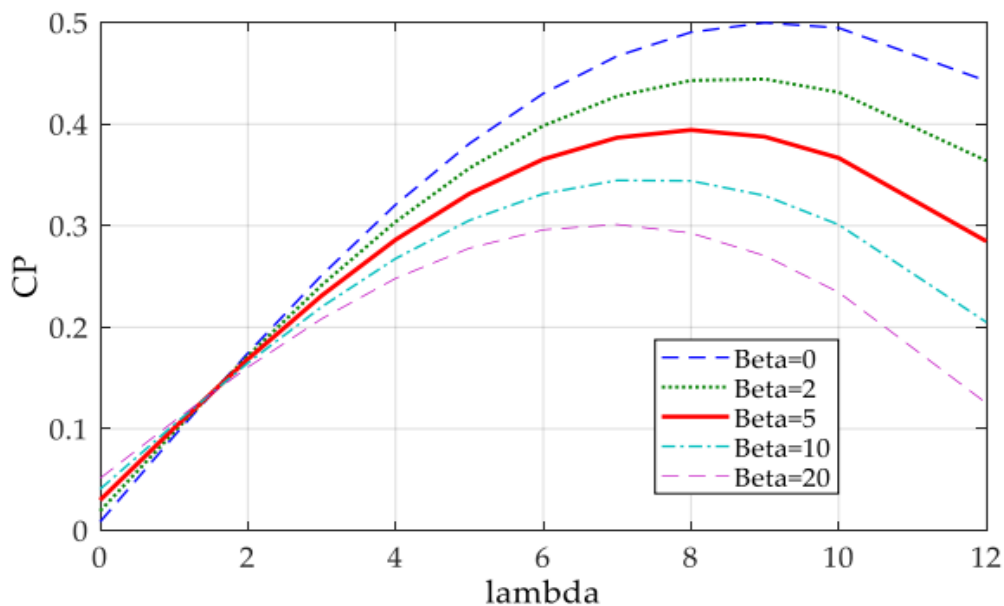
$R_T$  : Correspond pratiquement à la longueur de la pale ;

Toutefois, toute l'énergie ne peut être captée, car la vitesse du vent n'est pas nulle après l'éolienne. On introduit alors un coefficient  $C_p$  appelé coefficient de performance ou de puissance, qui dépend des caractéristiques aérodynamiques des pales. Ce coefficient correspond au rendement du rotor de l'éolienne. La puissance sur l'arbre du rotor ou la puissance aérodynamique  $P_t$  apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit :

$$P_{aer} = C_p P_v = \frac{1}{2} C_p (\lambda, \beta) \rho \pi R_T^2 v_w^3 \quad (\text{I.14})$$

Le coefficient de puissance  $C_p$ , dont le calcul est une valeur approchée de manière empirique pour une éolienne utilisant la génératrice de type Machine Asynchrone à Double Alimentation, est défini comme suit :

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.0167 \cdot (\beta - 2)) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3 \cdot (\beta - 2)}\right) - 0.00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (\text{I.15})$$



**Figure I.23 :** Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de la turbine et de l'angle d'orientation des pales.

Un tracé de la variation de ce coefficient en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$  pour différentes valeurs de l'angle d'orientation des pales  $\beta$ , (Figure I.23), permet d'avoir le point maximum de ce coefficient ( $C_p = 0.5$ ) qui correspond aux valeurs optimales ( $\lambda = 9.2$ ) et ( $\beta = 0$ ). Avec ces valeurs, la turbine fonctionnera avec un rendement maximum et fournira ainsi une puissance mécanique optimale. Une commande adaptée à ce système sera élaborée par la suite pour atteindre ce point de fonctionnement.

On définit la vitesse spécifique ou normalisée  $\lambda$  comme étant le rapport de la vitesse linéaire en bout des pales de la turbine  $\Omega_T R_T$  sur la vitesse instantanée de vent  $v_w$  elle est donnée par l'expression suivante :

$$\lambda = \frac{\Omega_T \cdot R_T}{v_w} \quad (\text{I.16})$$

Avec :

$\Omega_T$ : Vitesse angulaire de rotation des pâles (rad/s);

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique (turbine) est déterminé directement par la relation suivante :

$$C_t = \frac{P_{aer}}{\Omega_T} = \frac{1}{2} C_p (\lambda, \beta) \rho \pi R_T^2 v_w^3 \frac{1}{\Omega_T} = \frac{1}{2} C_c (\lambda, \beta) \rho \pi R_T^2 v_w^3 \quad (\text{I.17})$$

Ou :

$$C_c = \frac{C_p (\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (\text{I.18})$$

### I.5.3 Modèle du multiplicateur

La turbine éolienne, en général, tourne à une vitesse nominale de 25 à 40 (tr/mn). Le multiplicateur transforme la vitesse mécanique de la turbine en vitesse de la génératrice et le couple aérodynamique de la turbine en couple d'entraînement de la génératrice selon les expressions suivantes :

$$C_{mec} = \frac{C_t}{G}, \quad (\text{I.19})$$

Et  $\Omega_T = \frac{\Omega_{mec}}{G}$  (I.20)

Avec :

$C_{mec}$ : Couple mécanique sur l'arbre de la génératrice ;

$\Omega_{mec}$ : Vitesse de rotation (mécanique) de la génératrice [rad/s] ;

$C_t$  : Couple de la turbine (aérodynamique) [rad/s] ;

$\Omega_T$  : Vitesse de la turbine [rad/s].

### I.5.4 Modèle de la partie mécanique

L'arbre est composé d'une masse correspondant à l'inertie du rotor de la turbine supportant les pales, le moyeu et une petite inertie représentant le rotor du générateur. Dans le modèle mécanique proposé, l'inertie totale  $J$  est celle du générateur  $J_g$  et l'inertie de la turbine  $J_T$  ramenée au rotor du générateur, où [6] [43] :

$$J = J_g + J_t \quad (I.21)$$

$$C_m = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (I.22)$$

$$C_m = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (I.23)$$

Le couple issu du frottement est modélisé par le coefficient de frottement visqueux  $f$

$$C_{vis} = f\Omega_{em} \quad (I.24)$$

En remplaçant (I.22) et (I.23) dans (I.24), nous aurons :

$$C_g - C_{em} = J \frac{d\Omega_{em}}{dt} + f\Omega_{em} \quad (I.25)$$

Où  $C_{em}$  est le couple électromagnétique du GADA.

Le schéma bloc correspondant à la modélisation de la turbine éolienne se déduit aisément des équations ci-dessus et est représenté par la figure I.24

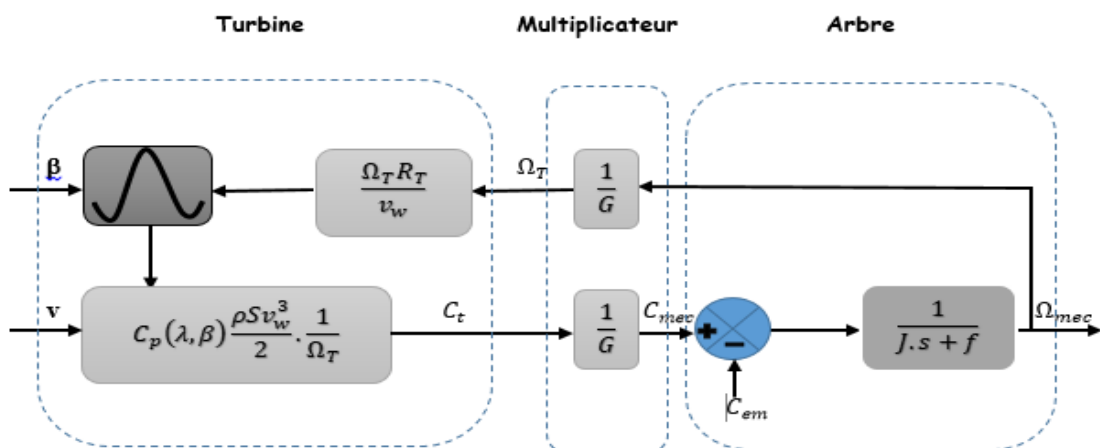


Figure I.24 : Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne

La turbine génère le couple aérodynamique qui est appliqué au multiplicateur. Les entrées de la turbine sont :

- La vitesse du vent ;
- L'angle d'orientation des pales;

Le multiplicateur transforme la vitesse de la turbine et le couple aérodynamique respectivement en vitesse mécanique et en couple de multiplicateur.

Le modèle de l'arbre décrit la dynamique de la vitesse mécanique, il a donc deux entrées :

- Le couple du multiplicateur
- Le couple électromagnétique fourni par la génératrice.

La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système

### I.5.5 Stratégie de Commande de la Turbine Eolienne : [2] [5]

Le système de contrôle le plus répandu des éoliennes traditionnelles directement connectées au réseau de distribution électrique est principalement basé sur la technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT). La technique MPPT est une méthode de contrôle de la puissance très fiable, robuste et simple à implanter. Elle consiste à déterminer et à maintenir la vitesse de la turbine à une certaine valeur qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. Il existe deux façons pour appliquer cette technique selon le genre de la vitesse de référence qu'elle soit mesurée ou estimée. Nous présenterons dans cette section la stratégie de commande MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique.

Dans la figure I.25 suivante on constate 4 zones principales de fonctionnement :

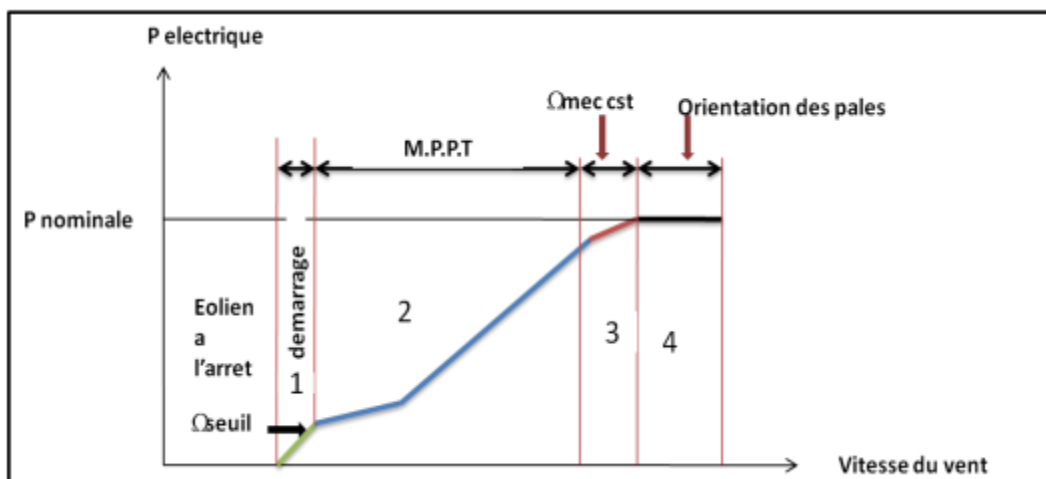


Figure I.25 : Caractéristiques vitesse et puissance d'une éolienne

L'objectif de cette régulation est double, d'une part de protéger l'éolienne par vent fort et d'autre part de délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour

fournir une puissance nominale  $P_n$  à une vitesse de vent nominale  $V_{nom}$ , au delà de cette vitesse les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au-delà d'une vitesse maximale  $V_{max}$  qui pourrait endommager la turbine. On peut définir quatre zones de fonctionnement : [5] [44]

- ✚ la zone I : le vent n'est pas suffisant pour faire fonctionner la turbine.
- ✚ la zone II : la puissance fournie par l'arbre va dépendre de la vitesse du vent.
- ✚ la zone III : la vitesse de rotation est maintenue constante par régulation de la vitesse et la puissance  $P$  fournie reste égale à  $P_n$ .
- ✚ la zone IV : la vitesse de vent est trop importante, pour ne pas détériorer le générateur éolien, les pales de la turbine sont mises en drapeaux ( $\beta = 90^\circ$ )

### I.5.6 Commande de la turbine avec la stratégie MPPT (maximum): [5]

Le système de contrôle le plus répandu des éoliennes traditionnelles directement connectées au réseau électrique de distribution, est basé principalement sur la technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT),[43] et ce sans supervision centralisée .

Celles-ci doivent se déconnecter du réseau électrique lorsqu'un défaut survient sur ce dernier. Par conséquent, elles n'offrent aucune capacité de réglage quant à leur production et ne peuvent en aucun cas contribuer aux services système. Nous présenterons dans cette section la stratégie de commande MPPT sans mesure de vitesse du vent.

Pour extraire la puissance maximum générée, nous devons fixer le ratio de vitesse optimal et le coefficient de puissance maximum  $C_{pmax}$ , la mesure de la vitesse du vent est  $\lambda_{optim}$  difficile, une estimation de sa valeur pouvons être obtenus

$$C_p = C_{pmax} = 0.48 \quad \text{pour} \quad \lambda = \lambda_{optim} = 8.1 \quad \text{et} \quad \beta = 0.$$

$$v_{est} = \frac{R_T \cdot \Omega_T}{\lambda_{optim}} \quad (I.25)$$

La puissance aérodynamique de référence est donnée comme suit :

$$P_{aer\_erf} = \frac{1}{2} C_{p\_max} \rho S_w v_{est}^3 \quad (I.26)$$

$$\text{Ou : } S_w = \pi R^2 \quad (I.27)$$

Le couple électromagnétique peut s'exprimer comme suit :

$$C_{em\_erf} = \frac{P_{aer\_erf}}{\Omega_t} = \frac{1}{2} C_{p\_max} \rho \pi \frac{R^5 \Omega_t^2}{\lambda_{optim}^3} \quad (I.28)$$

Ci-dessous la figure I.26 correspondant au schéma bloc de la stratégie MPPT sans mesure de la vitesse

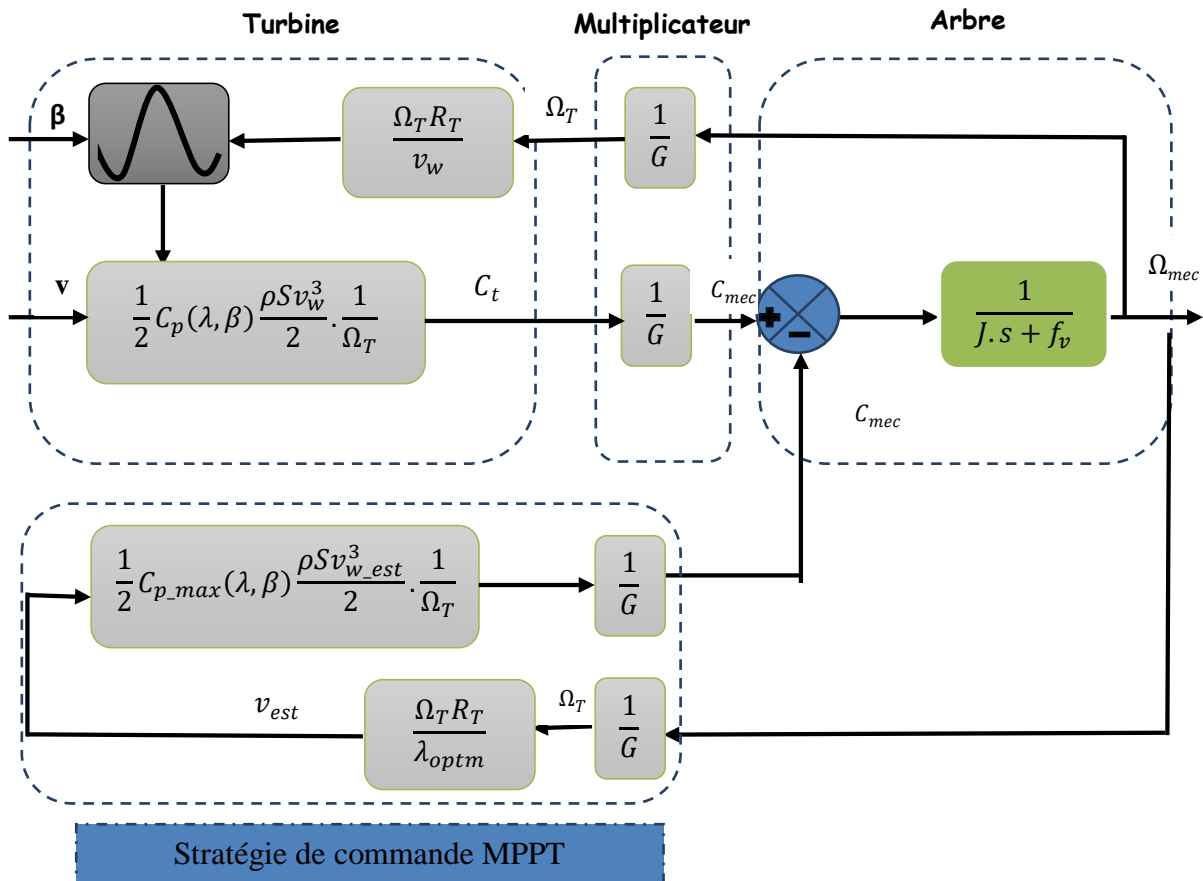


Figure I.26 : Schéma bloc de la stratégie MPPT sans mesure de la vitesse

## I.6 MODELISATION DE LA PARTIE DE CONVERSION ELECTROMECHANIQUE :

La théorie de la machine asynchrone à double alimentation est basée sur la transformation de Park qui rapporte les équations statoriques et rotoriques triphasées à des axes perpendiculaires (biphasés), appelés l'axe direct d et axe en quadrature q [45] [46].

### I.6.1 Hypothèses simplificatrices :

La complexité de la répartition des enroulements et de la géométrie de la machine asynchrone nécessite l'adoption d'hypothèses simplificatrices, qui sont physiquement admissibles, dans le but d'élaborer un modèle simple [7] [47]:

- Nous supposons les circuits magnétiques non saturés, et les relations entre les flux et les courants sont d'ordre linéaire.
- Nous considérons une densité de courant uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, l'effet de peau est donc négligé.
- Le phénomène d'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés
- Les enroulements statoriques et rotoriques sont symétriques et la f.m.m est distribuée sinusoïdalement le long de la périphérie des deux armatures.

- Les résistances ne varient pas avec la température et l'effet de peau négligé.
- L'entrefer constant

### I.6.2 Représentation de la GADA dans un repère triphasé (abc) :

Les équations générales de la machine asynchrone à double alimentation dans un repère triphasé[5]

#### ➤ Equations électriques :

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

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \end{cases} \quad (I.29)$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}; \quad [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix}; \quad [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}; \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}; \quad [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix}; \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Où:  $R_s$  et  $R_r$  sont respectivement les résistances des enroulements statoriques et rotoriques.

$V_s, V_r$  : sont respectivement les tensions simples statoriques et rotoriques.

$I_s, I_r$  : sont les courants de phase statoriques et rotoriques.

$\varphi_s, \varphi_r$  : les flux respectivement statoriques et rotoriques.

#### ➤ Equations magnétiques :

Les équations des flux magnétiques qui régissent la GADA sont :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \end{cases} \quad (I.30)$$

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}; \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

Où :  $[L_{ss}]$ ,  $[L_{rr}]$  : sont respectivement les matrices des inductances statoriques et rotoriques.

$l_s, l_r$  : sont respectivement les inductances propres des phases statoriques et rotoriques.

$M_s$  et  $M_r$  : sont les inductances mutuelles entre les phases statoriques et rotoriques.

$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T$  : est la matrice des inductances mutuelles ou matrice de couplage stator-rotor qui est donnée par la formule (II.29) :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M_{\max} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$M_{\max}$  : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

En remplaçant (II.28) dans (II.27), on obtient le système d'équations ci-dessous :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [[L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r]] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [[L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s]] \end{cases} \quad (\text{I.31})$$

#### ➤ Equation mécanique :

L'équation mécanique de la machine est donnée comme suit :

$$C_{em} = C_r + f_v \cdot \Omega + J \cdot \frac{d\Omega}{d\theta} \quad (\text{I.32})$$

Avec :

$C_{em}$  : Le couple électromagnétique de la machine ;  $C_r$  Le couple résistant ;

$f_v$  Le coefficient de frottement visqueux de la MADA ;

$\Omega$  : La vitesse de rotation de l'axe de la MADA ;  $J$  l'inertie des parties tournantes.

$$C_{em} = p \cdot [I_s]^t \frac{d}{d\theta} [[M_{sr}] \cdot [I_r]] \quad (\text{I.33})$$

Où  $p$  : le nombre de paires de pôles de la MADA.

### I.6.3 Transformation de PARK :

Les transformations utilisées doivent conserver la puissance instantanée et la réciprocité des inductances mutuelles. Parmi les transformations utilisées, on cite celle de Park. (Figure I.27)

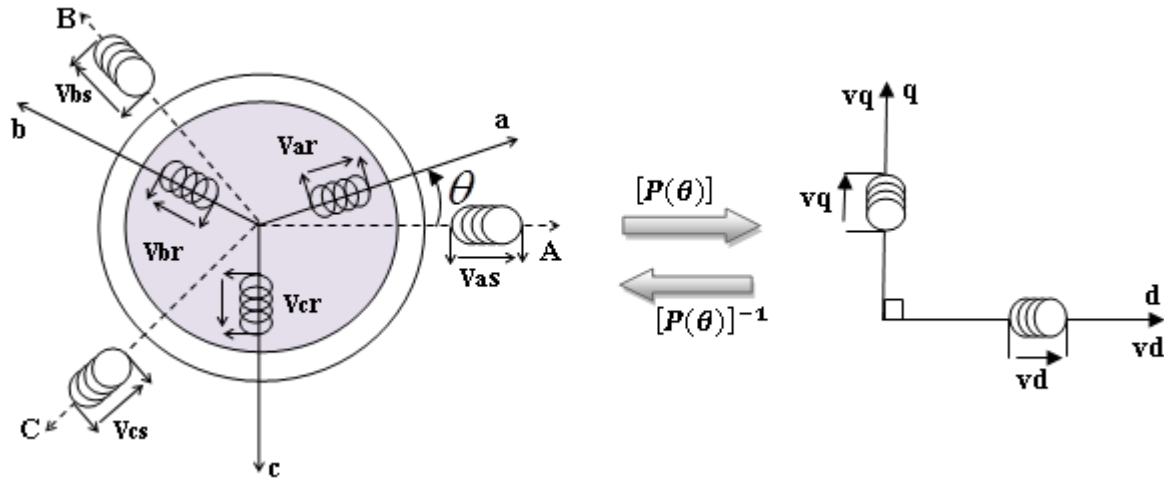


Figure I.27 : Passage du triphasé au biphasé et l'inverse

La machine asynchrone est une machine fortement couplée, sa représentation dans le système triphasé est par conséquent particulièrement complexe. Pour mieux représenter le comportement d'une machine asynchrone, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis et suffisamment simple. Le modèle diphasé (d-q) donné par la transformation de Park est alors utilisé. Le nouveau modèle est obtenu en multipliant les équations des flux et des tensions par la matrice de Park qui s'exprime par [9] :

$$[p(\theta)] = K \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{I.34})$$

Dans le cas de la conservation de la puissance nous avons  $K = \sqrt{\frac{2}{3}}$

Pour les grandeurs statoriques :  $\theta = \theta_s$

Et pour les grandeurs rotorique :  $\theta = \theta_s - \theta_r$

$$[p(\theta)]^{-1} = K \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{I.35})$$

Le changement de variables relatifs aux (courants, tensions et flux) est défini par la transformation (II.14) :

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [p(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{I.36})$$

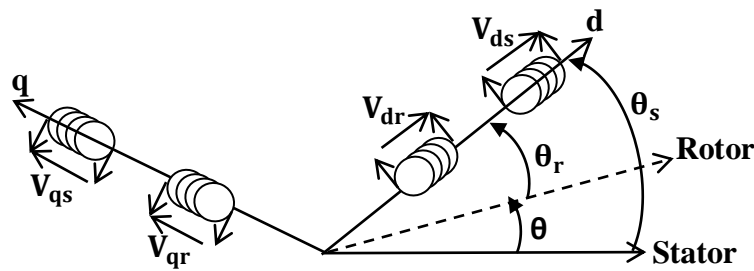


Figure I.28 : Représentation de la machine dans le repère diphasé

### ➤ Equation des tensions :

Après l'application de transformation de Park pour l'équation (I.35) du stator et l'équation (I.36) du rotor, les expressions des tensions statorique et rotorique suivant l'axe (d, q) sont données par :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \end{array} \right. \quad (\text{I.37})$$

Pour les grandeurs statoriques :

$$\theta = \theta_s \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad (\text{I.38})$$

Et pour les grandeurs rotorique :

$$\theta = \theta_s - \theta_r \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{d(\theta_s - \theta_r)}{dt} = \omega_s - \omega_r \quad (\text{I.39})$$

Tel que :

$\omega_s$  Pulsation du champ tournant d'axe (d, q).

