

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique

École nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

Département d'Electrotechnique

**Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en  
Electrotechnique**

Thème :

**Commande DPC d'une Machine Asynchrone à Double  
Alimentation (MADA).**

**Application à L'énergie Éolienne**

M. Mohamed BOUAMRANE

Sous la direction de : E.M.BERKOUK Professeur

& A.BENACHOUR MCB

Présenté et soutenu publiquement le 26/06/2019

**Composition du Jury :**

Président : M.M.O.MAHMOUDI, Professeur ENP

Examineur : M.R.TAHMI, Professeur ENP

Examineur : M.T.ZEBBADJI, Docteur ENP

Promoteurs : M.E.M.BERKOUK, Professeur ENP

M.A.BENACHOUR, MCB ESSA



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique

École nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

Département d'Electrotechnique

**Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en  
Electrotechnique**

Thème :

**Commande DPC d'une Machine Asynchrone à Double  
Alimentation (MADA).**

**Application à L'énergie Éolienne**

M. Mohamed BOUAMRANE

Sous la direction de : E.M.BERKOUK Professeur

& A.BENACHOUR MCB

Présenté et soutenu publiquement le 26/06/2019

**Composition du Jury :**

Président : M.M.O.MAHMOUDI, Professeur ENP

Examineur : M.R.TAHMI, Professeur ENP

Examineur : M.T.ZEBBADJI, Docteur ENP

Promoteurs : M.E.M.BERKOUK, Professeur ENP

M.A.BENACHOUR, MCB ESSA

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail :*

*A celle qui m'a transmis la vie, l'amour et le courage, à toi chère mère.*

*A ma très chère sœur,*

*A mes grands-parents,*

*A mon amie et sœur Dounia Zed BRINIS,*

*A tous ceux que j'estime.*

## **REMERCIEMENTS**

*C'est avant tout grâce à « Dieu Le Tout Puissant » que ce travail a pu être réalisé.*

*J'adresse mes sincères remerciements à mon encadreur Pr E.M BERKOUK pour ses conseils judicieux, ses recommandations et son soutien tout au long de ce projet.*

*Je présente ma profonde gratitude à mon Co-encadreur Dr A. BENACHOUR pour l'aide, l'orientation et le support qu'il m'a apporté.*

*Mes remerciements vont également à tout le personnel du CDER en particulier Mr A.DALI pour sa disponibilité, sa patience et ses conseils.*

*Je tiens à remercier en particulier mes chers parents et ma famille qui m'ont soutenu et encouragé tout au long de mes années d'études.*

*Je tiens à exprimer toute ma gratitude et mes remerciements à tous les enseignants du département d'Electrotechnique pour avoir contribué à notre formation en particulier notre chef de département PR.R.IBTIOUEN, PR.A.MEKHALDI et PR.M.TEGUAR.*

*Je remercie vivement Monsieur N. HAKIKI pour la documentation utile et le support qu'il nous a fourni pendant notre cursus à l'Ecole Nationale Polytechnique.*

*Je remercie les membres du jury PR.M.O.MAHMOUDI, PR.R.TAHMI et DR.T.ZEBBADJI de me faire l'honneur d'évaluer le présent travail.*

*Ma reconnaissance va à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.*

**ملخص**

يهدف هذا العمل إلى نمذجة والتحكم في الآلة الغير متزامنة مزدوجة التغذية (MADA) المدمجة في نظام تحويل طاقة الرياح. يرتبط جزؤها الثابت بالشبكة الكهربائية في حين تتم تغذية جزئها الدوار بواسطة محول ذو مستويين مراقب . (CCM)

يسمح تطبيق تقنية التحكم المباشر في الإستطاعة (DPC) على المحول بزيادة الطاقة المستخرجة من الريح إلى أقصى حد وتحسين جودة الطاقة المنتجة من طرف هذا النظام.

كلمات مفتاحية : طاقة الرياح ،آلة غير متزامنة مزدوجة التغذية، DPC-SVM ،DPC ،MADA، MPPT

**Abstract :**

The present work concerns the modeling, control of double fed induction generator (DFIG) integrated in a conversion system of wind energy whose stator is connected to the network, and a two-level inverter powers the rotor.