$\omega_r$  Pulsation électrique du rotor.

La composante homopolaire du système (I.39) est nulle pour un système équilibré.

➤ **Equation des flux :**

Les équations des flux magnétiques qui régissent la GADA dans le repère biphasé (d, q) sont[5] :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{I.40})$$

Avec :  $L_s = l_s - M_s$  ,  $L_r = l_r - M_r$  ,  $M = M_{sr}$

$L_s$  ,  $L_r$  :les inductances cycliques statoriques et rotoriques de la machine.

$M$  : L'inductance mutuelle.

En remplaçant (I.37) dans (I.40), on obtient le système d'équations ci-dessous :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + L_s \frac{dI_{sd}}{dt} + M \frac{dI_{rd}}{dt} - \omega_s L_s I_{sq} - \omega_s M I_{rq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + L_s \frac{dI_{sq}}{dt} + M \frac{dI_{rq}}{dt} + \omega_s L_s I_{sd} + \omega_s M I_{rd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + L_r \frac{dI_{rd}}{dt} + M \frac{dI_{sd}}{dt} - \omega_s L_r I_{rq} - \omega_s M I_{sq} + \omega_r L_r I_{rq} + \omega_r M I_{sq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + L_r \frac{dI_{rq}}{dt} + M \frac{dI_{sq}}{dt} + \omega_s L_r I_{rd} + \omega_s M I_{sd} - \omega_r L_r I_{rd} - \omega_r M I_{sd} \end{cases} \quad (\text{I.41})$$

➤ **Equation du couple électromagnétique :**

L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (I_{rd} \varphi_{sq} - I_{rq} \varphi_{sd}) \quad (I.42)$$

Avec  $p$  : le nombre de paires de pôles de la GADA.

Les expressions des puissances active et réactive statoriques sont données par :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (I.43)$$

## I.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons décrit les parties essentielles de système de conversion éolienne, la première représente un aperçu général sur l'énergie éolienne basé sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA) qui est la machine la plus utilisée dans le domaine de conversion éolienne à savoir les principales théories qui régissent l'interaction entre le vent et la turbine éolienne, ensuite différentes structures qui composent la chaîne de conversion éolienne existante ainsi que les différentes configurations de l'association machine convertisseur.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons étudié la partie mécanique qui contient la turbine, le multiplicateur et l'arbre de la GADA. Et la modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi, dont la complexité a été réduite. Nous avons constaté que le modèle de la machine asynchrone à double alimentation est un système à équations différentielles, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle.

Dans le prochain chapitre, nous allons appliquer la commande directe des puissances (DPC) sur le convertisseur (CCM) déjà modélisé.

# Chapitre II:

*Commande directe de puissance (DPC-SVM)  
de la GADA*

## II.1 INTRODUCTION :

La grande similitude entre une machine électrique, alimentée par un onduleur de tension triphasé, et le redresseur à MLI triphasé connecté au réseau, a permis l'émergence d'une technique de contrôle analogue au DTC, appelée contrôle direct de puissance (DPC : Direct Power Control en anglais) [48] [49]. La première configuration de ce type de contrôle a été proposée par T. Neghouchi en 1998, pour le contrôle direct des puissances instantanées actives et réactive du redresseur à MLI triphasé sans capteurs de tension du réseau [50]. Le but commun de ce contrôle était d'assurer le prélèvement de courants sinusoïdaux tout en garantissant un facteur de puissance unitaire avec un contrôle découplé des puissances active et réactive. La technique DPC se caractérise par sa réponse dynamique rapide, sa structure simple et d'une faible dépendance vis-à-vis des paramètres de la machine [5].

Dans la première partie de ce chapitre la technique DPC est proposée pour le contrôle de la puissance active et réactive statoriques. Cette stratégie est basée sur la sélection d'un vecteur de tension de telle manière que les erreurs entre les grandeurs mesurées et de référence sont réduites et maintenues entre les limites des bandes d'hystérésis[2]. Ce type de commande considère le convertisseur associé à la machine « CCM » comme un ensemble où le vecteur de commande est constitué par les états de commutation.

Dans la deuxième partie de cet chapitre nous allons présenter une amélioration de la commande étudiée dans la première partie de cet chapitre par l'introduction d'une modulation vectorielle (SVM) qui offre l'avantage de la fréquence fixe du CCM qui alimente le rotor de la MADA.

Dans cette stratégie de commande, la puissance active et réactive sont régulés par deux régulateurs de type PI classique en utilisant l'algorithme « SVM », alors, la table de commutation et les correcteurs à hystérésis ont été éliminés.

Cette commande DPC-SVM possède les avantages du contrôle vectoriel et du DPC classique pour surpasser le problème des fluctuations au niveau des puissances et des courants générés par la MADA au réseau électrique. Les régulateurs proportionnel-intégral (PI) et la technique de modulation vectorielle sont donc employés pour obtenir une fréquence de commutation fixe et moins de pulsations des puissances[5].

A la fin de ce chapitre, les résultats de simulation de cette stratégie de commande appliquée sur la MADA sous environnement MATLAB/SIMULINK seront présentés et discutés afin de mettre en évidence les performances apportées par cette technique de contrôle à la commande des systèmes de conversion d'énergie éolienne.

## II.2 THEORIE DE LA COMMANDE DIRECTE DE PUISSANCE :

Généralement, les systèmes évoluent sur des bases qui sont à l'origine très simples et qui se complexifient avec le temps. Le passage de la commande vectorielle vers la commande directe de couple et de flux (DTC) est marqué par une simplification majeure de l'algorithme de commande. Seulement, on pourrait vraiment se demander pourquoi le développement de la commande directe des puissances active et réactive (DPC) n'est pas survenu avant la

commande DTC[2]. En effet, si la simplification de l'algorithme de commande a été majeure dans le premier cas, elle l'est tout autant lorsque l'on regarde le passage de la commande DTC vers la commande DPC [51]

Le développement de cette nouvelle technique (vis-à-vis la DTC) de commande est basé exactement sur les mêmes relations vectorielles qui gouvernent la commande DTC. Seulement, plutôt que de s'attarder à contrôler des composantes estimées à partir des paramètres de la machine, la commande s'intéresse uniquement à l'échange des puissances active et réactive entre la machine et sa source d'alimentation. De plus, puisque l'on peut calculer les puissances instantanées sans avoir recours à des transformations de référentiels en rotation, l'angle de la position des phases rotoriques ne sera alors plus nécessaire. Aussi, la puissance étant directement calculée à partir des courants et de la tension, la connaissance des paramètres de la machine ne sera plus requise, une caractéristique aussi étonnante que les performances qui en découlent, à rendre jaloux n'importe quel manufacturier d'entraînements électriques [9] [52].

### II.3 PRINCIPE GENERAL DE LA DPC CLASSIQUE (DPC-C) :

La structure globale de la DPC-C, utilisant une table de commutation prédéfinie, appliqué au convertisseur triphasé coté machine « CCM », est illustrée à la figure (II.1). Elle est similaire à celle du contrôle direct de couple (DTC) des machines à induction. Au lieu du couple et du flux rotorique, ce sont les puissances instantanées actives et réactives statoriques qui sont les grandeurs contrôlées.

Le principe de la technique DPC-C consiste à sélectionner une séquence des ordres de commutation ( $S_a, S_b, S_c$ ) des semi-conducteurs constituant le convertisseur coté machine, à partir d'une table de commutation. La sélection s'effectue sur la base des erreurs numérisées ( $\varepsilon P_s$  et  $\varepsilon Q_s$ ) entre les références des puissances active et réactive ( $P_s^*$  et  $Q_s^*$ ) et les valeurs réelles ( $P_s$  et  $Q_s$ ) fournies par deux comparateurs à hystérésis de sorties numérisées  $H_P$  et  $H_Q$  respectivement, ainsi que sur le secteur (zone) dans lequel le vecteur du flux rotorique se trouve [5] [53] [54].

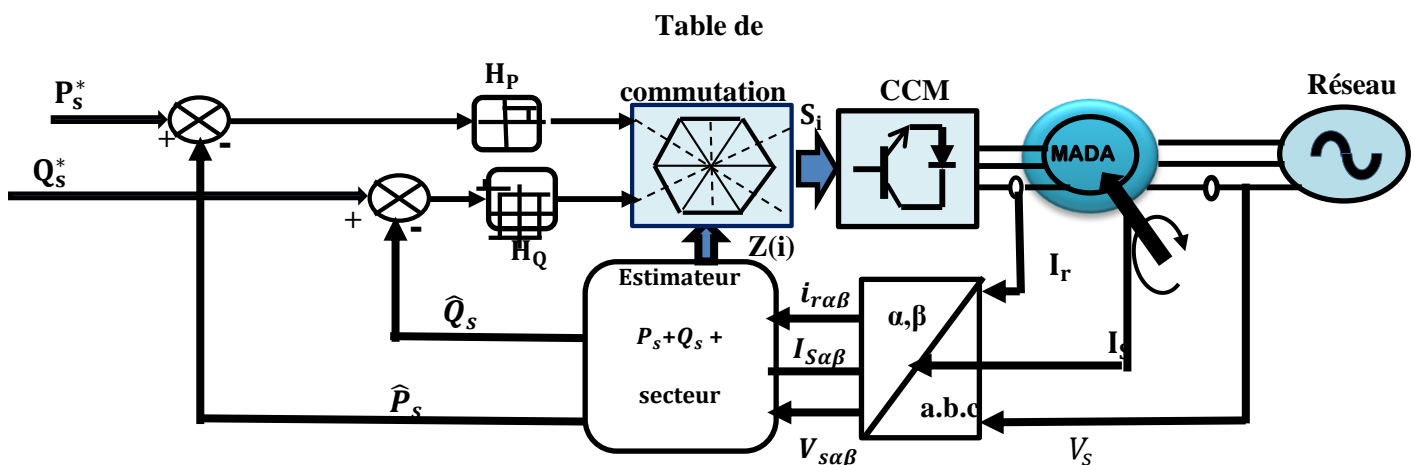


Figure II.1 : Configuration de la DPC-C de la MADA

## II.4 DPC-C de la MADA :

Le contrôle direct de puissance (DPC) est basé sur le concept du contrôle direct du couple appliqué aux machines électriques. Le but est réaliser une table de commutation assurant un contrôle simultané des puissances active et réactive, dans tous les secteurs, il est nécessaire d'étudier les variations provoquées par l'application de chacun des vecteurs de commande sur ces dernières, et cela au cours d'une période complète de la tension rotorique. Les vecteurs de commande sélectionnés dans cette table de commutation doivent assurer la restriction de l'erreur de suivi de référence des deux puissances active et réactive, simultanément[50] [53] [2].

### II.4.1 Estimation de la puissance active et réactive :

Il y a trois méthodes pour calculer la puissance active et réactive[2] [7, 23]:

- ❖ Par la mesure des courants et des tensions,
- ❖ Par estimation des tensions du réseau et mesure des courants,
- ❖ Par estimation du flux virtuel et mesure des courants.

La puissance active  $P_s$  et réactive  $Q_s$  sont contrôlées par deux comparateurs à hystérésis.

Les valeurs mesurées des puissances statoriques sont estimées à partir des relations suivantes

$$\begin{cases} P_s = (V_{s\alpha} I_{s\alpha} + V_{s\beta} I_{s\beta}) \\ Q_s = (V_{s\beta} I_{s\alpha} - V_{s\alpha} I_{s\beta}) \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

N.B : Pour le passage du repère (a,b,c) vers le repère ( $\alpha, \beta$ ), on utilise la transformation directe de Concordia

La puissance de référence  $P_s^*$  est issue de la stratégie MPPT.

Ces deux valeurs réelles de puissance active et réactive seront par la suite comparées avec les valeurs de référence  $P_s^*$  et  $Q_s^*$ .

Par la suite, les erreurs entre les valeurs réelles et de référence seront introduites dans deux comparateurs à hystérésis.

### II.4.2 Secteurs du Flux rotorique [7]

Les expressions du flux rotorique dans le repère  $\alpha\beta$  s'écrivent comme suit :

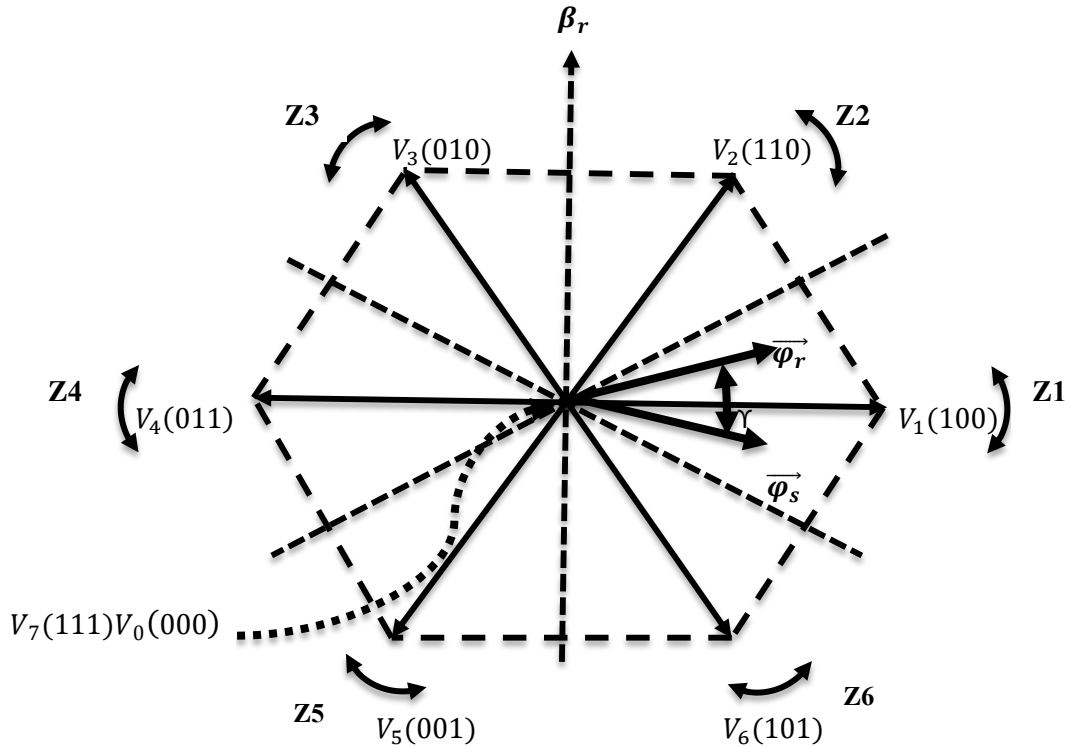
$$\begin{cases} \varphi_{r\alpha} = L_r I_{r\alpha} + M I_{s\alpha} \\ \varphi_{r\beta} = L_r I_{r\beta} + M I_{s\beta} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

L'angle du flux rotorique est donné par :

$$\gamma = \arctan(\varphi_{r\beta} / \varphi_{r\alpha}) \quad (\text{II.3})$$

Cet angle va nous permettre de déterminer la position du flux rotorique dans le plan  $\alpha\beta$ .

Il y a six vecteurs actifs et deux vecteurs nuls. Les positions spatiales dans le plan ( $\alpha$ - $\beta$ ) des Vecteurs actifs de tensions sont montrées dans la Figure II.2



**Figure II.2 :** Présentation des vecteurs de commutation

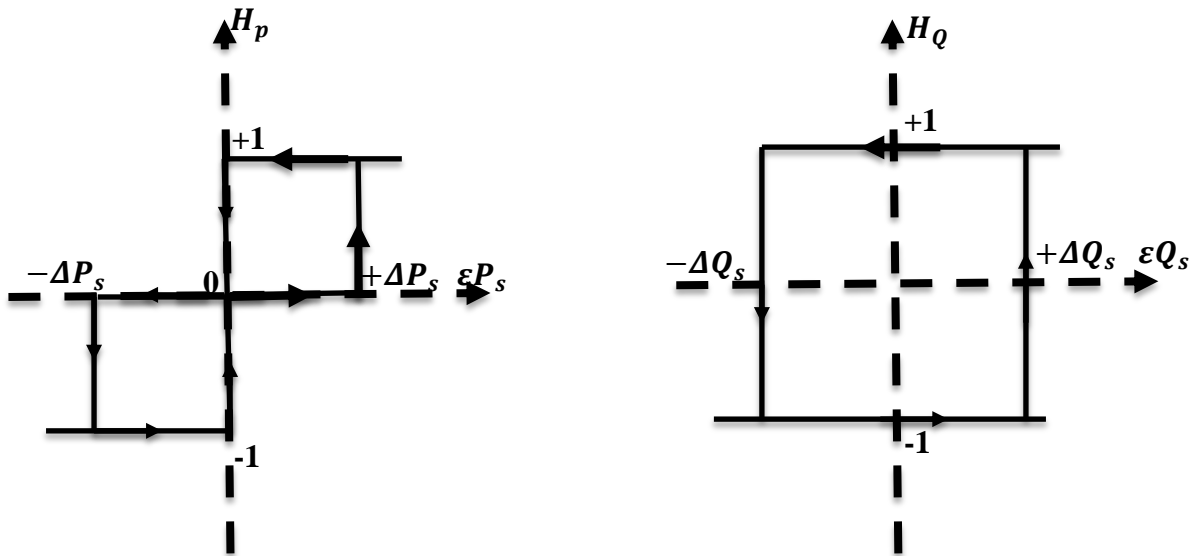
Le partage du plan complexe en six zones angulaires  $Z$  ( $i=1, \dots, 6$ ) peut être déterminé par la relation suivante :

$$-\frac{\pi}{6} + (i-1)\frac{\pi}{3} \leq Z(i) < \frac{\pi}{6} + (i-1)\frac{\pi}{3} \quad (\text{II.4})$$

#### II.4.3 Choix des comparateurs à hystérésis :

Afin d'obtenir de très bonnes performances dynamiques, le choix d'un correcteur à hystérésis à deux niveaux semble être la solution la plus simple et la mieux adaptée à la commande de la puissance active et réactive. Ces comparateurs (figure II.3) doivent permettre de contrôler l'échange de la puissance active et réactive entre la GADA et le réseau électrique dans les deux sens et avec les deux modes de fonctionnement hypo et hyper-synchrone de la GADA.

La DPC pour la GADA est basée sur la sélection d'un vecteur de tension rotorique de telle manière que les erreurs entre les grandeurs mesurées et de référence sont réduites et maintenues entre les limites des bandes d'hystérésis[5] .



**Figure II.3 :** Comparateurs à hystérésis : (a) puissance active, (b) puissance réactive [1]

Ces comparateurs à hystérésis, appliqués sur la puissance active et réactive, permettent de détecter les dépassements de la zone de contrôle et de respecter :

$$\text{Si } \varepsilon Q_s \geq \Delta Q_s \Rightarrow H_Q = 1$$

$$\text{Si } \varepsilon Q_s \leq -\Delta Q_s \Rightarrow H_Q = 0$$

$$\text{Si } \varepsilon P_s \geq \Delta P_s \Rightarrow H_p = 1 \tag{II.5}$$

$$\text{Si } -\Delta P_s \leq \varepsilon P_s \leq \Delta P_s \Rightarrow H_p = 0$$

$$\text{Si } \varepsilon P_s \leq -\Delta P_s \Rightarrow H_p = -1$$

Les comparateurs analogiques présentent un inconvénient notable qui réside dans le fait que la fréquence d'échantillonnage soit variable. Ce problème peut être éliminé en utilisant des comparateurs discrets. Par cela, les variations des puissances ne sont pas maintenues exactement dans la bande d'hystérésis, mais fonctionnent à temps d'échantillonnage fixe[48].

#### II.4.4 Elaboration de la table de commutation :

Les signaux de  $H_p$  et  $H_Q$  (Figure II.3) ainsi que le secteur du vecteur flux rotorique  $Z_i$  (Figure II.2), représentent les entrées de cette table de vérité (Tableau II.1), alors que les états de commutation  $S_a$ ,  $S_b$ ,  $S_c$  représentent sa sortie (vecteurs optimaux). Un onduleur triphasé à deux niveaux de tension peut produire huit combinaisons différentes, ces huit combinaisons engendrent huit vecteurs de tension à partir des sorties ( $S_a$ ,  $S_b$ ,  $S_c$ ) qui peuvent être appliqués aux bornes rotoriques de la GADA.

On peut voir que la dynamique de la puissance réactive est de forme sinusoïdale pour tous les vecteurs de tension d'entrée du redresseur. Par contre, la dynamique de la puissance active à une forme d'onde sinusoïdale décalée comme le montre la figure (II.4).

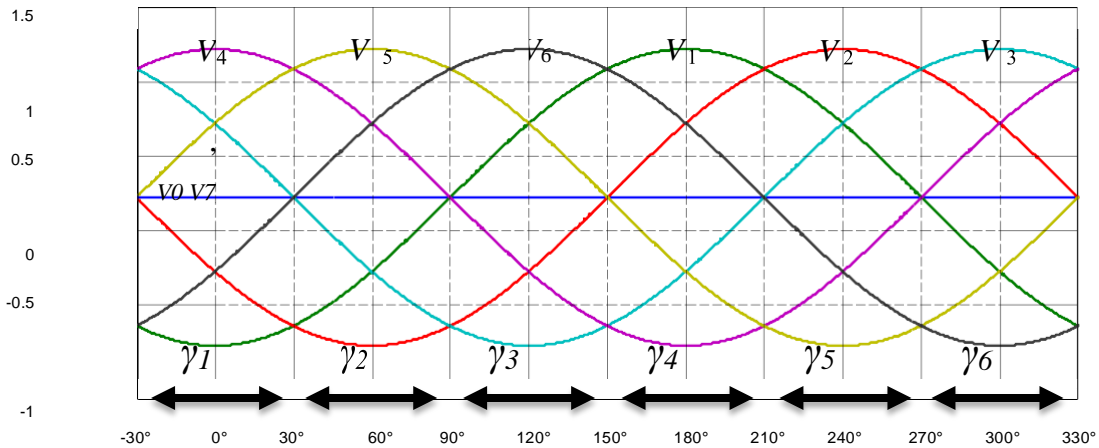


Figure II.4 : Dérivée de la puissance active dans tous les secteurs

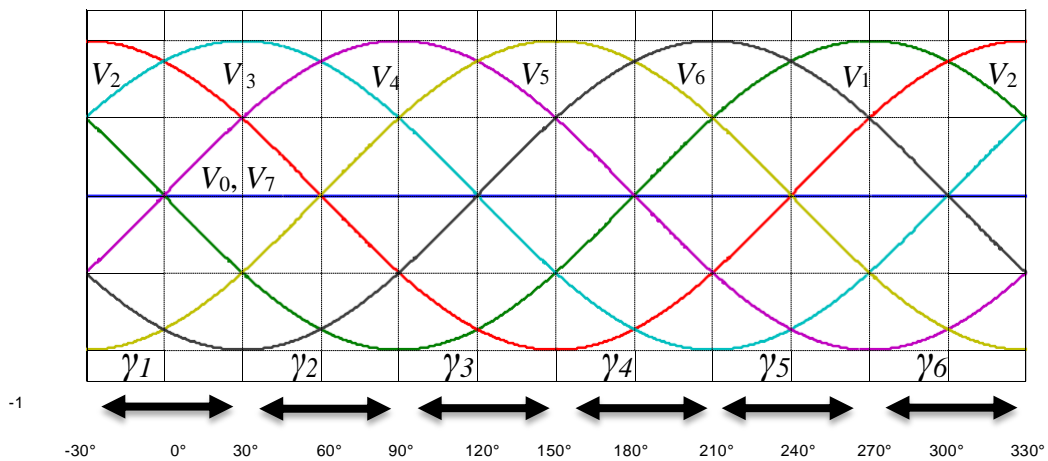


Figure II.5 : Dérivée de la puissance réactive dans tous les secteurs

La synthèse de la table de commutation est basée sur les signes des dérivées des puissances active et réactive dans chaque secteur[50].

Pour chaque secteur, le changement de la puissance réactive est positif pour trois vecteurs, négatif pour trois vecteurs, et zéro pour  $V_0, V_7$ . Le signe du changement de la puissance active est positif pour quatre vecteurs, négatif pour deux ou trois vecteurs. Par exemple, pour le premier secteur les vecteurs qui influent sur le signe du changement des puissances active et réactive sont résumés dans le Tableau (II.1).

$\Delta P > 0$	$\Delta P < 0$	$\Delta P = 0$	$\Delta Q > 0$	$\Delta Q < 0$
$V_3, V_4, V_5, V_0$	$V_1, V_6$	$V_0, V_7$	$V_2, V_3, V_4$	$V_5, V_6$

Tableau II.1 : Changement des puissances active et réactive dans le secteur  $\gamma_1$

Pour chaque combinaison des signaux de sortie d'hystérésis,  $H_p$  et  $H_q$ , les vecteurs de tension choisis pour le secteur  $\gamma_1$ , sont montrés dans le Tableau (II.2).

<i>Secteur 1</i>	$\Delta Q_1$		$\Delta Q_1 > 0 \Rightarrow H_q = 1$	$\Delta Q_1 < 0 \Rightarrow H_q = 0$
	$\Delta P_1$	$\Delta P_1 > 0 \Rightarrow H_p = 1$ $\Delta P_1 < 0 \Rightarrow H_p = 0$	$V_3$ $V_1$	$V_4, V_5$ $V_6$

**Tableau II.2 :** Vecteurs de tension choisis pour le secteur  $\gamma_1$

Pour tous les secteurs la table de commutation proposée est représentée dans la Table (II.3).

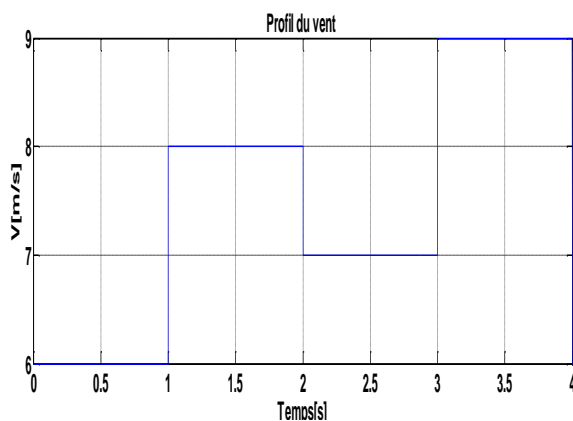
		Comparateur	3 niveaux			3 niveaux		
			2 niveaux			2 niveaux		
		Puissance réactive $H_q$	1			0		
		Puissance active $H_p$	1	0	-1	1	0	-1
Secteur Z(i) vis-à-vis de l'angle $\delta$	1	(330°,30°)	$V_5$	$V_7$	$V_3$	$V_6$	$V_0$	$V_2$
	2	(30°,90°)	$V_6$	$V_0$	$V_4$	$V_1$	$V_7$	$V_3$
	3	(90°,150°)	$V_1$	$V_7$	$V_5$	$V_2$	$V_0$	$V_4$
	4	(150°,210°)	$V_2$	$V_0$	$V_6$	$V_3$	$V_7$	$V_5$
	5	(210°,270°)	$V_3$	$V_7$	$V_1$	$V_4$	$V_0$	$V_6$
	6	(270°, 330°)	$V_4$	$V_0$	$V_2$	$V_5$	$V_7$	$V_1$

$V_0=[0,0,0]$  ;  $1=[1,0,0]$  ;  $V_2=[1,1,0]$  ;  $V_3=[0,1,0]$  ;  $V_4=[0,1,1]$  ;  $V_5=[0,0,1]$  ;  $V_6=[1,0,1]$  ;  $V_7=[1,1,1]$  ;

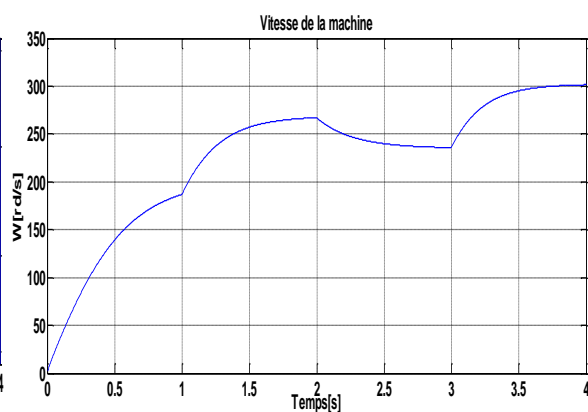
**Tableau II.3 :** Table de commutation classique

### II.5 RESULTATS DE SIMULATION DU DPC\_C :

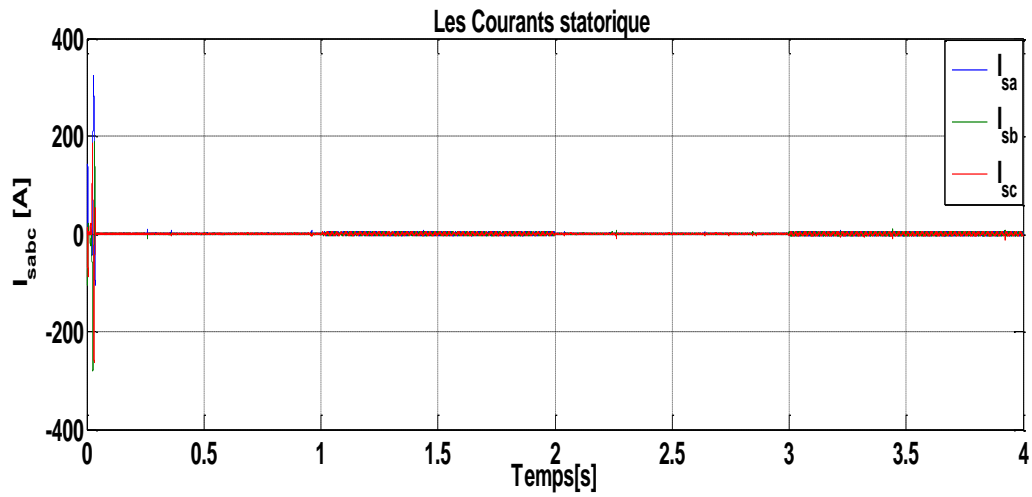
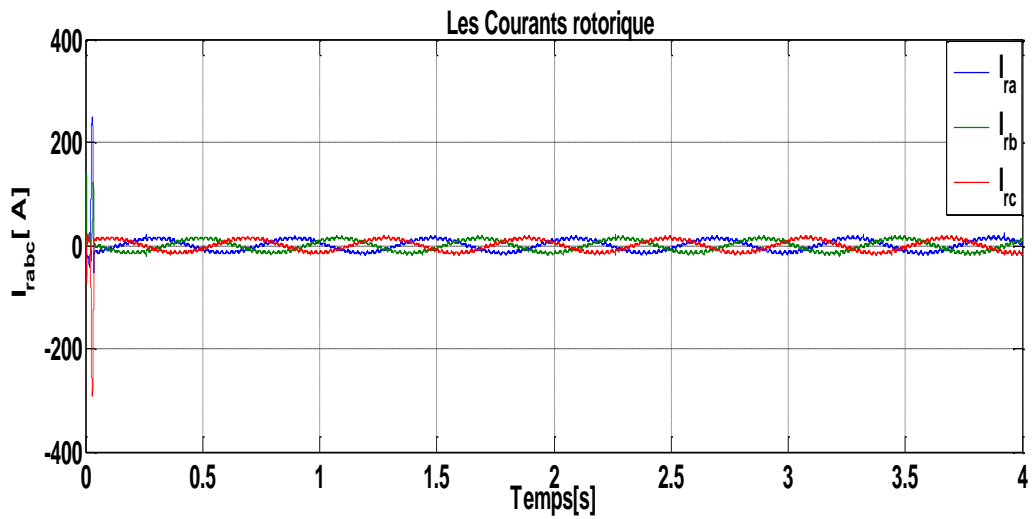
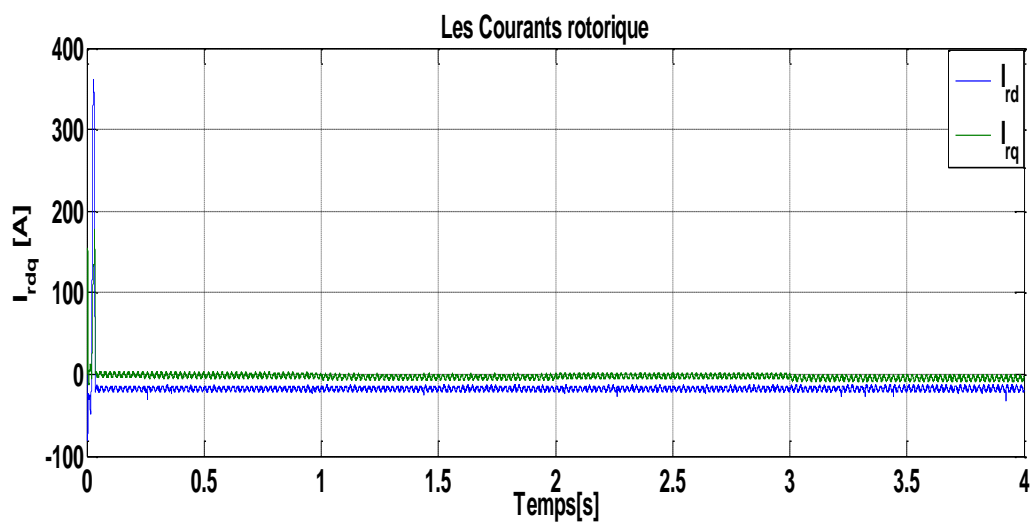
**A. Fonctionnement à vitesse du vent fixe :** Dans cet essai, nous avons appliqué au système éolien une vitesse du vent fixe égale 304 m/s. Donc ce premier essai consiste à imposer des échelons de la puissance active et réactive, ce qui nous permet de vérifier le découplage entre les deux puissances de la GADA

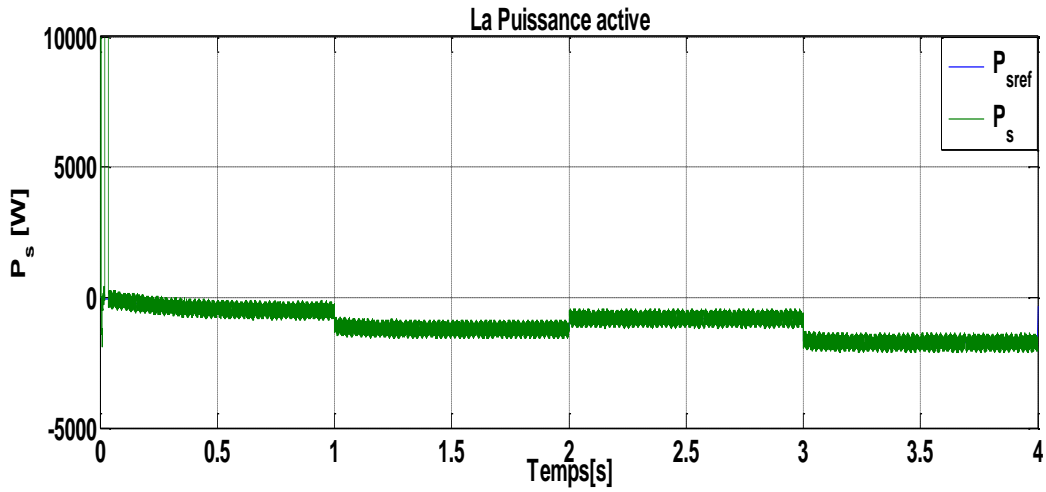


**Figure II.6 :** Profil du vent appliqué

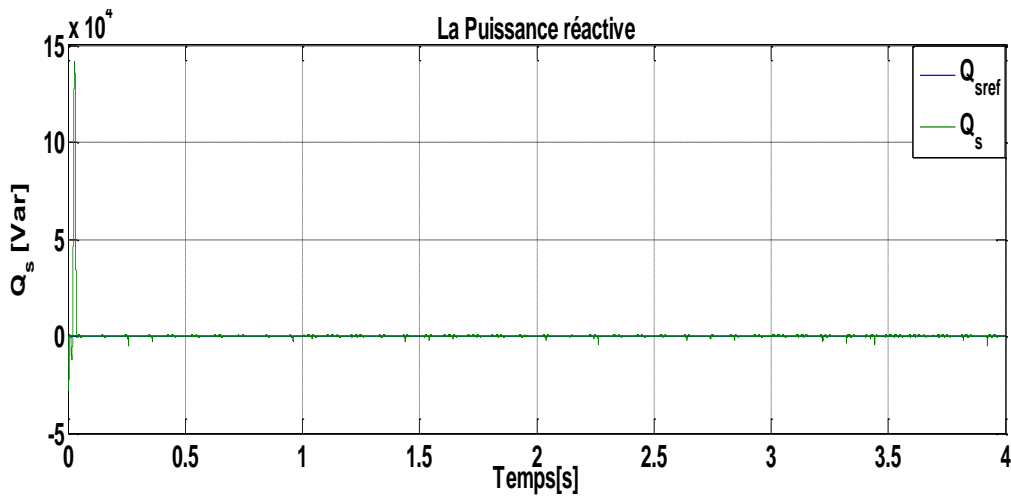


**Figure II.7 :** Vitesse de la turbine selon le MPPT

A) Les Courants statorique  $I_{sabc}$  (A)B) Les Courants rotorique  $I_{rabc}$  (A)C) Les Courants rotorique  $I_{rdq}$  (A)



D) La Puissance active  $P_s$  (W)



E) La Puissance réactive  $Q_s$  (Var)

Figure II.8 : Résultats de simulation de la DPC-C de la GADA pour vitesse du vent fixe.

**B. Fonctionnement à vitesse du vent variable (contrôle MPPT)**

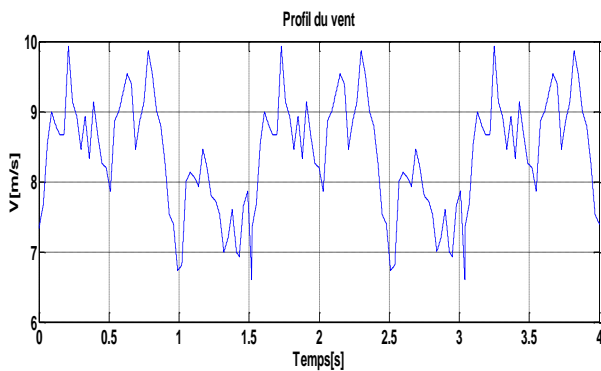


Figure II.9 : Profil du vent appliqué

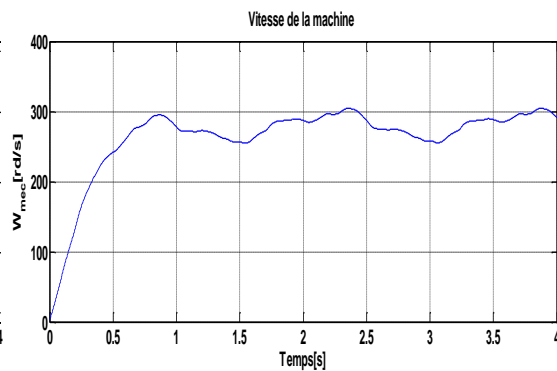
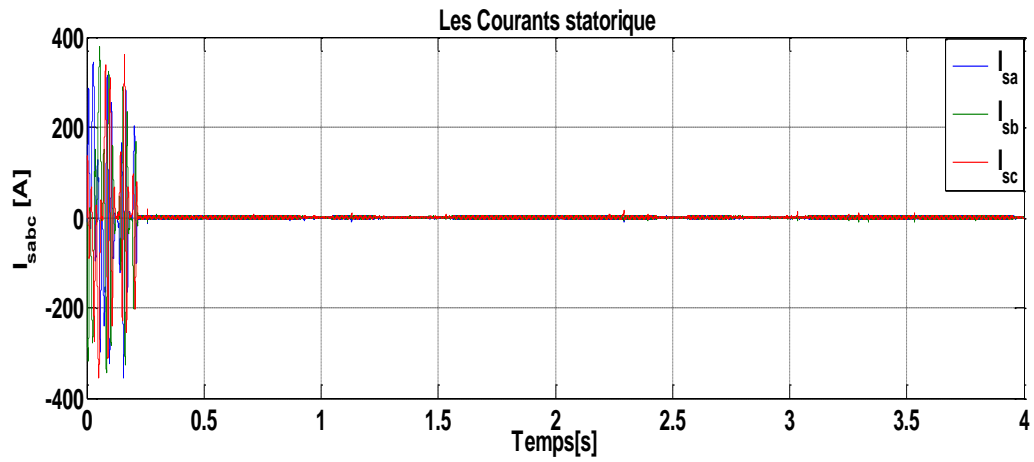
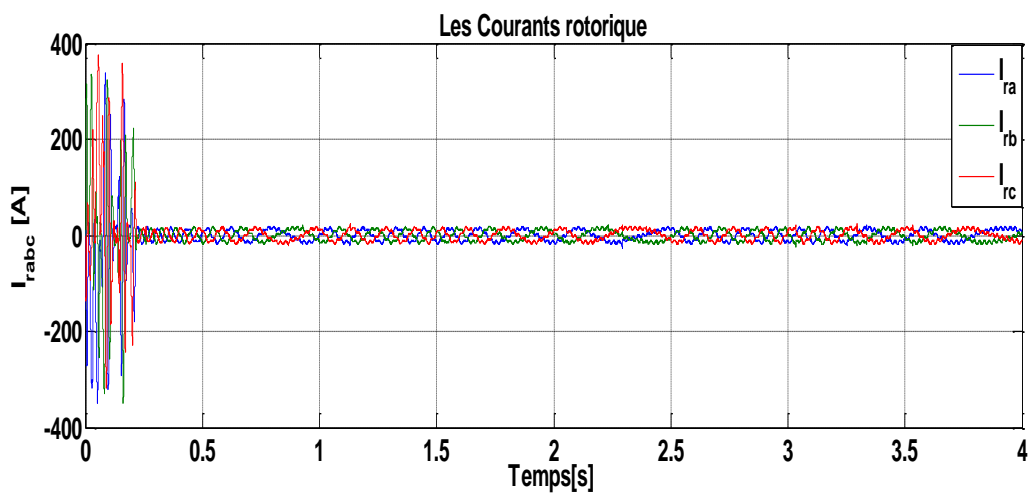
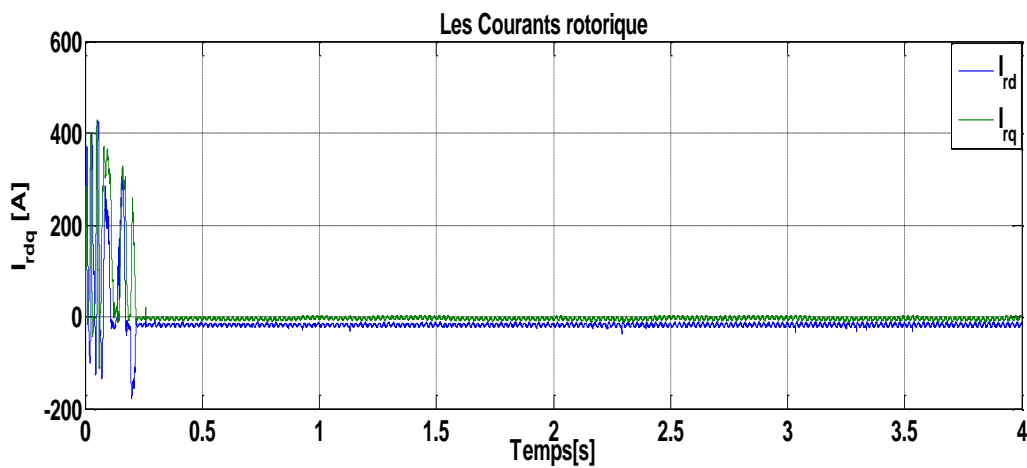
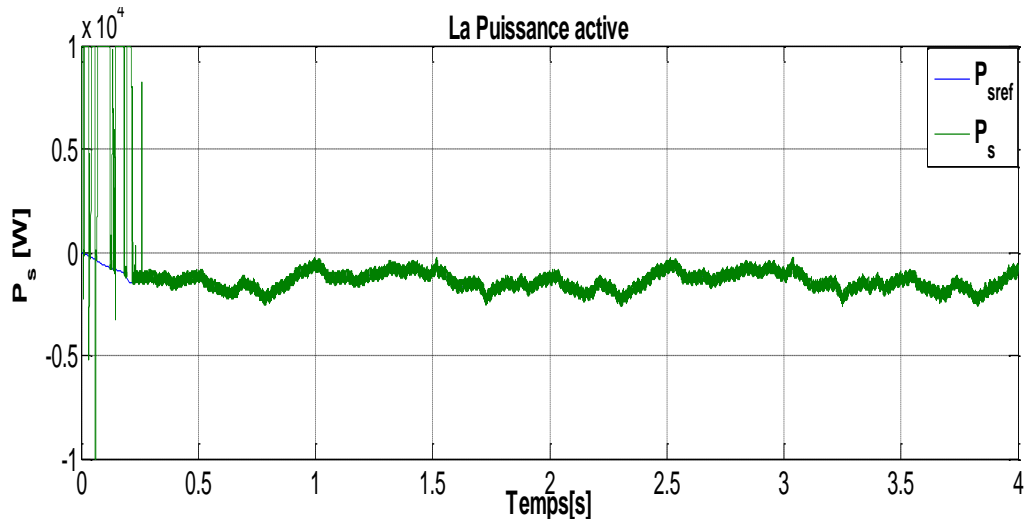
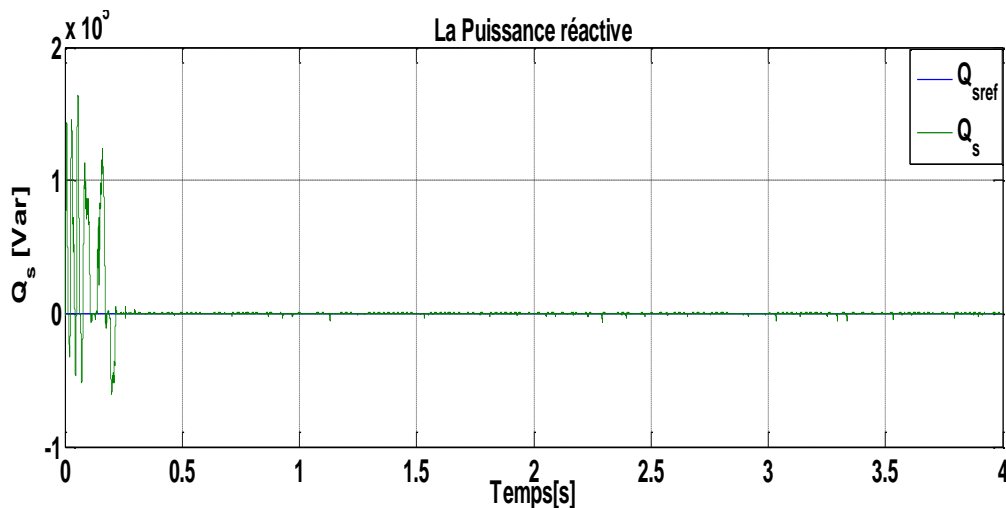


Figure II.10 : Vitesse de la turbine selon le MPPT

F) Les Courants statorique  $I_{sabc}$  (A)G) Les Courants rotorique  $I_{rabc}$  (A)H) Les Courants rotorique  $I_{rdq}$  (A)

I) La Puissance active  $P_s$  (W)J) La Puissance réactive  $Q_s$  (Var)**Figure II.11** : Résultats de simulation de la DPC-C de la GADA pour vitesse du vent variable.