The application of the Direct Power Control (DPC) on the inverter allowed maximizing the power extracted from the wind and improving the quality of the energy produced by the wind system.

Key-words: Wind energy, DFIG, MPTT, DPC, DPC-SVM

**Résumé :**

Le présent travail concerne la modélisation et la commande de la machine asynchrone (MADA) intégrée dans un système de conversion d'énergie éolienne dont le stator est connecté au réseau et le rotor est alimenté par un convertisseur (CCM) à deux niveaux commandé.

L'application de la technique DPC sur le CCM a permis maximiser la puissance extraite du vent mais aussi d'améliorer la qualité de l'énergie fournie par le système éolien.

Mots clés : Energie éolienne, MADA, MPTT, DPC, DPC-SVM

## Table des matières

Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des sigles	
Liste des symboles	
Introduction générale.....	16
Chapitre I État de l’art .....	19
Introduction.....	19
I.1. Les sources d’énergie renouvelable .....	19
I.1.1. Energie solaire .....	20
I.1.2. Energie éolienne.....	20
I.1.3. Energie Hydraulique .....	20
I.1.4. Energie marine .....	21
I.1.5. Energie Biomasse .....	21
I.1.6. Energie géothermique.....	21
I.2. Energie Eolienne.....	21
I.2.1. Historique et développement de l’éolienne .....	22
I.2.2. L’énergie éolienne dans le monde .....	23
I.2.3. L’énergie éolienne en Algérie.....	24
I.2.4. Avantages et inconvénients de l’énergie éolienne .....	27
I.2.4.1. Avantages .....	27
I.2.4.2. Inconvénients .....	28
I.3. L’aérogénérateur.....	29
I.3.1. Différents types d’aérogénérateurs .....	30
I.3.1.1. Eoliennes à axe vertical « VAWT » .....	30
I.3.1.2. Eoliennes à axe horizontal (HAWT) .....	32
I.3.2. Principaux constituants d’une éolienne à axe horizontal .....	33
I.3.3. Configuration électrique d’un aérogénérateur .....	34
I.3.3.1. Eolienne à vitesse fixe .....	34
I.3.3.2. Eolienne à vitesse variable .....	35
I.3.3.3. Synthèse des différentes éoliennes.....	37
Conclusion .....	39
Chapitre II Modélisation d’un système de conversion éolien basé sur la MADA .....	41
Introduction.....	41
II.1. Description du système .....	41
II.2. Description et modes de fonctionnement de la MADA .....	42

---

II.2.1. Description de la MADA .....	42
II.2.2. Modes de fonctionnement de la MADA.....	43
II.2.2.1. Fonctionnement en moteur hypo-synchrone .....	43
II.2.2.2. Fonctionnement en moteur hyper-synchrone.....	43
II.2.2.3. Fonctionnement en génératrice hypo-synchrone.....	44
II.2.2.4. Fonctionnement en génératrice hyper-synchrone .....	44
II.2.3. Configuration du mode de fonctionnement de la MADA .....	45
II.2.3.1. Fonctionnement en moteur avec un seul convertisseur.....	45
II.2.3.2. Fonctionnement en moteur avec deux convertisseurs.....	45
II.2.3.3. Fonctionnement en génératrice avec un seul convertisseur .....	46
II.2.4. Avantages et inconvénients de la MADA .....	47
II.2.4.1. Avantages .....	47
II.2.4.2. Inconvénients .....	48
II.3. Modélisation de la turbine éolienne .....	48
II.3.1. Hypothèses simplificatrices.....	48
II.3.2. Modèle aérodynamique des pales .....	49
II.3.3. Modèle de la partie mécanique .....	52
II.3.4. Stratégie de maximisation de puissance "MPPT" .....	55
II.3.4.1. Les Différents zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable.....	55
II.3.4.2. Stratégie de maximisation de puissance "MPPT" .....	56
II.3.5 Profil du vent .....	57
II.4. Modèle de la MADA .....	58
II.4.1. Hypothèses simplificatrices :.....	58
II.4.2. Modèle de la MADA dans le repère triphasé : .....	58
II.4.2.1. Equations électriques de la MADA.....	59
II.4.2.2. Equation mécanique de la MADA :.....	60
II.4.3. Modélisation de la MADA dans le repère de Park dq : .....	61
II.4.3.1. Transformé de Park : .....	61
II.4.3.2. Application de transformation de Park à la MADA : .....	62
II.5. Modélisation du convertisseur côté machine (CCM) .....	67
II.5.1. Modélisation de l'onduleur de tension .....	67
Conclusion .....	68
Chapitre III Commande directe de puissance (DPC) de la MADA .....	70
Introduction.....	70
III.1. Histoire de la DPC.....	70
III.2. THEORIE DE LA COMMANDE DIRECTE DE PUISSANCE .....	70