- **Interprétation des résultats :**

Les figures suivantes représentent les résultats de simulation d'une machine asynchrone à double alimentation (GADA) de 5MW dont le stator est relié à un réseau triphasé, et en appliquant la commande DPC-C sur le convertisseur CCM à deux niveaux qui alimente le rotor de la GADA.

D'après les résultats obtenus ci-dessus, on peut remarquer que la condition du découplage des puissances instantanées actives et réactives a bien été réalisé. Ainsi, le courant rotorique dépend essentiellement de la variation des puissances, possédant une allure sinusoïdale avec présence de petites harmoniques, et des oscillations aux niveaux des puissances instantanées qui sont dû à une fréquence de commutation variable.

La consigne de la puissance active ( $P_{ref}$ ) est obtenue par la stratégie de maximisation de puissance MPPT. Toutefois, nous avons donné des valeurs différentes à la consigne de la puissance réactive ( $Q_{ref}$ ). A partir de ces figures nous pouvons relever les points suivants :

- D'après les figures, nous constatons que l'augmentation de la vitesse du vent implique une augmentation de la vitesse de la turbine, cependant cette augmentation le coefficient de puissance  $C_p$  maintient à sa valeur maximale ( $C_{p\_max} = 0.48$ ) qui explique la robustesse de la commande MPPT
- Les puissances actives et réactive statoriques ( $P_s$  et  $Q_s$ ) suivent bien leurs références et le découplage entre les deux puissances est visible. La puissance active statorique suit ses valeurs désirées pendant toutes les variations de la vitesse du vent. Ainsi la puissance réactive est nulle, ce qui nous permet d'avoir un facteur de puissance unitaire.
- Le courant statorique  $I_s$  et le courant rotorique  $I_r$  générés par la GADA ont une allure sinusoïdale. Néanmoins, la présence des fluctuations est visible, ceci est dû à la fréquence de commutation variable de la DPC-C produite par les comparateurs à hystérésis. Ceci peut être aperçu sur les graphes des courants. De plus, l'augmentation de la vitesse du vent engendre des augmentations au niveau des courants statoriques et rotoriques.

## II.6 DPC PAR LA MODULATION VECTORIELLE (DPC-SVM) :

Dans cette section, nous examinerons une méthode modifiée du contrôle directe de puissance de la MADA. Cette commande diffère de la commande DPC-C par l'utilisation d'une modulation vectorielle (également connue sous le nom de SVM pour Space Vector Modulation). La modulation vectorielle est utilisée afin d'assurer un fonctionnement à fréquence de modulation constante pour le convertisseur coté machine (CCM).

Dans cette stratégie de commande, la puissance active et réactive sont régulés par deux régulateurs de type PI classique en utilisant l'algorithme « SVM », alors, la table de commutation et les correcteurs à hystérésis ont été éliminés[53].

Cette commande DPC-SVM possède les avantages du contrôle vectoriel et du DPC classique pour surpasser le problème des fluctuations au niveau des puissances et des courants générés par la MADA au réseau électrique. Les régulateurs proportionnel-intégral (PI) et la technique de modulation vectorielle sont donc employés pour obtenir une fréquence de commutation fixe et moins de pulsations des puissances[5].

### II.6.1 Principe de la MLI vectorielle SVM :

Pour éliminer les inconvénients du DPC classique, en travaillant à fréquence de commutation constante, on utilise un modulateur de tension (au lieu d'un tableau de commutations) [55].

La modulation choisie dans notre cas est la modulation vectorielle SVM (Space Vector Modulation) utilisée avec la DPC devient alors DPC-SVM (Direct Power Control with Space

Vector Modulation,) dont le principe varie légèrement par rapport au contrôle précédent. A la place des comparateurs à hystérésis de la DPC classique, par des correcteurs PI, de cette sortie vers une transformation de coordonnées (dq- $\alpha\beta$ ), puis une modulation vectorielle a été introduite. Qui en concerne c'est le calcul des puissances instantanées, les mêmes méthodes que celles proposées pour le cas du DPC classique peuvent être utilisées, mais on travaille avec la méthode par flux virtuelle. [19, 56].

Cette technique en utilise un algorithme numérique afin d'obtenir une séquence de commande des interrupteurs de l'onduleur permettant de générer un vecteur tension de sortie qui s'approche le mieux possible du vecteur tension de référence. [1], on consiste à projeter le vecteur de tension rotorique désiré sur les deux vecteurs de tension adjacents correspondant à deux états de commutation de convertisseur côté rotor (Figure II.12).[57] Puisque le vecteur de commande de l'onduleur  $V_r$  possède trois composantes booléennes et que chaque composante peut prendre le niveau 0 ou 1, donc il existe huit vecteurs de commande distincts[7].

Les huit états définissent six vecteurs spatiaux non nuls limitant les six secteurs  $Z(i)$  ( $i=1,\dots,6$ ) et deux états de pause dans le plan ( $\alpha$ - $\beta$ r) [6] (voir figure II.13). Les vecteurs des tensions sont représentés par la relation suivante :

$$V_i = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{3}} U_{dc} e^{j(i-1)\frac{\pi}{3}} & i = 1, \dots, 6 \\ 0 & i = 0, 7 \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

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  $T_e$  de commutation du convertisseur. Pour maintenir la fréquence de commutation constante, un état nul du convertisseur CCM est appliqué durant une durée complémentaire à  $T_e$  [5, 58] [7].

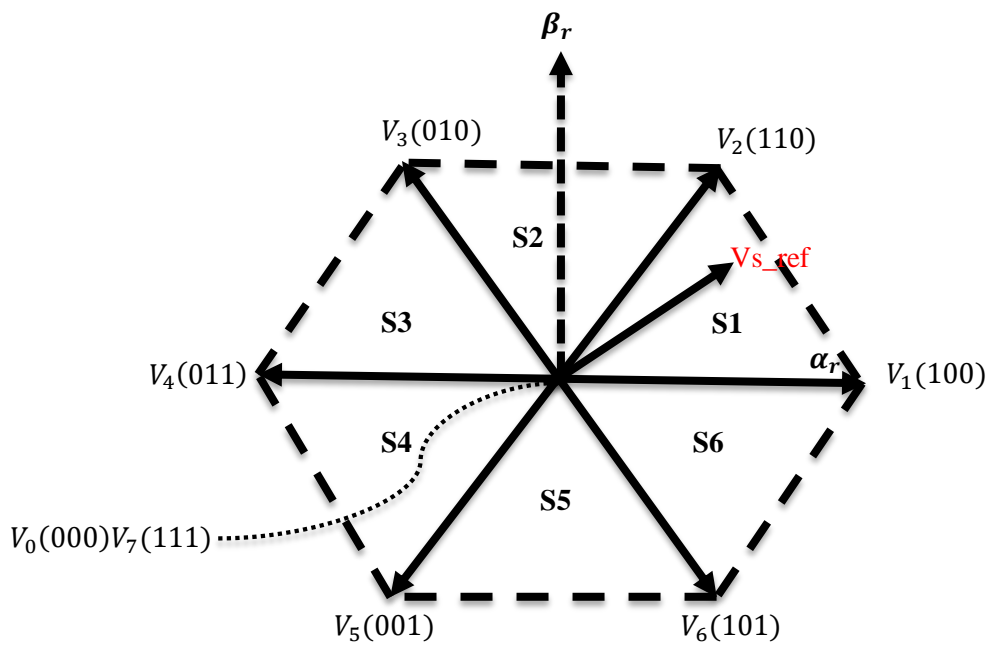
Un vecteur de tension de référence  $V_{s\_ref}$  est calculé globalement et approximé sur une période de modulation  $T_s$  par un vecteur de tension moyen  $V_{s\_moy}$ . Ce dernier est élaboré par l'application des vecteurs tensions adjacents et des vecteurs nuls  $V_0$  et  $V_7$  [5, 58] [7]

Une analyse combinatoire de tous les états possibles des interrupteurs de l'onduleur permet de calculer les composantes du vecteur de tension  $\begin{bmatrix} V_{r\alpha} \\ V_{r\beta} \end{bmatrix}$ . Nous pouvons donc dresser un tableau, qui synthétise les différents états de l'onduleur Tableau II.4 :

Vecteur	Etats des grandeurs booléennes de commande			Tensions simples			Tensions biphasées		Vecteur $V_i$
	$S_a$	$S_b$	$S_c$	$V_{an}$	$V_{bn}$	$V_{cn}$	$V_{r\alpha}$	$V_{r\beta}$	
$V_0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_5$	0	0	1	$-\frac{U_{dc}}{3}$	$-\frac{U_{dc}}{3}$	$\frac{2U_{dc}}{3}$	$-\sqrt{\frac{1}{6}}U_{dc}$	$-\sqrt{\frac{1}{2}}U_{dc}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}U_{dc}e^{j\frac{4\pi}{3}}$
$V_3$	0	1	0	$-\frac{U_{dc}}{3}$	$\frac{2U_{dc}}{3}$	$-\frac{U_{dc}}{3}$	$-\sqrt{\frac{1}{6}}U_{dc}$	$\sqrt{\frac{1}{2}}U_{dc}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}U_{dc}e^{j\frac{2\pi}{3}}$
$V_4$	0	1	1	$-\frac{2U_{dc}}{3}$	$\frac{U_{dc}}{3}$	$\frac{U_{dc}}{3}$	$-\sqrt{\frac{2}{3}}U_{dc}$	0	$-\sqrt{\frac{2}{3}}U_{dc}$
$V_1$	1	0	0	$\frac{2U_{dc}}{3}$	$-\frac{U_{dc}}{3}$	$-\frac{U_{dc}}{3}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}U_{dc}$	0	$\sqrt{\frac{2}{3}}U_{dc}$
$V_6$	1	0	1	$\frac{U_{dc}}{3}$	$-\frac{2U_{dc}}{3}$	$\frac{U_{dc}}{3}$	$\sqrt{\frac{1}{6}}U_{dc}$	$-\sqrt{\frac{1}{2}}U_{dc}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}U_{dc}e^{j\frac{5\pi}{3}}$
$V_2$	1	1	0	$\frac{U_{dc}}{3}$	$\frac{U_{dc}}{3}$	$-\frac{2U_{dc}}{3}$	$\sqrt{\frac{1}{6}}U_{dc}$	$\sqrt{\frac{1}{2}}U_{dc}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}U_{dc}e^{j\frac{\pi}{3}}$
$V_7$	1	1	1	0	0	0	0	0	0

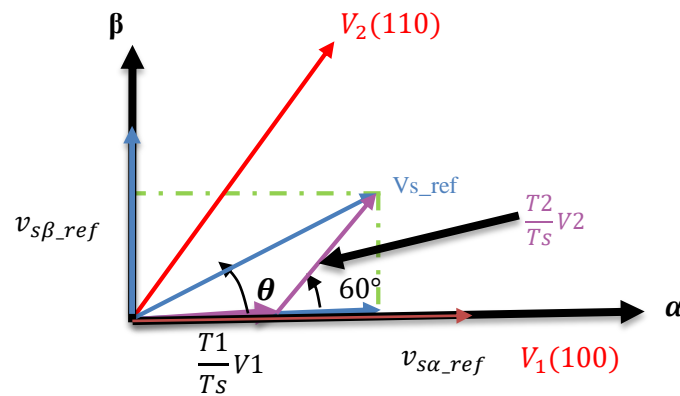
Tableau II.4 : Calcul des Tensions rotoriques

Les huit vecteurs de tensions redéfinies par la combinaison des interrupteurs sont représentés dans le plan ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) par la figure II.12 :



**Figure II.12** : représentation des vecteurs de tensions dans le repère  $(\alpha, \beta)$ 

La figure (II.13) représente le cas où le vecteur de référence se trouve dans le secteur 1 et les vecteurs adjacents sont représentés par  $V_1$  et  $V_2$ . La MLI vectorielle consiste à projeter le vecteur de tension statorique de référence  $V_{s\_ref}$  désiré sur les deux vecteurs de tensions adjacents correspondants  $V_1$  et  $V_2$ . Si nous notons par  $T_1$  et  $T_2$  les deux temps d'application de ces vecteurs,  $T_0$  le temps d'application des vecteurs nuls, leur somme doit être inférieure à la période  $T_s$  de commutation de l'onduleur.

**Figure II.13** : Décomposition d'un vecteur de tension de référence  $V_{s\_ref}$ 

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} V_{s\_ref} dt = \frac{1}{T_s} \left( \int_0^{T_1} V_1 dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} V_2 dt + \int_{T_1+T_2}^{T_s} V_0 dt \right) \quad (\text{II.7})$$

$$V_{s\_ref} = \frac{T_1}{T_s} V_1 + \frac{T_2}{T_s} V_2 + \frac{T_0}{T_s} V_0 \quad (\text{II.8})$$

$$T_s = T_1 + T_2 + T_0 \quad (\text{II.9})$$

En supposant qu'initialement, le vecteur  $V_{s\_ref}$  coïncide avec le vecteur  $V_1$ , deux séquences sont activees. 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  $V_{s\_ref}$  s'éloigne du vecteur  $V_1$  et en s'approche du vecteur  $V_2$ ,  $T_1$  diminue et  $T_2$  augmente. Quand le vecteur  $V_{s\_ref}$  atteint le vecteur  $V_2$ ,  $T_1$  sera nul et  $T_2$  sera maximale. [7]

## II.7 LES ETAPES DE LA REALISATION D'UNE MLI VECTORIELLE :

### II.7.1 Détermination des secteurs[7] :

Le secteur est déterminé selon la position du vecteur  $V_{r\_ref}$  dans le plan  $(\alpha, \beta)$ , tel que cette position présente la phase  $\theta$  de ce vecteur définie par :

$$\theta = \arctan\left(\frac{V_{ref}(\beta)}{V_{ref}(\alpha)}\right) \tag{II.10}$$

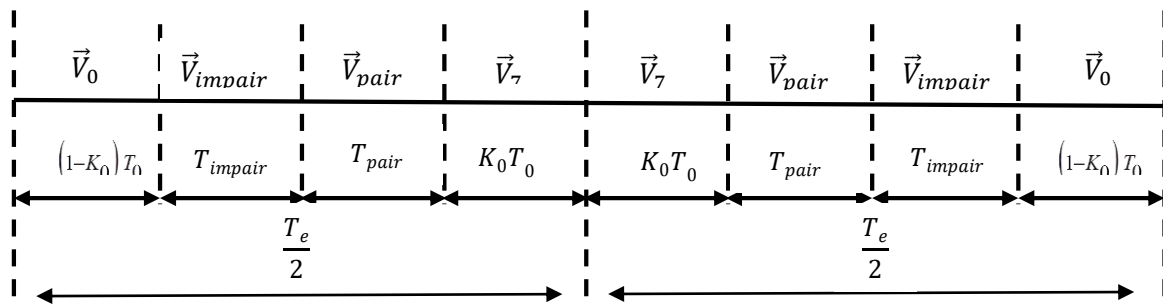
Le tableau (II.5) détermine le secteur  $Z(i)$  avec  $(i=1, \dots, 6)$  pour les différentes angles  $\theta$  :

$\theta$	$0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{2\pi}{3}$	$\frac{2\pi}{3} \leq \theta \leq \pi$	$\pi \leq \theta \leq \frac{4\pi}{3}$	$\frac{4\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{5\pi}{3}$	$\frac{5\pi}{3} \leq \theta \leq \pi$
$Z(i)$	Secteur 1	Secteur 2	Secteur 3	Secteur 4	Secteur 5	Secteur 6

**Tableau II.5 :** Identification du secteur

**II.7.2 Calcul des temps de commutation :**

L'ordre dans lequel on fait succéder des configurations correspondantes aux vecteurs  $V_i$  et  $V_{i+1}$  et du vecteur  $V_0$  ou  $V_7$  durant la période de modulation est choisi de manière à ce que d'une part, tous les interrupteurs d'un même demi-pont aient un état identique au centre et aux deux extrémités de la période, et d'autre part, l'état des interrupteurs soient symétrique par rapport au milieu de la période de modulation (voir Figure II.14) ( $K_0$  est un facteur compris entre 0 et 1). [7]



**Figure II.14 :** Séquence d'application des vecteurs sur une période  $T_e$

**II.7.3 Génération des signaux modulants  $T_{aon}, T_{bon}, T_{con}$  :**

Les durées relatives d'application de vecteur  $V_{s\_ref}$  ne sont pas directement exploitables pour piloter l'onduleur, il est plus pratique de considérer les durées relatives  $T_{aon}, T_{bon}, T_{con}$  (rapports cycliques) pendant lesquelles les grandeurs booléennes de commande  $S_a, S_b$  et  $S_c$  sont égales à 1 sur une période d'échantillonnage [7] :

Les trois rapports cycliques nécessaires sont donnés par :

$$\begin{cases} t_{a_{on}} = (T_e - (T_i + T_{i+1})) / 2 \\ t_{b_{on}} = t_{a_{on}} + T_i \\ t_{c_{on}} = t_{b_{on}} + T_{i+1} \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

En utilisant les relations trigonométriques, (la projection donnée par la figure II.13) les temps d'application des vecteurs pour chaque secteur sont donnés par les relations suivantes :

$$\begin{cases} T_i = \frac{3T_e |V_{ref}|}{2U_{dc}} \left( \cos(\theta - \theta_i) - \frac{\sin(\theta - \theta_i)}{\sqrt{3}} \right) \\ T_{i+1} = \frac{3T_e |V_{ref}| \sin(\theta - \theta_i)}{U_{dc} \sqrt{3}} \\ T_0 = T_e - T_i - T_{i+1} \\ \theta_i = i \frac{\pi}{3} \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

Dans ce qui suit, nous allons faire le calcul des temps de commutation des interrupteurs dans le secteur 1 de l'hexagone des tensions (figure II.13). En effectuant un calcul similaire pour chaque secteur, le temps de commutation des interrupteurs dans chacun des six secteurs de l'hexagone peut être obtenu. On donne l'ordre des successions des configurations correspondant aux vecteurs  $V_i$  et  $V_{i+1}$  et du vecteur  $V_0$  et  $V_7$  durant la période de modulation  $T_e$ .

$$\begin{aligned} t_{a_{on}} &= \frac{T_0}{4} & t_{a_{off}} &= \frac{3T_0}{4} + T_1 + T_2 \\ t_{b_{on}} &= \frac{T_0}{4} + \frac{T_1}{2} & t_{b_{off}} &= \frac{3T_0}{4} + \frac{T_1}{2} + T_2 \\ t_{c_{on}} &= \frac{T_0}{4} + \frac{T_1}{2} + \frac{T_2}{2} & t_{c_{off}} &= \frac{3T_0}{4} + \frac{T_1}{2} + \frac{T_2}{2} \end{aligned} \quad (\text{II.13})$$

L'état de chaque interrupteur peut être déterminé par les relations suivantes :

$$\begin{cases} Si \ t_{a_{on}} \leq t \leq t_{a_{off}}, \text{ alors } S_a = 1, \text{ sin on } S_a = 0 \\ Si \ t_{b_{on}} \leq t \leq t_{b_{off}}, \text{ alors } S_b = 1, \text{ sin on } S_b = 0 \\ Si \ t_{c_{on}} \leq t \leq t_{c_{off}}, \text{ alors } S_c = 1, \text{ sin on } S_c = 0 \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

#### II.7.4 Génération des séries d'impulsions Sa, Sb et Sc :

La détermination des signaux de commande Sa, Sb et Sc en fonction des temps de commutation est donnée par la table suivante :

		secteur					
		1	2	3	4	5	6
Signaux	$S_a$	$t_{a_{on}}$	$t_{b_{on}}$	$t_{c_{on}}$	$t_{c_{on}}$	$t_{b_{on}}$	$t_{a_{on}}$
	$S_b$	$t_{b_{on}}$	$t_{a_{on}}$	$t_{a_{on}}$	$t_{b_{on}}$	$t_{c_{on}}$	$t_{c_{on}}$
	$S_c$	$t_{c_{on}}$	$t_{c_{on}}$	$t_{b_{on}}$	$t_{a_{on}}$	$t_{a_{on}}$	$t_{b_{on}}$

Tableau II.6 : Signaux de commande des interrupteurs du CCM

### II.8 DPC-SVM de la MADA :

On reprend les expressions des puissances statoriques (équation II.1) :

$$\begin{cases} P_s = (v_{ds}i_{ds} + v_{qs}i_{qs}) \\ Q_s = (v_{qs}i_{ds} - v_{ds}i_{qs}) \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

En alignant le flux statorique  $\Phi_s$  avec l'axe « d » du repère de Park, on obtient :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = \Phi_s \Rightarrow \Phi_s = \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Phi_{qs} = 0 \Rightarrow 0 = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

Par la suite, on tire les expressions des courants statoriques en fonction des courants rotoriques comme suit :

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

A partir des équations du flux (II.16), les expressions des tensions statoriques (I.37) du chapitre I deviennent :

$$\begin{cases} v_{ds} = 0 \\ v_{qs} = v_s = \omega_s * \Phi_s \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

En remplaçant les expressions (II.17) et (II.18) dans (II.15), les expressions des puissances statoriques en fonction des courants rotoriques s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} P_s = -v_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = -v_s \frac{M}{L_s} i_{dr} + \frac{v_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

De même :

$$\begin{cases} P_s^* = -v_s \frac{M}{L_s} i_{qr}^* \\ Q_s^* = -v_s \frac{M}{L_s} i_{dr}^* + \frac{v_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

Enfin :

$$\begin{cases} i_{qr}^* - i_{qr} = (P_s^* - P_s) \frac{-L_s}{v_s M} \\ i_{dr}^* - i_{dr} = (Q_s^* - Q_s) \frac{-L_s}{v_s M} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Afin d'obtenir les tensions de référence  $V_{dr}^*$  et  $V_{qr}^*$ , on reprend les équations (I.37) et (I.40) du chapitre I comme suit :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{di_{dr}}{dt} - \omega_r \sigma L_r i_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{di_{qr}}{dt} + \omega_r \left( \sigma L_r i_{dr} + \frac{M \Phi_{ds}}{L_s} \right) \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Avec :

$$\omega_r = (\omega_s - \omega); \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$$

- Boucles internes de régulation des courants rotoriques :

Dans le système (II.22), il y a des termes de couplage entre les deux axes d et q. Par conséquent, les régulateurs traditionnels linéaires ne peuvent pas être directement utilisés. Cependant, nous employons une méthode de linéarisation, qui consiste à ramener les courants du même axe sur le même côté de l'équation comme suit :

$$\begin{cases} R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{di_{dr}}{dt} = v_{dr} + \omega_r \sigma L_r i_{qr} \\ R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{di_{qr}}{dt} = v_{qr} - \omega_r \left( \sigma L_r i_{dr} + \frac{M \Phi_{ds}}{L_s} \right) \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

Les régulateurs linéaires sont utilisés pour contrôler les courants comme le montre la figure (II.13), dans cette dernière on donne :

$$\begin{cases} \sigma_{dr} = R_r i_{dr} + \sigma L_r S i_{dr} \\ \sigma_{qr} = R_r i_{qr} + \sigma L_r S i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

On obtient par la suite un système d'équations linéaires dont les tensions rotoriques directes et inverses sont exprimées par :

$$\begin{cases} v_{dr}^* = \sigma_{dr} - \omega_r \sigma L_r i_{qr} \\ v_{qr}^* = \sigma_{qr} + \omega_r \left( \sigma L_r i_{dr} + \frac{M \Phi_{ds}}{L_s} \right) \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

L'utilisation d'une boucle interne du courant a une grande importance dans la protection de la MADA. Elle permet de limiter les courants rotoriques grâce à une saturation qui peut être facilement insérée, comme le montre la figure (II.15)

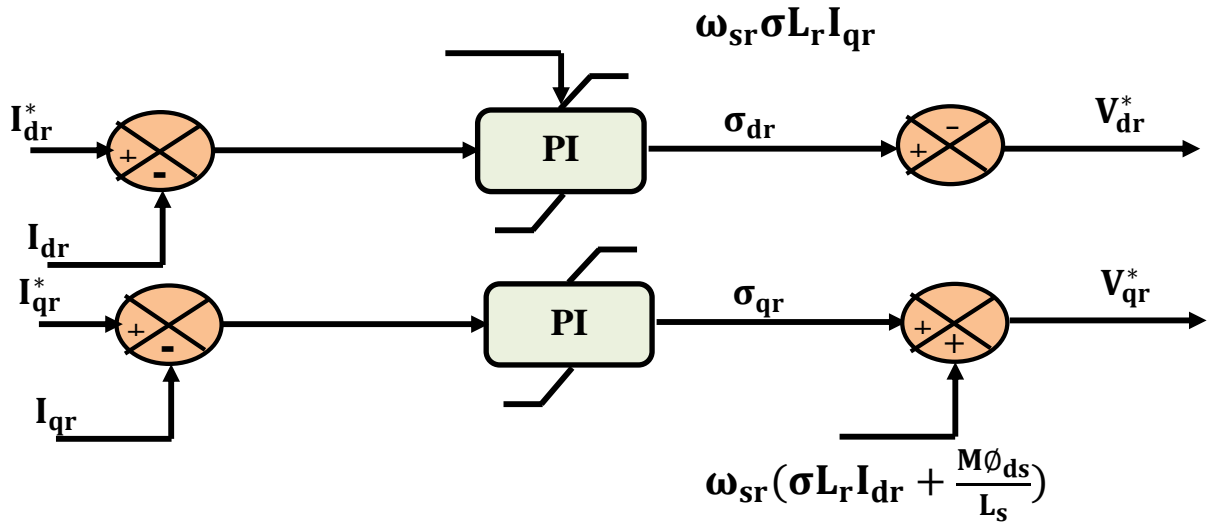


Figure II.15 : Boucle de régulation des courants.

La boucle de régulation du courant  $i_{dr}$  à partir de l'équation (II.23) est la suivante :

$$v_{dr}^* = R_r i_{dr} + \sigma L_r p i_{dr} = (R_r + \sigma L_r S) i_{dr} \quad (\text{II.26})$$

$$v_{dr}^* = \left( k_{dp} + \frac{k_{di}}{s} \right) (i_{dr}^* - i_{dr}) \quad (\text{II.27})$$

$$(R_r + \sigma L_r p) i_{dr} = \left( k_{dp} + \frac{k_{di}}{s} \right) i_{dr}^* - \left( k_{dp} + \frac{k_{di}}{s} \right) i_{dr} \quad (\text{II.28})$$

De la même manière, la boucle de régulation du courant  $i_{qr}$  est développée comme suit :

$$v_{qr}^* = R_r i_{qr} + \sigma L_r p i_{qr} = (R_r + \sigma L_r S) i_{qr} \quad (\text{II.29})$$

$$v_{qr}^* = \left( k_{dp} + \frac{k_{di}}{s} \right) (i_{qr}^* - i_{qr}) \quad (\text{II.30})$$

$$(R_r + \sigma L_r p) i_{qr} = \left( k_{dp} + \frac{k_{di}}{s} \right) i_{qr}^* - \left( k_{dp} + \frac{k_{di}}{s} \right) i_{qr} \quad (\text{II.31})$$

Les fonctions de transfert entre les courants rotoriques de référence et les courants mesurés sont données par :

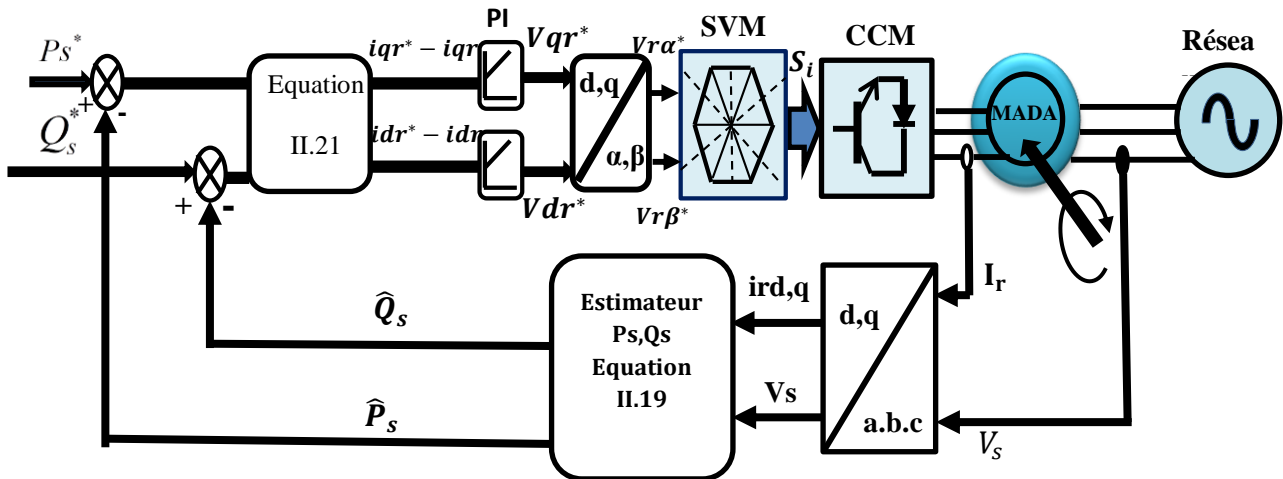
$$\frac{i_{dr}}{i_{dr}^*} = \frac{pk_{dp} + k_{di}}{p^2\sigma L_r + p(R_r + k_{dp}) + k_{di}} \quad (\text{II.32})$$

$$\frac{i_{qr}}{i_{qr}^*} = \frac{pk_{dp} + k_{di}}{p^2\sigma L_r + p(R_r + k_{dp}) + k_{di}} \quad (\text{II.33})$$

Par analogie avec la forme générale d'une fonction de transfert du deuxième ordre on trouve :

$$\begin{cases} k_{dp} = 2\xi\omega_n\sigma L_r - R_r \\ k_{di} = \omega_n^2\sigma L_r \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

Une fois les tensions  $v_{dr}^*$  et  $v_{qr}^*$  sont déterminées, on applique la transformée de Park inverse ensuite la transformée de Concordia pour avoir  $v_{r\alpha}^*$  et  $v_{r\beta}^*$  qui constitueront les entrées de la SVM. Le schéma global de commande DPC-SVM appliqué sur le convertisseur côté machine (rotor) est représenté sur la figure (II.16)



**Figure II.16 :** Schéma bloc de la structure de contrôle DPC-SVM appliquée à la MADA

## II.9 RESULTATS DE SIMULATION DU DPC PAR LA MODULATION VECTORIELLE (DPC-SVM) :

Dans cette section, la commande DPC de la MADA de 5kW (annexe) a été testée en simulation sous l'environnement MATLAB/SIMULINK en fonctionnement MPPT avec le même profil de vent présenté dans le résultat de simulation de la DPC Classique.

- **Fonctionnement à vitesse du vent fixe :**

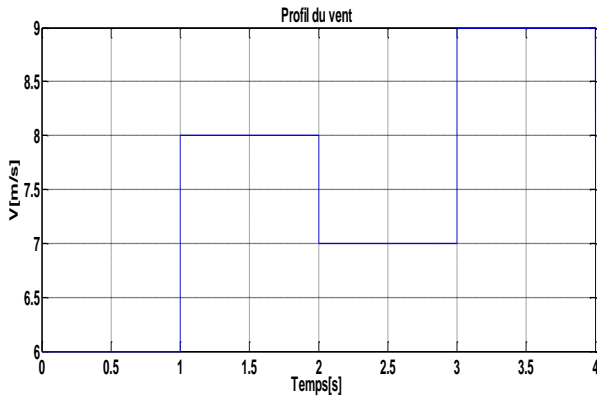


Figure II.17 : Profil du vent appliqué

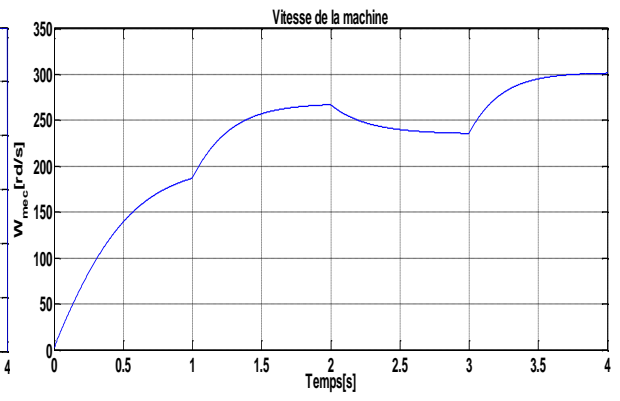
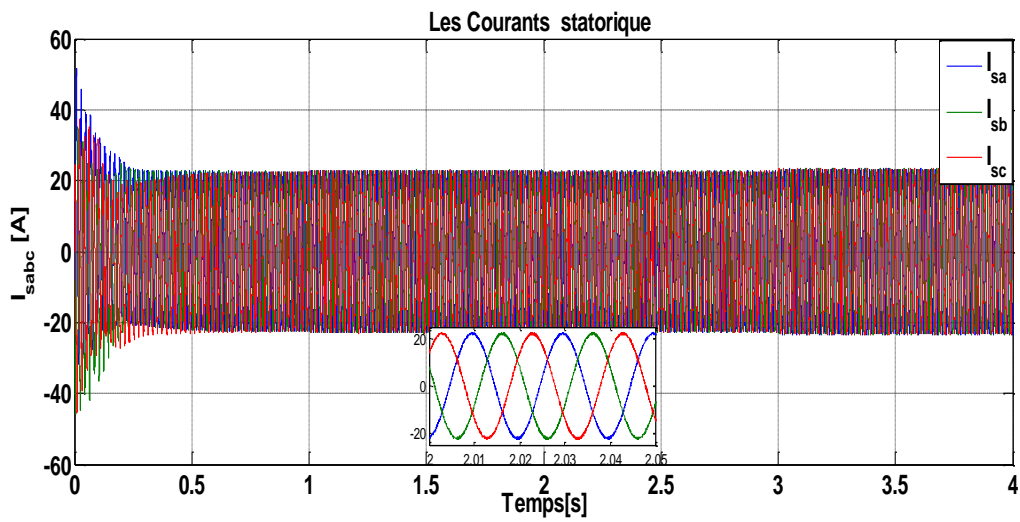
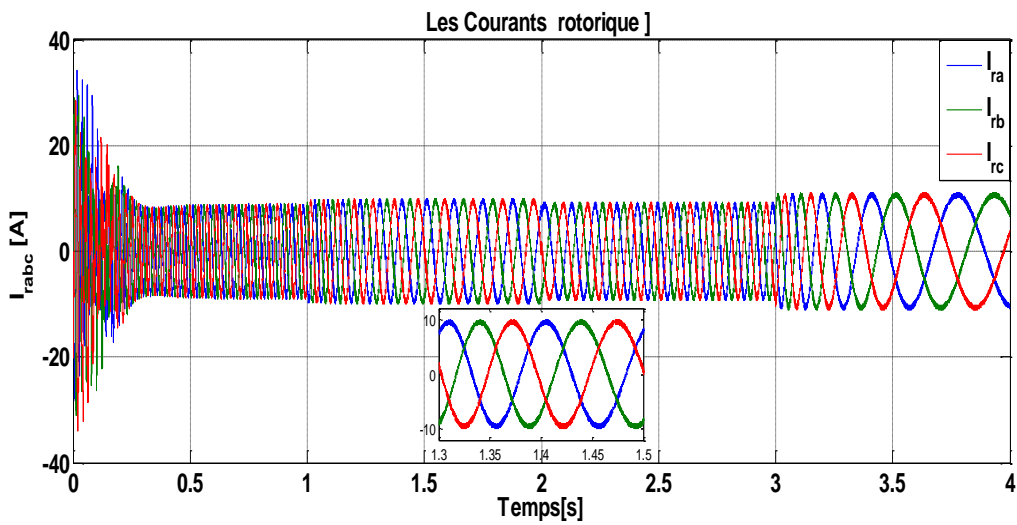


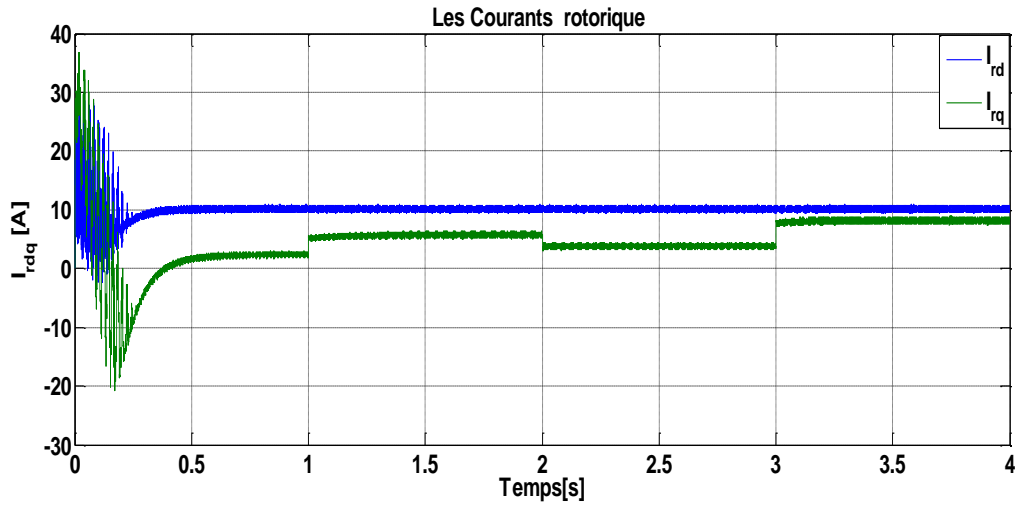
Figure II.18 : Vitesse de la turbine selon le MPPT



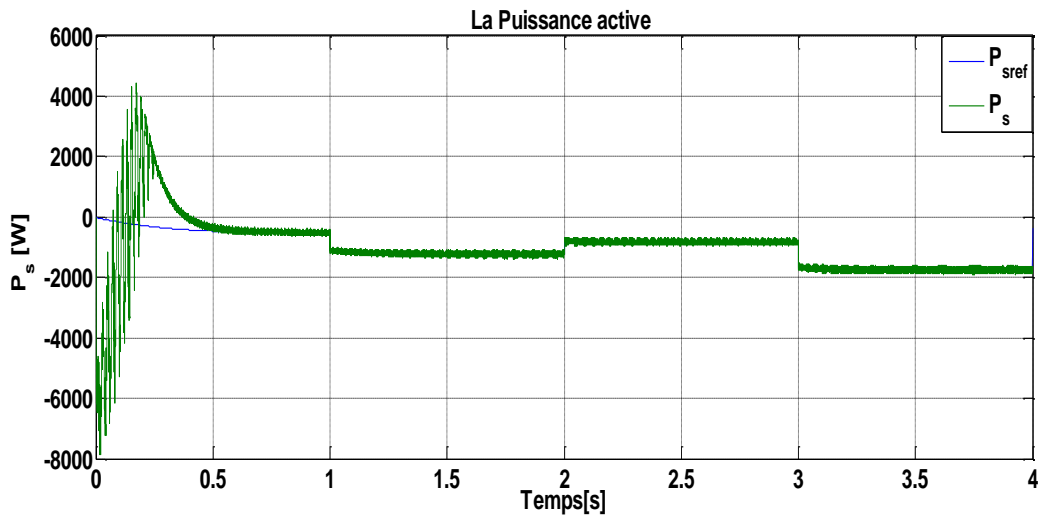
A) Les Courants statorique  $I_{sabc}$  (A)



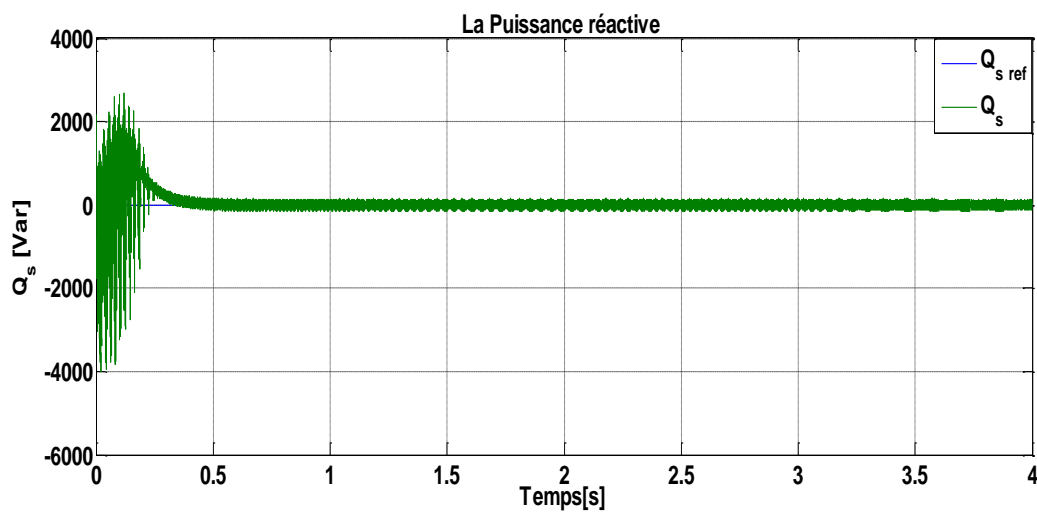
B) Les Courants rotorique  $I_{rabc}$  (A)



C) Les Courants rotorique  $I_{rdq}$  (A)



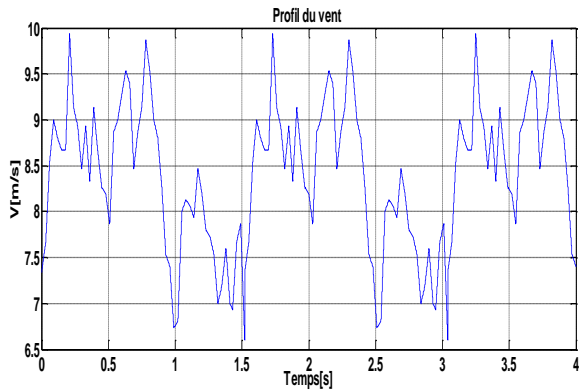
D) La Puissance active  $P_s$  (W)



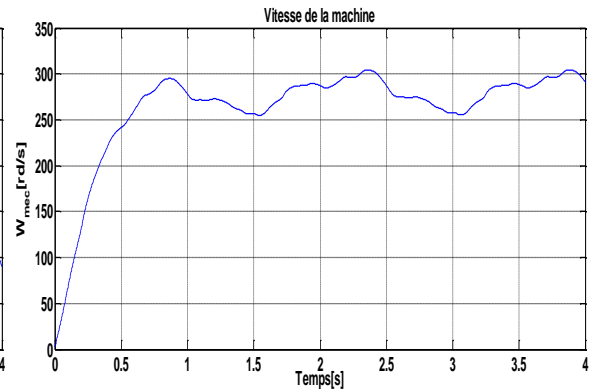
E) La Puissance réactive  $Q_s$  (Var)

**Figure II.19 :** Résultats de simulation de la DPC-SVM de la GADA pour vitesse du vent fixe.

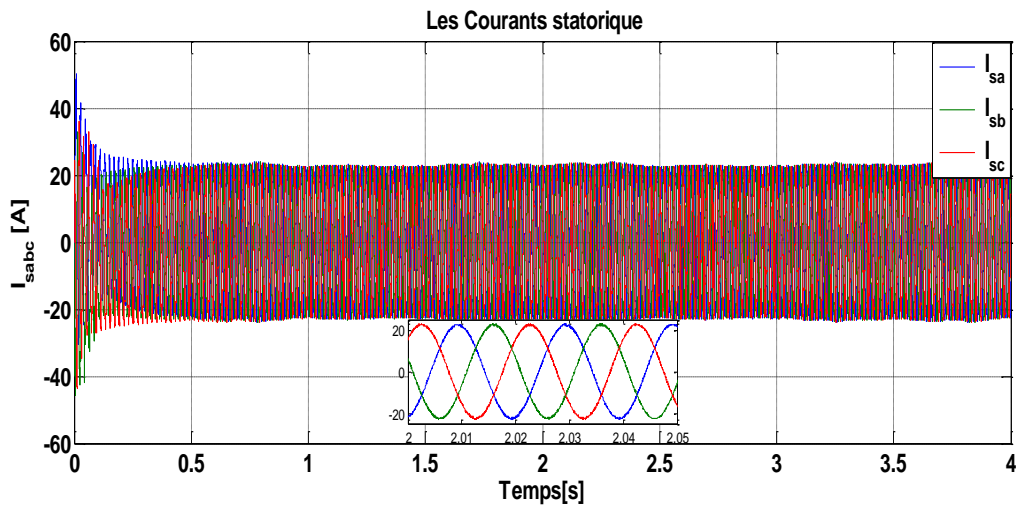
• **Fonctionnement à vitesse du vent variable :**



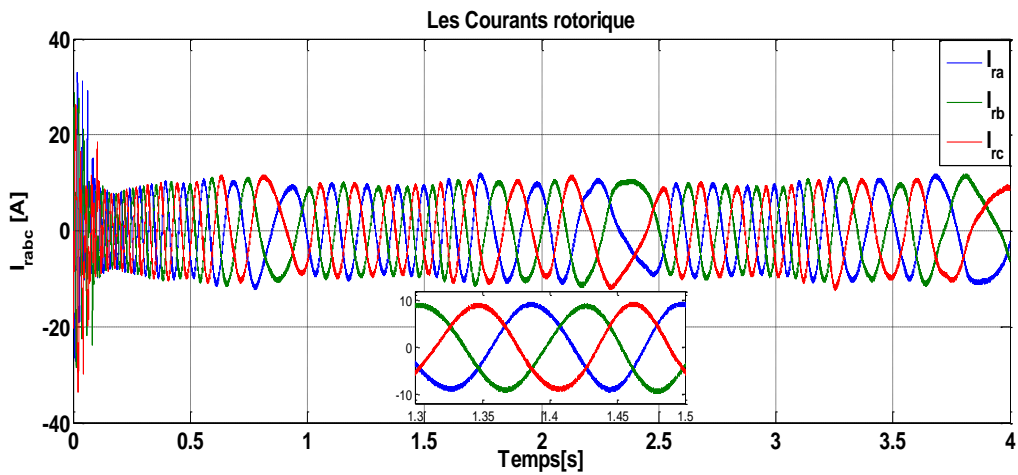
**Figure II.20 :** Profil du vent appliqué



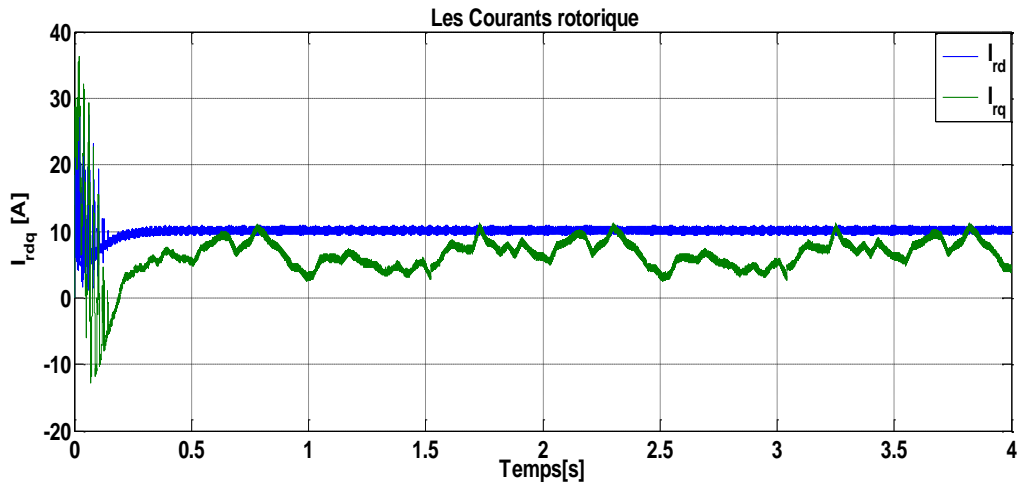
**Figure II.21 :** Vitesse de la turbine selon le MPPT



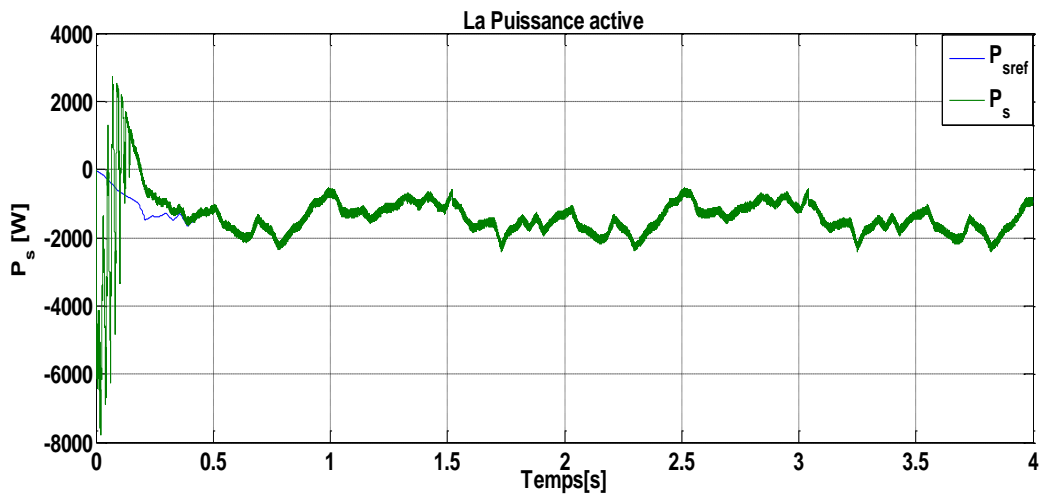
**F) Les Courants statorique  $I_{sabc}$  (A)**



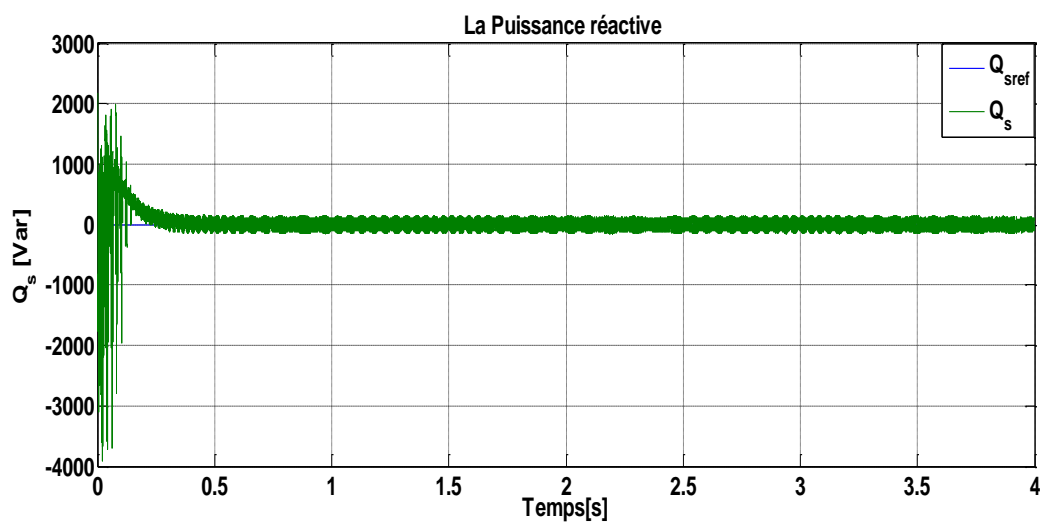
**G) Les Courants rotorique  $I_{rabc}$  (A)**



H) Les Courants rotorique  $I_{rdq}$  (A)



I) La Puissance active  $P_s$  (W)



J) La Puissance réactive  $Q_s$  (Var)

**Figure II.22** : Résultats de simulation de la DPC-SVM de la GADA pour vitesse du vent variable.

• **Interprétations des résultats :**

Les figures ci-dessus représentent les résultats de simulation obtenus en appliquant la commande DPC-SVM sur le convertisseur CCM à deux niveaux qui alimente le rotor de la MADA.

La consigne de la puissance active ( $P_{ref}$ ) est générée par la stratégie de maximisation de puissance MPPT. Toutefois, nous avons donné trois valeurs différentes à la consigne de la puissance réactive ( $Q_{ref}$ ).

A partir de ces figures, nous pouvons relever les points suivants :

- Les puissances active et réactive statoriques ( $P_s$  et  $Q_s$ ) suivent parfaitement leurs références avec une réduction bien visible des oscillations et des erreurs statiques .
- Le courant statorique  $I_s$  et le courant rotorique  $I_r$  générés par la MADA ont une allure sinusoïdale avec un faible taux d'harmoniques et moins d'ondulations grâce à la fréquence de commutation fixée par la SVM.
- La vitesse de rotation de la machine varie simultanément en fonction de la vitesse du vent .

Ces résultats de simulation montrent les grandes performances de la DPC-SVM développée. Les objectifs, à savoir la minimisation des pulsations des puissances et les harmoniques des courants présentés par la commande DPC-C sont achevés.

## II.10 CONCLUSION :

Dans le présent chapitre nous avons présenté les résultats de simulation de la commande DPC-C appliquée sur le convertisseur « CCM » à deux niveaux qui alimentent le rotor de la GADA intégrée dans un système éolien. Cette technique se résume par les étapes suivantes :

- L'estimation des puissances active et réactive ( $P_s$  et  $Q_s$ ) et leur comparaison avec les valeurs de références.
- La détermination du secteur du flux rotorique.
- Le choix des comparateurs à hystérésis.
- L'élaboration de la table de commutation.

Nous avons présenté l'apport de la loi de commande DPC pour le découplage entre la puissance active et réactive de la MADA. La DPC classique (DPC-C) offre des hautes performances dynamiques avec une structure simple. Cependant, cette stratégie de contrôle due à la fréquence de commutation variable présente un inconvénient majeur, qui est les oscillations des puissances et les harmoniques des courants élevée générés par la MADA. Afin de fixer la fréquence de commutation des interrupteurs du convertisseur coté machine « CCM » et dont le but de réduire les ondulations des puissances et les harmoniques des

courants délivrées par la MADA au réseau électrique, la technique MLI vectorielle (SVM) a été combinée avec la DPC. Selon les résultats de simulation obtenus, la DPC-SVM fournit une solution en évitant les inconvénients de la DPC classique (DPC-C). Ainsi, l'objectif commun de cette stratégie de contrôle (DPC-SVM) a été achevé, à savoir : le prélèvement des courants sinusoïdaux, tout en réduisant le taux d'harmoniques et en assurant un facteur de puissance unitaire avec un contrôle découplé des puissances active et réactive.

Dans le prochain chapitre, nous allons appliquer la commande directe des puissances (DPC) sur le convertisseur (CCM) déjà modélisé.

Dans le chapitre suivant, on va garder la même dynamique (DPC-SVM) mais avec l'utilisation des autres modes de comparateurs afin de minimiser le contenu d'harmonique.

# Chapitre III:

*Commande directe de puissance par le mode  
glissant (DPC-SVM-MG) de la GADA*

### III.1 INTRODUCTION :

Pour avoir une bonne qualité d'énergie électrique produite par un système éolien basé sur une MADA, il faut appliquer des techniques de commandes adéquates permettant le contrôle des puissances générées par le stator de la machine à savoir : la puissance active qui sera réglée à celle de référence générée par la turbine pour assurer un meilleur rendement du système éolien, et la puissance réactive qui sera maintenue nulle de façon à garder un facteur de puissance unitaire du côté stator [13]. La commande par mode glissant a connu un grand succès ces dernières années. Cela est dû à la simplicité de sa mise en œuvre et la robustesse par rapport aux incertitudes du système et des perturbations externes entachant le processus. [63], la commande des systèmes ayant un modèle imprécis grâce aux avantages qu'elle présente (robustesse vis-à-vis des paramètres variables, une très haute précision, une bonne stabilité, un temps de réponse très faible).

Dans ce chapitre, on applique le régulateur par mode glissant sur la machine asynchrone double alimentation. Nous abordons ensuite la conception de l'algorithme de commande avec ses différentes étapes, puis on applique cette commande à la machine GADA en remplaçant les régulateurs classiques PI par des régulateurs de types mode glissant.

### III.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :

Etant un cas particulier de la commande à structure variable (CSV), la commande par modes glissants (CMG) a été largement utilisée dans la littérature. Ce succès est dû à sa simplicité de mise en œuvre et à sa robustesse vis-à-vis des variations paramétriques et des perturbations externes. Il s'agit de définir d'abord une surface dite de glissement qui représente la dynamique désirée, puis synthétiser une loi de commande qui doit agir sur le système en deux phases. Dans la première, on force le système à rejoindre cette surface, et dans la seconde phase on doit assurer le maintien et le glissement le long de cette surface pour atteindre l'origine du plan de phase comme montré sur la figure (Fig.III.1)[20] [59] [60]:

Le principe de la commande par modes glissants est de contraindre le système à atteindre une surface donnée appelée surface de glissement et d'y demeurer jusqu'à l'équilibre. Cette commande se fait en trois étapes, [16] [59, 60] [61].

- Le mode non glissant (reaching mode) ou mode d'accès, ou encore mode de convergence (MC) : c'est le mode durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase, et tend vers la surface de commutation ;
- Le mode glissant (sliding mode : SM) : c'est le mode durant lequel la variable d'état a atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique de ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement ;
- Le mode du régime permanent (MRP) : ce mode est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre (origine du plan de phase). Il est caractérisé par la qualité et les performances de la commande.



**Figure III.1 :** Les modes de trajectoire dans le plan de phase

### **III.3 CONCEPTION DE LA COMMANDE PAR MODE GLISSANT :**

Les avantages de la commande par mode glissant sont importantes et multiples ; la haute précision, la bonne stabilité, la simplicité, l'invariance, la robustesse...etc. Ceci lui permet d'être particulièrement adaptée pour les systèmes ayant un modèle imprécis. Dans ce cas, la structure d'un contrôleur comporte deux parties : une partie continue représentant la dynamique du système durant le mode glissant et une autre discontinue représentant la dynamique du système durant le mode de convergence. Cette dernière est importante dans la commande non linéaire car elle a pour rôle d'éliminer les effets d'imprécisions et des perturbations sur le modèle. La conception de cette commande peut être divisée en trois étapes principales très dépendantes. Ces étapes concernent[61] [62] :

- Le choix des surfaces.
- L'établissement des conditions l'existence et de convergence
- La détermination de la loi de commande.

#### **III.3.1 Choix de la surface de glissement :**

Le choix de la surface de glissement concerne non seulement le nombre nécessaire de ces surfaces, mais également leurs formes en fonction de l'application et de l'objectif visé. Le procédé le plus judicieux et le plus simple consiste à choisir une surface de commutation égale au vecteur erreur du vecteur d'état. Considérons le système non linéaire défini par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x,t) + g(x,t)u(t) \\ y = C^t x \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Où  $[X] \in R_n$  est le vecteur d'état,  $[U] \in R_m$  le vecteur de commande, avec  $n > m$  généralement, le choix du nombre des surfaces de glissement est égal à la dimension du vecteur de commande  $[U]$ .

Les surfaces de glissement  $S$  sont définies par la disparition d'un variable glissant correspondant et ses dérivées temporelles successive jusqu'à certain ordre, c'est-à-dire  $r^{th}$  l'ordre défini précédemment. La surface de glissement définie dans le formalisme réduit l'ordre du système en boucle fermée, ce qui ne permet pas dans certains cas, d'imposer au système un mode de stabilisation[20].

La surface de glissement  $S(x)=0$  représente le comportement dynamique désiré du système, Stolone propose une forme générale pour déterminer la surface de glissement qui assure la convergence d'une variable d'état  $x$  vers sa valeur désirée  $x_{ref}$  cette fonction est donnée par l'équation[20].

$$S(x) = \left( \frac{\partial}{\partial x} + \lambda \right)^{r-1} e(x) \quad (\text{III.2})$$

$$e(x): \text{L'écart de la variable à régler } e(x) = x_{ref} - x \quad (\text{III.3})$$

$\lambda$  : une constante positive qui interprète la bande passante du contrôle désiré.

$r$  : degré relatif, égale au nombre de fois qu'il faut dériver la sortie pour faire apparaître la commande.

Pour  $r = 1$ ,  $S(x) = e(x)$

Pour  $r = 2$ ,  $S(x) = \lambda e(x) + \dot{e}(x)$

Pour  $r = 3$ ,  $S(x) = \lambda^2 e(x) + 2\lambda \dot{e}(x) + \ddot{e}(x)$

En d'autres termes, la difficulté revient à un problème de poursuite de trajectoire dont l'objectif est de garder  $S(x)$  à zéro. Ceci est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart en respectant la condition de convergence. La linéarisation exacte de l'écart a pour but de forcer la dynamique de l'écart (référence – sortie) à être une dynamique d'un système linéaire autonome d'ordre «  $r$  », (figure III.2).[63]

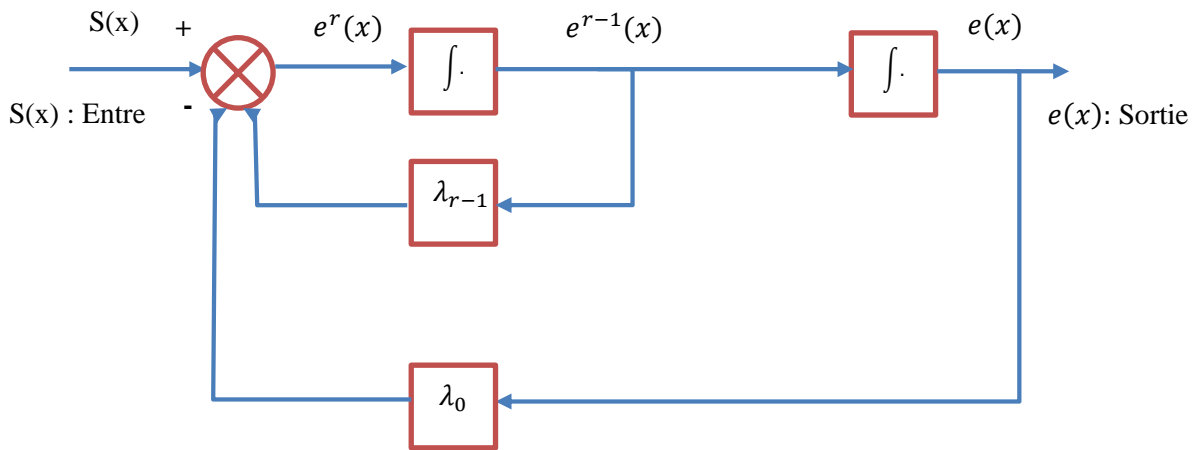


Figure III.2 : Linéarisation exacte de l'écart

### III.3.2 Conditions l'existence et de convergence au mode glissant :

Les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment de la perturbation. On présente deux types de conditions qui sont [61] :

#### III.3.2.1 Fonction de discrète de commutation :

C'est la première condition de convergence, elle est proposée et étudiée par Emilyanov et Utkin Il s'agit de donner à la surface une dynamique convergente vers zéro. Elle est donnée par :

$$\begin{pmatrix} \dot{S}(x) > 0 & \text{si } S(x) < 0 \\ \dot{S}(x) < 0 & \text{si } S(x) > 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \dot{S}(x)S(x) < 0 \quad (\text{III.4})$$

#### III.3.2.2 Fonction de Lyapunov :

Il s'agit de choisir une fonction candidate de Lyapunov ( $V(x) > 0$ ) (fonction scalaire positive) pour les variables d'état du système et de choisir une loi de commande qui fera décroître cette fonction  $\dot{V}(x) < 0$ . En définissant par exemple une fonction candidate de Lyapunov pour le système comme suit :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad (\text{III.5})$$

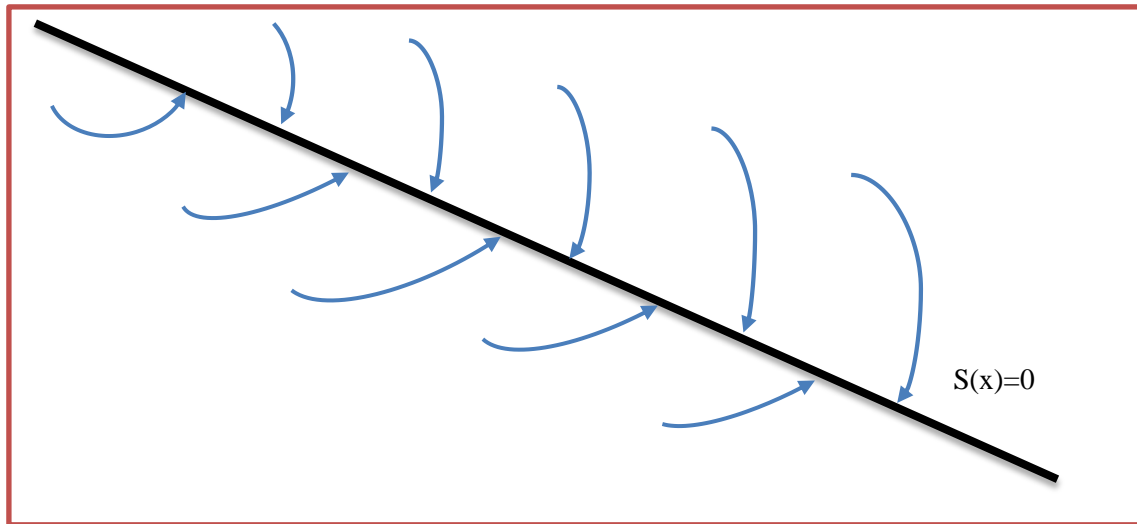
La dérivée de cette fonction est :

$$\dot{V}(x) = S(x) \dot{S}(x) \quad (\text{III.6})$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroisse, il suffit d'assurer que sa dérivée est négative. Ceci est vérifié si :

$$S(x) \dot{S}(x) \leq 0 \quad (\text{III.7})$$

Cette équation montre que le carré de la distance vers la surface, mesuré par  $S^2(x)$ , diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface des deux côtés (Figure III.3). Cette condition suppose un régime glissant idéal.



**Figure III.3 :** Trajectoire de l'état vis-à-vis la surface de glissement

### III.3.3 Détermination de la loi de commande :

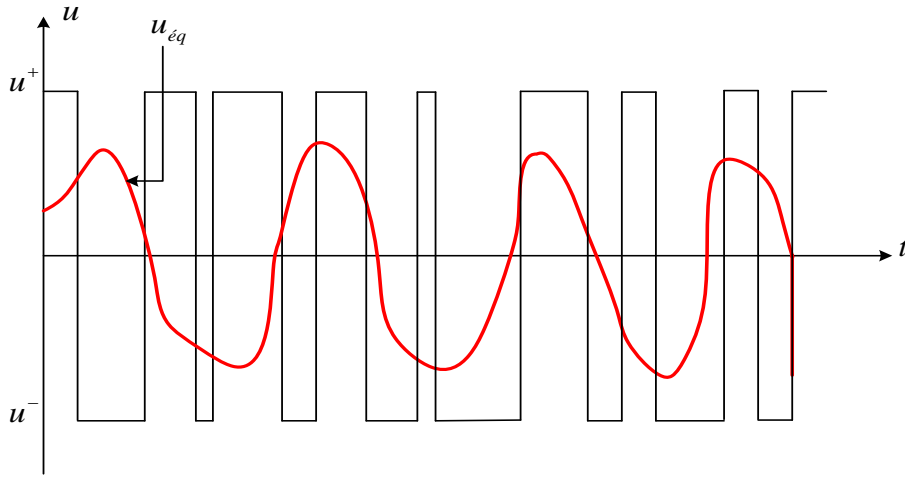
Une fois la surface de glissement est choisie, ainsi que le critère de convergence, il reste à déterminer la commande nécessaire pour ramener la variable vers son point d'équilibre en maintenant la condition d'existence des modes glissants[59, 60] .

La structure d'un contrôleur par mode de glissement est constituée de deux parties, une concernant la linéarisation exacte ( $U_{eq}$ ) et l'autre stabilisante ( $U_n$ ).

$$U = U_{eq} + U_n \quad (\text{III.8})$$

$U_{eq}$  : Elle est obtenue avec la méthode de la commande équivalente [38]. Elle sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement  $S(x) = 0$ . La commande équivalente est déduite, en considérant que la dérivée de la surface  $\dot{S}(x)$  est nulle .

$U_n$  : La commande discontinue (discrète), permet au système d'atteindre et de rester sur la surface de glissement.



**Figure III.4 :** Valeur continue  $u_{eq}$  prise par la commande lors de la commutation entre  $u^+$  et  $u^-$ .

Afin de mettre en évidence le développement précédent, on considère le système d'état l'équation (III.1). On cherche à déterminer l'expression analogique de la commande  $U$ .

La dérivée de la surface est :

$$\dot{S}(x,t) = \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} \quad (\text{III.9})$$

Par substitution nous obtenons :

$$\dot{S}(x,t) = \frac{\partial S}{\partial t} [A(x,t)x + B(x,t)U_{eq}] \frac{\partial S}{\partial x} B(x,t)U_n \quad (\text{III.10})$$

Sachant que la surface est nulle pendant le mode de glissement et le régime permanent, la dérivée et la partie discontinue un sont aussi nulles :

$$\begin{cases} U_n = 0 \\ \dot{S}(x,t) = 0 \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

L'expression de la commande équivalente peut donc être donnée par :

$$U_{eq} = - \left( \frac{\partial S}{\partial x} \cdot B(x,t) \right)^{-1} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \cdot A(x,t) \cdot x \quad (\text{III.12})$$

Durant le mode convergence, en remplaçant la commande équivalente par son expression, nous obtenons une nouvelle expression de  $\dot{S}(x,t)$  :

$$\dot{S}(x,t) = \frac{\partial S}{\partial x} B(x,t)U_n \quad (\text{III.13})$$

On obtient :

$$S(x,t) \cdot \frac{\partial S}{\partial x} B(x,t) U_n < 0 \quad (\text{III.14})$$

Pour que cette condition soit vérifiée, il suffit que le signe de  $U_n$  soit opposé à celui de  $S(x,t) \cdot \frac{\partial S}{\partial x} B(x,t)$ . Généralement la commande discrète en mode glissant peut prendre la forme (figure III.5) de type relais donnée par l'expression suivante [59] [60] [62] :

$$U_n = K \cdot \text{Sign}(S(x)) \quad (\text{III.15})$$

Où :  $\text{Sign}(S(x))$  est la fonction définie par [17] :

$$\text{Sign}(S(x)) = \begin{cases} -1 & \text{si } S(x) < 0 \\ 1 & \text{si } S(x) > 0 \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

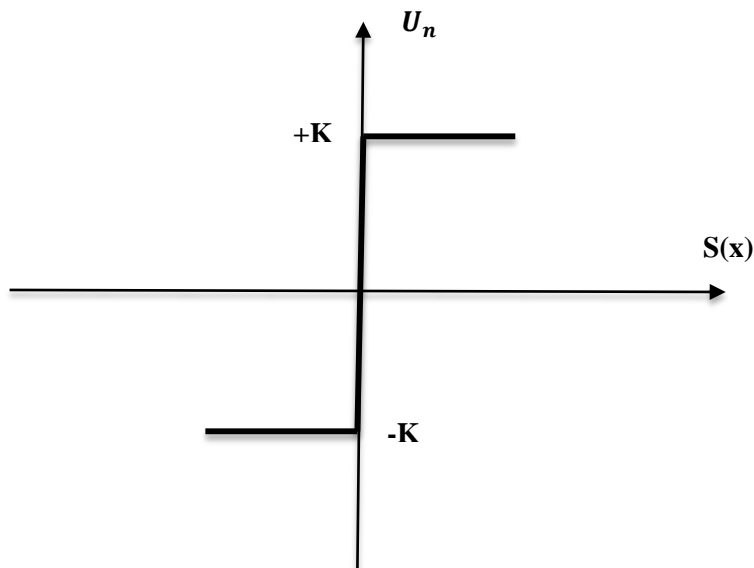


Figure III.5 : Fonction  $\text{Sign}$  (Commande de type relais)

Cependant, la fonction  $\text{sign}$  génère sur la surface de glissement, un phénomène appelé broutement ou (Chattering) qui est en général indésirable car il ajoute au spectre de la commande des composantes hautes fréquences. La figure (III.6) représente le phénomène de broutement[61].

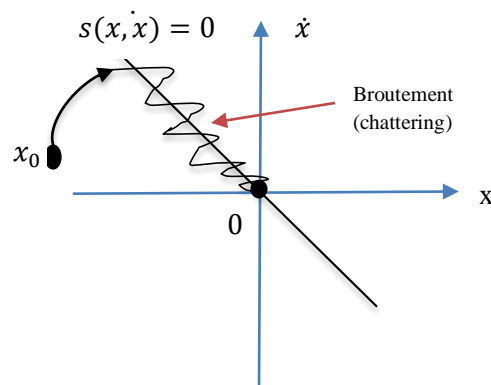


Figure III.6 Phénomène de broutement

### III.4 ELIMINATION DU PHENOMENE DU BROUITEMENT(Chattering) :

Le phénomène de Chattering est provoqué par une commutation non infiniment rapide de la commande quand les techniques des modes glissants sont utilisées. Ce phénomène est indésirable car il ajoute au spectre de la commande des composantes de haute fréquence .

Le broutement (phénomène de Chattering) peut être réduit en remplaçant la fonction « *sign* » par une fonction de saturation adéquate qui filtre les hautes fréquences .On donne par l'équation (III.17) un exemple de fonction de saturation (figure III.7)[63].

- Fonction SAT

$$\begin{cases} Sat(s) = 1 & si & S > \varepsilon \\ Sat(s) = -1 & si & S < -\varepsilon \\ Sat(s) = \frac{s}{\varepsilon} & si & |S| < \varepsilon \end{cases} \quad (III.17)$$

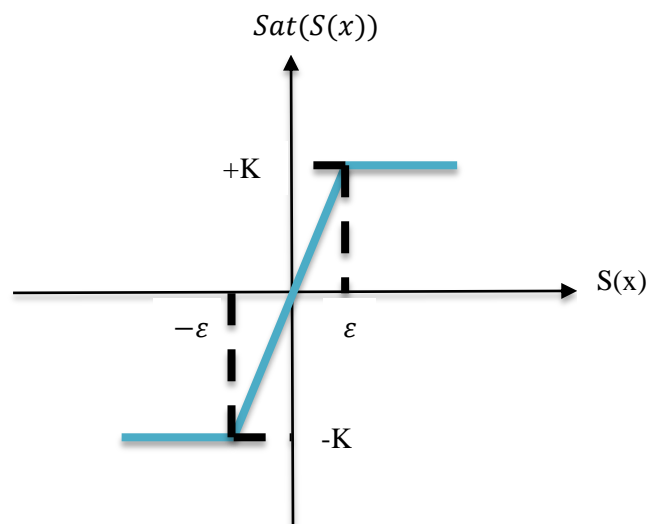


Figure III.7 : Fonction de saturation (Commande adoucie).

### III.5 APPLICATION DE LA COMMANDE PAR MODE GLISSANT AU MADA :

La commande par mode glissant consiste à ramener la trajectoire d'état vers la surface de glissement et de le faire évoluer dessus avec une certaine dynamique jusqu'au point d'équilibre. La conception de la commande par mode glissant revient principalement à déterminer trois étapes.

On prend la forme d'équation générale proposée par J.J.Slotine pour déterminer la surface de glissement donnée par :

$$S(x) = \left( \frac{\partial}{\partial x} + \lambda \right)^{r-1} e(x) \quad (III.18)$$

$$\text{OU } e(x) = x_{ref} - x \quad (III.19)$$

Avec :

$e$  : erreur sur la surface à régler.

$\lambda$  : Coefficient positif.

$r$  : ordre de système.

$x_{ref}$  : grandeur désiré.

$x$  : variable d'état de la grandeur commandée.

Dans cette étude nous avons appliqué la commande direct de puissance qui présenté dans la figure.III.8. Ce pour cela les surfaces de glissement sont choisies de manière à ce qu'elles soient compatibles avec les erreurs dans les puissances active et réactive statorique de la MADA[20].

### III.5.1 Contrôle de la puissance active :

Pour contrôler la puissance, on prend  $n=1$ , l'expression de la surface de contrôle de la puissance active a pour forme[63] :

$$S(P) = (P_{sref} - P_s) \quad (III.20)$$

La dérivée de la surface est :

$$\dot{S}(P) = (\dot{P}_{sref} - \dot{P}_s) \quad (III.21)$$

On remplace l'expression de la puissance par l'équation (III.21) :

$$\dot{S}(P) = (\dot{P}_{sref} - V_s \frac{M}{L_s} I_{qr}) \quad (III.22)$$

On tire l'expression du courant  $I_{qr}$  de l'équation de la tension  $V_{qr}$  en négligeant les termes de couplage

$$\dot{S}(P) = \dot{P}_{sref} - V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} (V_{qr} - R_r I_{qr}) \quad (III.23)$$

En remplaçant l'expression de  $V_{qr}$  par  $V_{qreq} + V_{qrm}$ , la commande apparaît clairement dans l'équation suivante :

$$\dot{S}(P) = \dot{P}_{sref} + V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} ((V_{qreq} + V_{qrm}) - R_r I_{qr}) \quad (III.24)$$

Durant le mode de glissement et en régime permanent, on a :

$$S(P) = 0, \dot{S}(P) = 0, V_{qm} = 0 \quad (\text{III.25})$$

On tire de l'équation précédente la grandeur de commande équivalente  $V_{qr}^{eq}$  qui s'écrit :

$$V_{qreq} = -\dot{P}_{sref} \frac{L_s L_r \sigma}{V_s M} + R_r I_{qr} \quad (\text{III.26})$$

Durant le mode de convergence, pour que la condition  $S(x) \dot{S}(x) \leq 0$  soit vérifiée, on pose:

$$\dot{S}(P) = -V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} V_{qm} \quad (\text{III.27})$$

Par conséquent, le terme de commutation est donné par :

$$V_{qrm} = K \cdot \text{Sign}(S(P)) \quad (\text{III.28})$$

Pour vérifier la condition de stabilité du système, le paramètre  $K$  doit être positif, afin d'atténuer tout dépassement possible de la tension de référence  $V_{qr}$ .

### III.5.2 Contrôle de la puissance réactive :

Pour contrôler la puissance, on prend  $n=1$ , l'expression de la surface de contrôle de la puissance active a pour forme :

$$S(Q) = (Q_{sref} - Q_s) \quad (\text{III.29})$$

La dérivée de la surface est :

$$\dot{S}(Q) = (\dot{Q}_{sref} - \dot{Q}_s) \quad (\text{III.30})$$

On remplace l'expression de la puissance par l'équation (III.30) :

$$\dot{S}(Q) = (\dot{Q}_{sref} - (-V_s \frac{M}{L_s} I_{dr})) \quad (\text{III.31})$$

On tire l'expression du courant  $I_{dr}$  de l'équation de la tension  $V_{dr}$  en négligeant les termes de couplage

$$\dot{S}(Q) = \dot{Q}_{sref} + V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} (V_{qr} - R_r I_{dr}) \quad (\text{III.32})$$

En remplaçant l'expression de  $V_{dr}$  par  $V_{dreq} + V_{drn}$ , la commande apparaît clairement dans l'équation suivante :

$$\dot{S}(Q) = \dot{Q}_{sref} + V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} ((V_{dreq} + V_{drn}) - R_r I_{dr}) \quad (III.33)$$

Durant le mode de glissement et en régime permanent, on a :

$$S(Q) = 0, \dot{S}(Q) = 0, V_{drn} = 0 \quad (III.34)$$

On tire de l'équation précédente la grandeur de commande équivalente  $V_{dr}^{eq}$  qui s'écrit :

$$V_{dreq} = -\dot{Q}_{sref} \frac{L_s L_r \sigma}{V_s M} + R_r I_{dr} \quad (III.35)$$

Durant le mode de convergence, pour que la condition  $S(x) \dot{S}(x) \leq 0$  soit vérifiée, on pose :

$$\dot{S}(Q) = -V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} V_{drn} \quad (III.36)$$

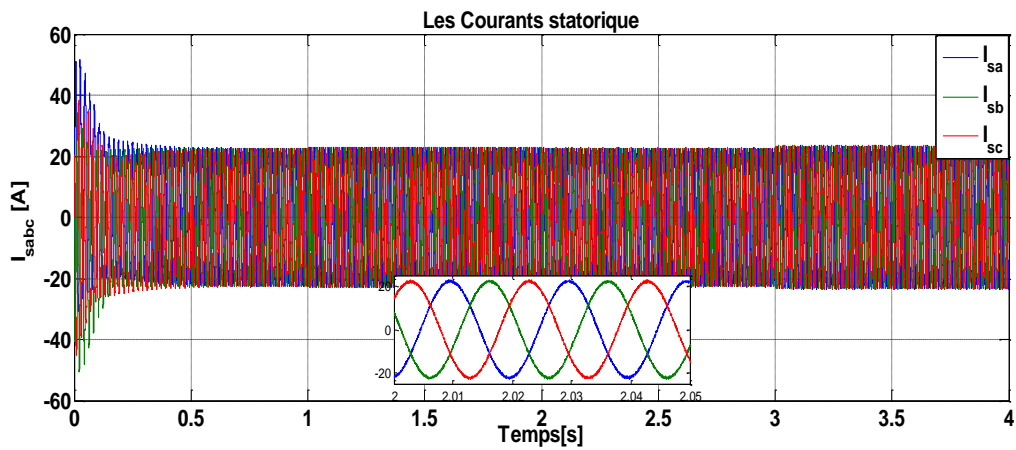
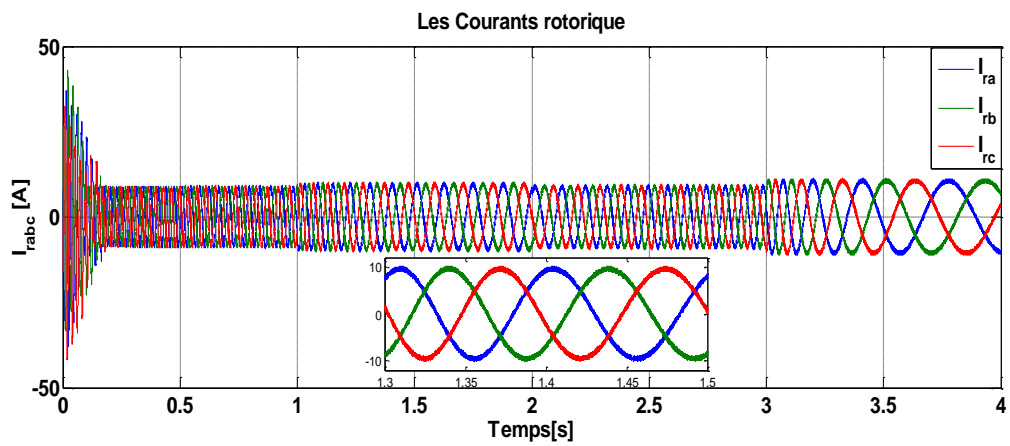
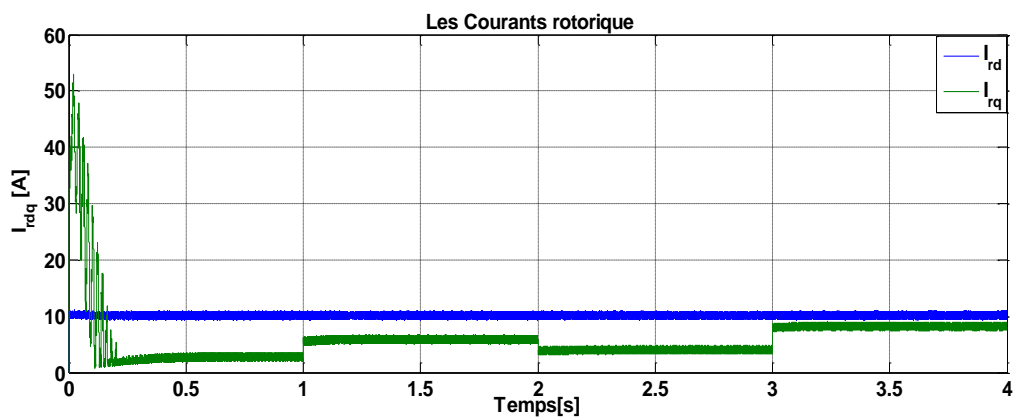
Par conséquent, le terme de commutation est donné par :

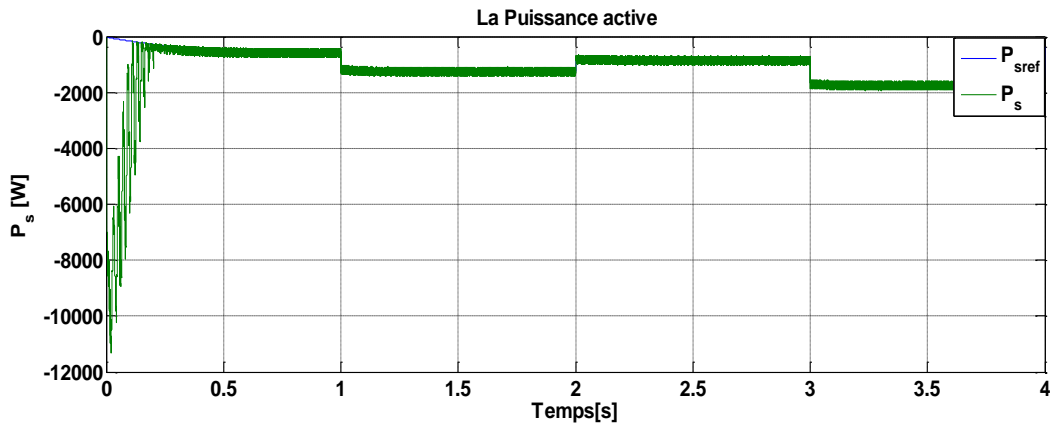
$$V_{drn} = K \cdot \text{Sign}(S(Q)) \quad (III.37)$$

Pour vérifier la condition de stabilité du système, le paramètre  $KV_{dr}$  doit être positif, afin d'atténuer tout dépassement possible de la tension de référence  $V_{dr}$ .

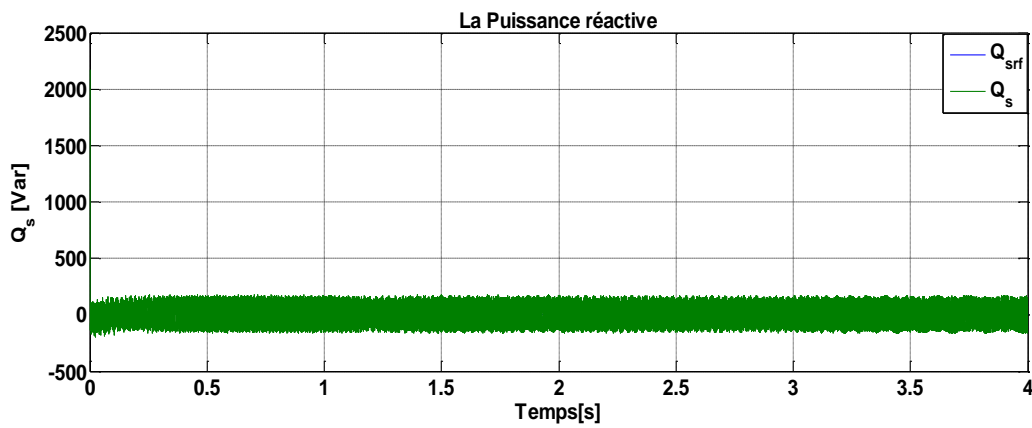
A partir de ces équations, nous pouvons établir les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques que cela engendre, Il est donc possible maintenant de décrire le schéma bloc de la commande par mode glissant de la GADA (figure III.8.).



A) Les Courants statorique  $I_{sabc}$  (A)B) Les Courants rotorique  $I_{rabc}$  (A)C) Les Courants rotorique  $I_{rdq}$  (A)



D) La Puissance active  $P_s$  (W)



E) La Puissance réactive  $Q_s$  (Var)

Figure III.11 : Résultats de simulation de la DPC-MG de la GADA pour vitesse du vent fixe.

- **Fonctionnement à vitesse du vent variable**

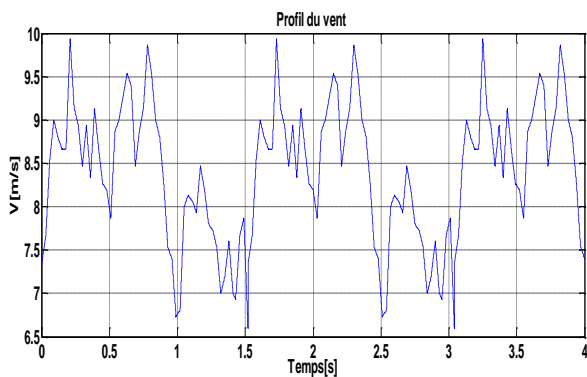


Figure III.12 : Profil du vent appliqué

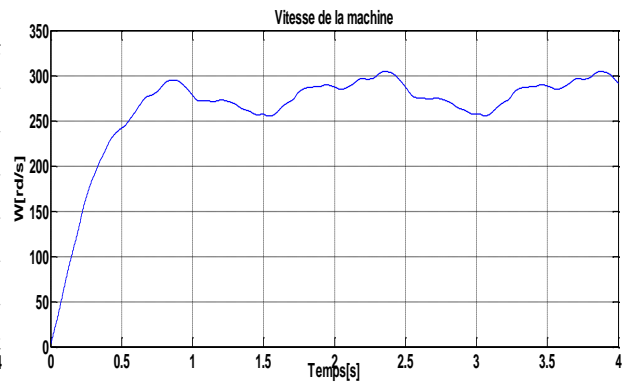
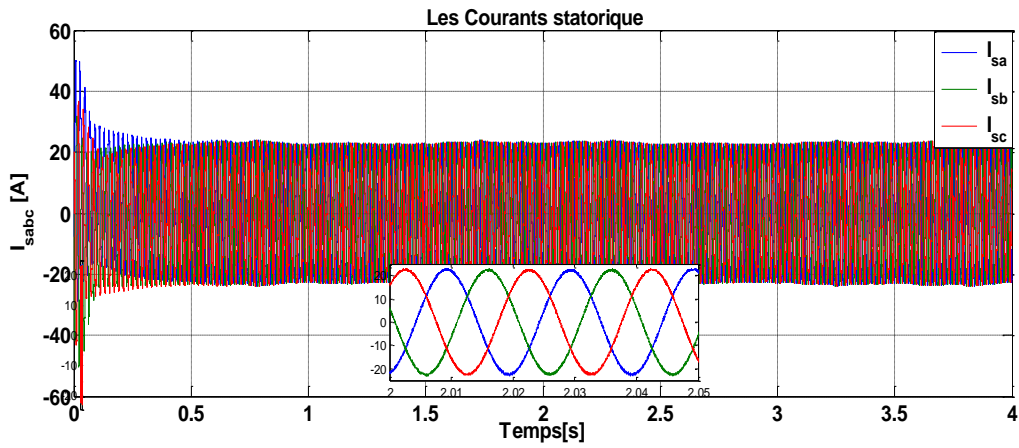
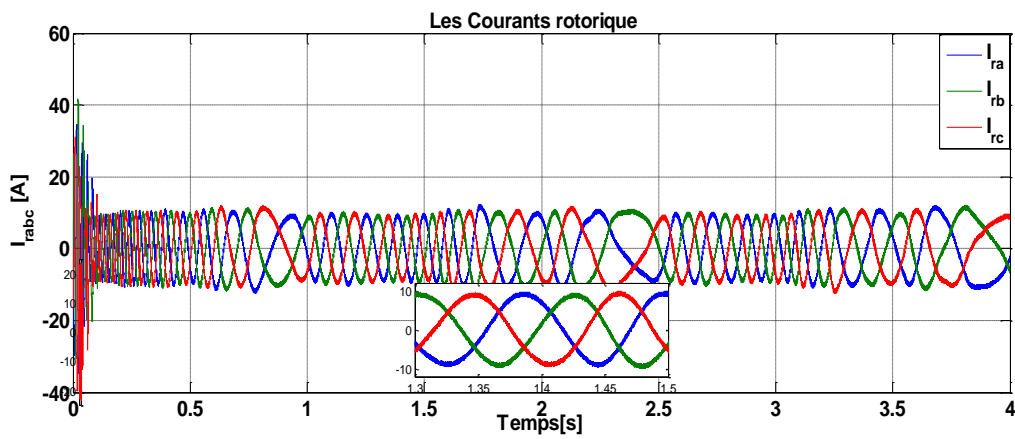


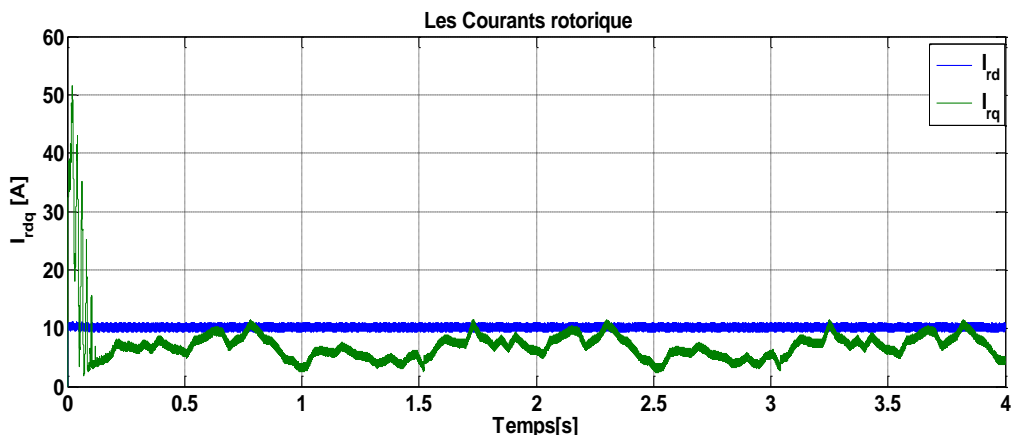
Figure III.13 : Vitesse de la turbine selon le MPPT



F) Les Courants statorique  $I_{sabc}$  (A)



G) Les Courants rotorique  $I_{rabc}$  (A)



H) Les Courants rotorique  $I_{rdq}$  (A)

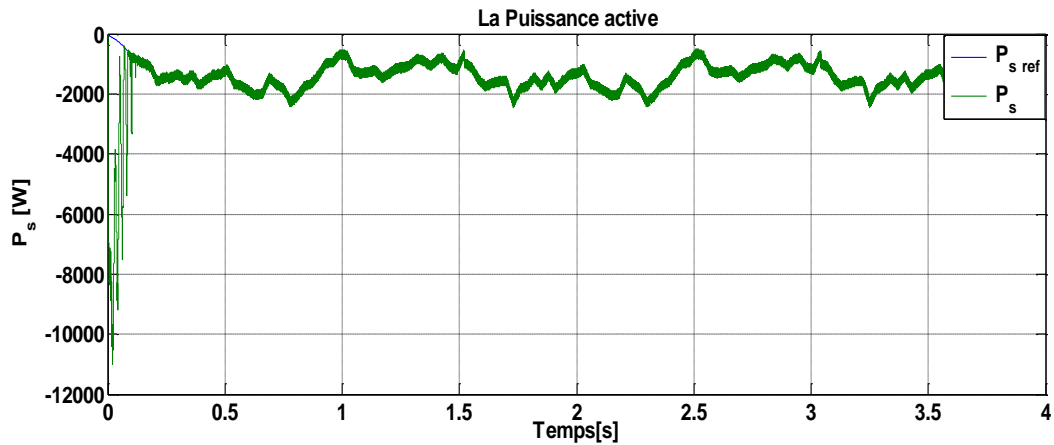
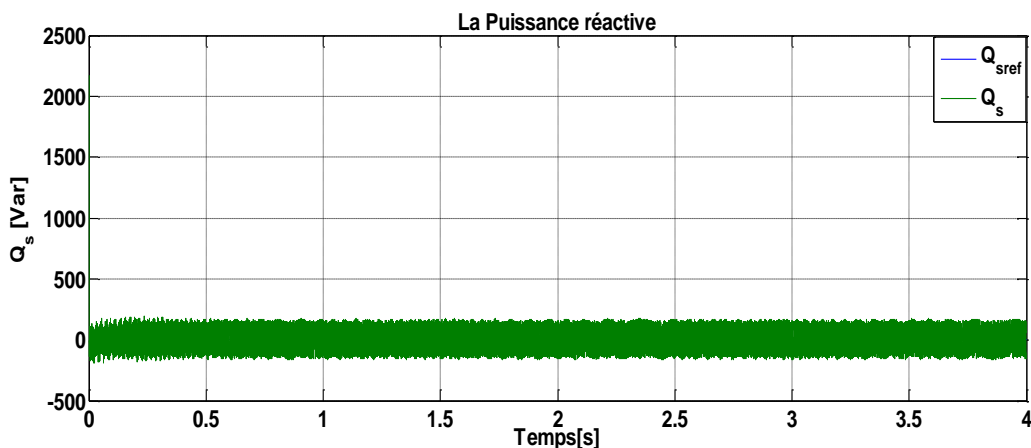
I) La Puissance active  $P_s$  (W)J) La Puissance réactive  $Q_s$  (Var)

Figure III.14 : Résultats de simulation de la DPC-MG de la GADA pour vitesse du vent variable.

#### • Interprétations des résultats :

Les figures ci-dessus représentent les résultats de simulation obtenus en appliquant la commande DPC-MG sur Gada, en remplaçant juste le régulateur classique PI de la vitesse par un régulateur par mode glissant. Les résultats de simulation obtenus sont illustrés par la figure (III.13,III.14). En plus, nous avons donné des valeurs différentes changement de la vitesse du vent :

A partir de ces figures, nous pouvons relever les points suivants :

- On montre la réponse de la puissance active et réactive pour le DPC conventionnel et la topologie proposée (DPC- MG). Malgré les perturbations qui sont dues à la variation de la vitesse du vent, dans ce cas, on peut remarquer que la topologie de la commande proposée maintient les puissances de sortie à sa référence. Ainsi la puissance réactive est nulle, ce qui nous permet d'avoir un facteur de puissance unitaire.

- Le courant statorique  $I_s$  et le courant rotorique  $I_r$  générés par la GADA ont une allure sinusoïdale. Néanmoins, la présence des fluctuations est visible, et moins d'ondulations grâce à la fréquence de commutation fixée par la DPC-MG-SVM. De plus, l'augmentation de la vitesse du vent engendre des augmentations au niveau des courants statoriques et rotoriques.

Cas où elle présente une fluctuation de la commande classique. De plus, par rapport au contrôle DPC classique, on peut clairement observer que la stratégie DPC-SVM-MG réduit l'ondulation de la puissance active et de la puissance réactive.

De plus, cette stratégie élimine les pics résultant des changements de vitesse du vent.

### III.6.1. Comparaison quantitative [38]

L'objectif visé dans cette partie est la comparaison entre les différents contrôleurs de puissance active et réactive de la GADA contrôlé par la quantitativement (en chiffres). Par conséquent, l'erreur et le temps sont des facteurs très importants qui doivent être considérés simultanément. En plus, la notion d'un indice de performance est très importante dans le domaine du contrôle de procédé et la conception du contrôleur

Le choix du critère à utiliser dépend du type de la réponse désirée et l'erreur contribue différemment dans chaque critère.

Pour quantifier les erreurs, nous utilisons trois critères de performance, à savoir : l'intégral de l'erreur au carré (ISE), l'intégral de la valeur absolue de l'erreur (IAE) et l'intégral du temps multiplié par la valeur absolue de l'erreur (ITAE).

Mathématiquement ces critères sont définis par :

- Intégral de l'Erreur au Carré (ISE)

$$ISE = \int_0^{+\infty} e^2 dt \quad (\text{III.38})$$

Le critère ISE est important dans le cas des réponses avec des dépassements minimums lorsque la charge varie. Par conséquent, ce critère est relativement peu sensible aux faibles erreurs par rapport aux fortes. Il conduit souvent à une réponse avec peu de dépassement mais avec une déstabilisation assez longue.

- Intégral de la valeur Absolue de l'Erreur (IAE)

$$IAE = \int_0^{+\infty} |e| dt \quad (\text{III.39})$$

Le critère IAE donne plus de poids aux faibles erreurs.

- Intégral du Temps multiplié par la valeur absolue de l'erreur (ITAE)

$$ITAE = \int_0^{+\infty} t |e^2| dt \quad (III.40)$$

Le critère ITAE privilégie une faible erreur statique au prix d'un dépassement initial qui peut être important puisqu'il a lieu pour des faibles valeurs de  $t$ .

Les indicateurs de performances en régime permanent pour les commandes proposées dans ce travail pour la machine asynchrone à double alimentation, sont donnés dans le tableau III.1

$$\varepsilon = P_{sref} - P_s \quad (III.41)$$

Stratégie de commande	<i>DPC_C</i>	<i>DPC_SVM</i>	<i>DPC-SVM-MG</i>
<i>ITAE</i>	<i>775.9</i>	<i>345.8</i>	<i>336.1</i>
<i>IAE</i>	<i>702</i>	<i>630.6</i>	<i>594.4</i>
<i>ISE</i>	<i>3.175<sup>e+06</sup></i>	<i>2.147<sup>e+06</sup></i>	<i>1.813<sup>e+06</sup></i>
<i>THD(%)</i>	<i>65.60%</i>	<i>63.77%</i>	<i>28.40%</i>

**Tableau III.1 :** Indicateurs de performance pour les différentes stratégies de CTD proposées.

Les indicateurs de performances présentés dans le tableau III.1 indiquent clairement que le régulateur par mode glissant a une légère supériorité de performance par rapport à les autres commandes.

### III.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté en premier lieu les bases théoriques des régulateurs par mode glissant, après on a procédé à leurs applications dans DPC-SVM par mode glissant dans le générateur asynchrone à double alimentation. Nous avons analysé et ce pour diverses conditions de fonctionnement d'un GADA, puis on a appliqué cette dernière sur le GADA. Ce chapitre a fait l'objet de l'application de la commande par mode de glissement. Pour prouver les performances de ce régulateurs nous avons le testé et comparé ses résultats de simulation avec des résultats obtenues avec le DPC, DPC-SVM et le régulateur par mode glissant classique.

Les régulateurs par mode glissant offre, par rapport au technique DPC et DPC-SVM, une très bonne robustesse aux variations de la vitesse de vent et un temps de réponse court

*Conclusion*

*générale*

## CONCLUSION GENERALE :

Le marché des énergies renouvelables a connu un essor considérable durant ces dernières années. La consommation intensive de l'énergie électrique, l'augmentation des prix des hydrocarbures ont conduit plusieurs pays à initier des programmes nationaux et internationaux destinés à produire de l'énergie électrique à partir des ressources renouvelables.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier et de réaliser par la simulation numérique une commande de la génératrice asynchrones double alimentation qui peut être utilisé dans la production de l'énergie éolienne. Cette commande est appliquée sur le convertisseur côté machine (CCM) qui alimente le rotor de la MADA. Nous avons choisi trois stratégies de commande (Commande directe de puissance(DPC) et Amélioration de la DPC par la modulation vectorielle (SVM) Commande directe de puissance par le mode glissant (DPC-SVM-MG) de la GADA).

Dans le premier chapitre, nous avons entamé ce travail par un rappel sur l'énergie éolienne et les systèmes utilisées pour produire cette énergie, Puis, on a présenté une description générale de l'ensemble des éléments constituant du système choisi pour notre étude. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons réalisé une modélisation complète et globale du système éolien basé sur la MADA à travers les étapes suivantes :

- La modélisation des différents constituants du système éolien.
- Le développement des modèles analytiques de ces constituants notamment, le modèle aérodynamique et mécanique de la turbine et le coefficient de puissance.
- La modélisation de la MADA dans le repère triphasé puis dans le repère de Park lié au champ tournant en utilisant des hypothèses simplificatrices pour faciliter l'opération.
- Enfin, la modélisation du convertisseur côté machine (CCM) utilisé pour l'alimentation du rotor de la MADA.

Dans le deuxième, on a proposé la stratégie de contrôle DPC (Direct Power Control) appliquée au convertisseur CCM de MADA et qui est initialement inspirée du contrôle direct du couple (DTC). La stratégie DPC classique (DPC-C) propose de contrôler directement la puissance active et réactive de la MADA à l'aide des comparateurs à hystérésis et une table de commutation. Cette stratégie de contrôle possède des inconvénients, tels que : la fréquence de commutation variable et les fluctuations de puissances. Donc pour s'affranchir des contraintes sévères de temps de calcul et améliorer les inconvénients du contrôle DPC-C, nous avons choisi une technique DPC-SVM qui repose sur l'utilisation d'une modulation MLI vectorielle (SVM). Les tests de simulation montrent les améliorations apportées par la DPC-SVM par rapport à la DPC classique (DPC-C) dans la commande du système de conversion d'énergie éolienne.

A travers le dernier chapitre, a été consacré à la commande par mode glissant a été étudiée d'où Les résultats obtenus ont montrés que le régulateur par mode de glissement offre de bonnes performances statiques et dynamiques, un rejet immédiate et quasi total de la perturbation, comme ils accordent aussi une meilleure poursuite. Une régulation de vitesse

assez satisfaisante au détriment d'une activation assez importante provoquant un phénomène appelé broutement (chattering).

Enfin, nous avons développé une étude comparative des trois techniques de commande (**DPC\_C**, **DPC\_SVM** et **DPC-SVM-MG**) afin d'avoir une meilleure appréciation des réponses obtenus, ainsi pour faire un choix du type de commande suivant les performances dynamiques et statiques.

### **Perspectives :**

Notre travail a besoin d'une continuation plus profonde sur la commande en vitesse variable de la MADA. Donc, il peut être poursuivi et complété par des perspectives pouvant contribuer à son amélioration.

En perspectives de ce mémoire, on propose les idées suivantes :

- ❖ Etant donné que la tendance des chercheurs est d'éliminer les capteurs mécaniques, nous proposons une étude comparative de la commande en vitesse avec et sans capteur mécanique.
- ❖ D'un autre côté, nous pensons qu'il est très intéressant d'appliquer les nouvelles techniques de commande à la régulation de vitesse de la MADA. Dans ce cadre, nous citons la commande par logique floue et la commande par réseau de neurone.
- ❖ Utiliser des onduleurs multi-niveaux associés à la commande directe du couple (DTC), afin de minimiser les fluctuations du couple électromagnétique .
- ❖ Utiliser des observateurs tels que, le filtre de KALMAN ou l'observateur de type MRAS pour estimer le flux et la vitesse de la MADA avec plus de précision.

## ANNEXES :

1. Les paramètres de la machine asynchrone double alimentée :

<i>Paramètre</i>	<i>Symboles</i>	<i>Valeur numérique</i>
Puissance nominale	$P_n$	5 kw
Résistance statorique	$R_s$	0.435 $\Omega$
Résistance rotorique	$R_r$	0.816 $\Omega$
Inductance mutuelle	$M$	0.069 H
Inductance statorique	$L_s$	0.071 H
Inductance rotorique	$L_r$	0.071 H
Nombre de paires de pôles	$P$	2
Tension du réseau utilisé	$V$	220/380 V
Fréquence du réseau	$F$	50 Hz
Moment d'inertie	$J$	0.089 Kg.m <sup>2</sup>
La vitesse nominale	$N$	1450 tr/min
Coefficient de frottement visqueux	$f$	0.001 N.m.s /rd

**Tableau A-1: Paramètres de la MADA.**

2. Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :

<i>Paramètre</i>	<i>Symboles</i>	<i>Valeur numérique</i>
Nombre de pales	$B_t$	2
Rayon de l'éolienne	$R_t$	50 m
Densité de l'air	$\rho$	1.225 Kg /m <sup>3</sup>
Gain du multiplicateur de vitesse	$G$	90
Moment d'inertie de la turbine	$J_t$	50 Kg.m <sup>2</sup>
Coefficient de frottement	$f_v$	0.0071 N.m. s <sup>2</sup>

**Tableau A-2: Paramètres de la turbine éolienne.**

# Références :

- [1] A. BEN AMAR, "ETUDE DE LA COMMANDE D'UN SYSTEME ÉOLIEN BASE SUR UNE GADA," Université de Batna 2, 2016.
- [2] M. N. C. E. Mr. Banjar Abah Moussa, "Commande directe des puissances (DPC) appliquée sur une Génératrice à double alimentation connectée avec turbine éolienne," Master, Université -Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib, 2022. [Online]. Available: [http://tpe.samron.free.fr/TPE-SamRon/I\\_Histoire\\_et\\_fonctionnement\\_de\\_leolienne.html](http://tpe.samron.free.fr/TPE-SamRon/I_Histoire_et_fonctionnement_de_leolienne.html)
- [3] [http://tpe.samron.free.fr/TPE-SamRon/I\\_Histoire\\_et\\_fonctionnement\\_de\\_leolienne.html](http://tpe.samron.free.fr/TPE-SamRon/I_Histoire_et_fonctionnement_de_leolienne.html) (accessed 29 Mars, 2023).
- [4] Z. AHMIDAT, Z. KOUIDRI, and S. E. MEKHLLOUFI, "Commande d'une éolienne à base d'une GADA par un onduleur multi-niveaux," Université Ahmed Draïa-Adrar, 2018.
- [5] R. KHEBAL and Z. KHEBAL, "Commande Directe de Puissance (DPC) d'une MADA Intégrée à un Système Éolien," university of M'sila, 2022.
- [6] B. YOUCEF, "Contribution à l'étude et à la Commande Robuste d'un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation," Université de Biskra-Mohamed Khider, 2014.
- [7] M. Bouamrane, "Commande DPC d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)," 2019.
- [8] C. Said, "Contribution à l'optimisation de la commande prédictive des convertisseurs statiques intégrés dans les chaines de conversion d'énergie éolienne," Thèse doctorat en génie électrique, Université Larbi Ben M'hidi-Oum El ..., 2017.
- [9] م. الحبيب, عفة, م. لخضر, حوري, البشير, and عتوسي, "Commande directe de puissance d'une génératrice asynchrone à double alimentation," 2022.
- [10] N. K. Merzouk and H. Daaou, "Cartes saisonnières du vent en Algérie," ed: journée d'études: météorologie et climatologie entre sciences et prise de ..., 2001.
- [11] B. Kelkoul, "Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation," 2011.
- [12] M. Koumir, "Commande intelligente d'une éolienne à vitesse variable," 2017.
- [13] R. RIYADH, "Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée. Doctorat thesis (2016), Université de Batna 2," 2017.
- [14] O. BRAHIMI and M. W. MECHERNENE, "Commandes d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) utilisée dans une chaîne éolienne."
- [15] A. BOYETTE, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production d'énergie éolienne," Thèse de doctorat, Nancy I, 2006.
- [16] O. MOUSSA, "Contribution au contrôle d'un système éolien basé sur une MADA sans balais," Université de Batna 2, 2020.
- [17] T. Bouaouiche, *Commande à structure variable et étude de l'intégration d'éolienne à base de machine asynchrone à double alimentation sur le réseau électrique*. Nantes, 2007.
- [18] F. Boumaraf, "Commande d'un aérogénérateur-Apport des techniques de l'intelligence artificielle," Université de Batna 2, 2014.
- [19] A. Bougrine, N. Nennar, and O. Ouladali, "Commande directe de puissance DPC d'une MADA intégrée à un système éolien," Université Ahmed Draïa-Adrar, 2015.
- [20] F. Z. TRIA, "Contribution à l'étude et à la commande d'un système éolien," UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA, 2018.
- [21] H. Hassini, "Modélisation, Simulation et Optimisation d'un Système Hybride Eolien-Photovoltaïque'," *Memoire de Magister, Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen*, 2010.
- [22] A. Tebbal, M. Sekhri, and D. E. Lahlili, "Commande Prédictive d'un Système éolien à base d'une Machine Synchrone à Aimant Permanent," Université de Jijel, 2019.
- [23] M. HALLOUZ and A. KHERCHOUCHE, "Stratégie de commande DPC appliquée à une MADA utilisée pour la production d'énergie éolienne," Université Ibn Khaldoun-Tiaret-, 2017.

- [24] I. OSMANI and O. MALTI, "Modélisation et commande indirect des puissances de la génératrice asynchrone à double alimentation dédié à un système éolien," 2017.
- [25] M. RIDHA and D. AZZEDDINE, "Commande des puissances active et réactive générée par une génératrice asynchrone a double alimentation «GADA»," Univ M'sila, 2019.
- [26] B. A. Merour Aymen, "Commande d'une GADA utilisée dans un aérogénérateur relié au réseau électrique," 2021.
- [27] N. Cherfia and D. Kerdoun, "Etude d'une chaîne de conversion de l'énergie Eolienne," Université Frères Mentouri-Constantine 1, 2018.
- [28] A. Boyette, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne," Université Henri Poincaré-Nancy I, 2006.
- [29] F. Z. E. Arama, "Commande d'une machine asynchrone à double alimentation pour la production d'énergie éolienne," Université Ahmed Draia-Adrar, 2018.
- [30] O. TOUNSI and Z. LASAKRI, "Etude et commande d'une turbine éolienne Utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation," *mémoire de master, université BADJI MOKHTAR ANNABA,(2017/2018)*, 2018.
- [31] S. E. Merabet, "Commande à mode glissant de la machine asynchrone à double alimentation," 2017.
- [32] A. Houaria, "Commande par mode de glissement d'une machine asynchrone à double alimentation," Université Mohamed Boudiaf des sciences et de la technologi, 2011.
- [33] Y. Ibrahim, "Contribution à l'amélioration de la qualité d'énergie électrique d'un système éolien basé sur la MADA," 2019.
- [34] Y. Djeriri, "Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle," 2015.
- [35] R. Abdessemed, *Modélisation et simulation des machines électriques: électrotechnique. ellipses*, 2011.
- [36] S. Khojet El Khil, "Commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée (MADA): optimisation des pertes dans les convertisseurs: reconfiguration de la commande pour un fonctionnement sécurisé," Toulouse, INPT, 2006.
- [37] B. BENKHALED, "Etude et Modélisation d'une Chaîne de Production Eolienne," Université Mohamed Boudiaf-M'Sila, 2013.
- [38] H. LALLOUANI, "Commande directe du couple basée sur la logique floue type-2 d'une machine asynchrone double étoile," Univ M'sila, 2020.
- [39] S. El Aimani, "Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension," Ecole Centrale de Lille, 2004.
- [40] L. Leclercq, "Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes," *university of Lille in France*, 2004.
- [41] F. Poitiers, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-machine asynchrone a cage autonome-machine asynchrone a double alimentation reliée au réseau," Université de Nantes, 2003.
- [42] D.-H. Tran, "Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne" passive": analyse de robustesse, validation expérimentale," Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT, 2010.
- [43] T. Ghennam, "Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation," 2011.
- [44] A. Messaoud, "Commande d'une génératrice à double alimentation par la logique floue," 2019.
- [45] F. Mazouz, "Contrôle des puissances active et réactive dans les aérogénérateurs doubles alimentés," *Doctorat en Science en Electrotechnique, Option: Commande Electrique, Université de Batna*, vol. 107, pp. 108-109, 2020.
- [46] Z. TIR, "Contribution à l'Étude d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation sans Balais en vue de son Application dans le Domaine de l'Énergie Eolienne," Université de Batna 2, 2014.
- [47] E. H. Bounadja, "Commande d'une machine asynchrone a double alimentation en régime sature," 2017.

- [48] S. MASSOUM, "Contrôle avec les techniques de l'intelligence artificielle d'une source d'énergie éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation," 2018.
- [49] A. Mehdi, H. Benalla, and A. Reama, "Contribution à l'étude des redresseurs à commande par DPC pour une qualité de l'énergie," Université Frères Mentouri-Constantine 1, 2017.
- [50] M. BOUZIDI, "COMMANDES NON LINEAIRES D'UN REDRESSEUR PWM TRIPHASE," Université Mohamed Boudiaf-M'Sila, 2009.
- [51] B. Turkiya Amina and D. Noura, "La Commande Directe du Couple d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation," UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA, 2019.
- [52] É. Tremblay, "Contribution à la commande de l'éolienne à MADA en permettant l'amélioration de la qualité de l'onde du réseau électrique," École de technologie supérieure, 2009.
- [53] A. Ghouzil, D. Achour, and H. Benbouhenni, "Etude comparative entre la commande DPC, DPC-HYN et DPC-RNA de la GSAP," *Journal of Advanced Research in Science and Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 735-752, 2018.
- [54] I. Yaichi, A. Semmah, and P. Wira, "Control of doubly fed induction generator with maximum power point tracking for variable speed wind energy conversion systems," *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 64, no. 1, pp. 87-96, 2019.
- [55] O. BAZINE, "Commande Directe du Couple (DTC) d'une Machine Asynchrone à Double Etoile alimentée par un redresseur piloté par DPC (Direct Power Control)," université ghardaia, 2016.
- [56] A. BELAOURA, I. BOUSSAID, and O. Ouledali, "Contrôle directe de puissance avec modulateur vectoriel (DPC-SVM) d'un redresseur PWM triphasé," Université Ahmed Draia-ADRAR, 2017.
- [57] A. TOUAHRI, "APPLICATION DE LA DTC A UN AEROGENERATEUR ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTE," Université de Batna 2, 2016.
- [58] A. Boulahia, "Etude des Convertisseurs Statiques destines a la Qualité de l," *Energie Electrique', Thèse Magister, Université de Constantine*, 2009.
- [59] R. Sadouni, "Commande par mode glissant flou d'une machine asynchrone à double étoile," *Mémoire de Magister, UDL de Sidi Bel Abbes, Algérie*, 2010.
- [60] R. SADOUNI, "Commande directe du couple (DTC-SVM) d'une MASDE associée à Deux Onduleurs Multiniveaux en Cascade avec un Redresseur à MLI Piloté par DPC," 2017.
- [61] A. BOUZIDI, "Commande par mode glissant floue d'un D-STATCOM multiniveaux," Université Mohamed Boudiaf-M'Sila, 2011.
- [62] B. Salah Eddine, "La commande non linéaire d'une machine asynchrone Double étoile «MASDE»," UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA, 2019.
- [63] M. F. Zohra, "Intitulé Commande de la Génératrice Asynchrone Double Alimentation pour La Production de L'énergie Eolienne," Doctora, 2011. *جامعة وهران للعلوم و التكنولوجيا محمد بوضياف*