---

III.3. PRINCIPE GENERAL DE LA DPC CLASSIQUE (DPC-C) .....	71
III.4. DPC-C de la MADA.....	72
III.4.1. Estimation de la puissance active et réactive .....	72
III.4.2. Secteurs du Flux rotorique .....	73
III.4.3. Choix des comparateurs à hystérésis .....	74
III.4.4. Elaboration de la table de commutation.....	75
III.5. Résultats de simulation .....	76
Conclusion .....	79
Chapitre IV Amélioration de la DPC par la modulation vectorielle (SVM) .....	81
Introduction.....	81
IV.1. Principe de la MLI vectorielle SVM.....	81
IV.2. Les étapes de la réalisation d'une MLI vectorielle (SVM) .....	84
IV.2.1. Détermination des vecteurs tensions de références .....	84
IV.2.2. Détermination des secteurs.....	85
IV.2.3. Calcul des temps de commutation.....	85
IV.2.4. Génération des séries d'impulsions $S_a$ , $S_b$ et $S_c$ .....	87
IV.3 DPC-SVM de la MADA .....	87
IV.4. Résultats de simulation .....	91
Conclusion .....	95
Conclusion générale .....	96
Bibliographie.....	98
Annexes .....	99

## Liste des tableaux

Tableau I.1 - Comparatif entre le Générateur à vitesse fixe et à vitesse variable [2] .....	38
Tableau I.2 - Avantages et inconvénients des différentes éoliennes [2] .....	38
Tableau III.1 - Table de sélection des vecteurs optimaux [3] .....	75
Tableau IV.1 - Calcul des Tensions rotoriques [3] .....	84
Tableau IV.2 - Identification du secteur [3] .....	85
Tableau IV.3 - Signaux de commande des interrupteurs du CCM [3] .....	87

## Liste des figures

Figure I.1 - Sources d'énergie renouvelable [13] .....	20
Figure I.2 - Energie éolienne mondiale installée pour chaque année [11] .....	24
Figure I.3 - Energie éolienne mondiale globale installée [11] .....	24
Figure I.4 - La ferme éolienne de 10MW à Kabertène (Adrar) [3] .....	25
Figure I.5 - Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol [8].....	26
Figure I.6 - Conversion de l'énergie cinétique du vent [2] .....	29
Figure I.7 - Évolution de la taille et de la puissance des éoliennes [12].....	30
Figure I.8 - Éolienne de Savonius [3] .....	31
Figure I.9 - Éolienne de Darrieus [3].....	31
Figure I.10 - Exemples des éoliennes horizontales [3] .....	32
Figure I.11 - Composants d'une turbine éolienne [2] .....	33
Figure I.12 - Eolienne à vitesse fixe utilisant une génératrice asynchrone [2].....	35
Figure I.13 - Eolienne à vitesse variable utilisant une génératrice synchrone [2].....	36
Figure I.14 - Eolienne à vitesse variable utilisant une génératrice asynchrone [2].....	37
Figure I.15 - Eolienne à vitesse variable utilisant une MADA [2] .....	37
Figure II.1 - Système de conversion éolienne à base de la MADA [3].....	42
Figure II.2 - Rotor d'une MADA [2].....	43
Figure II.3 - Fonctionnement de la MADA en moteur hypo-synchrone [2].....	43
Figure II.4 - Fonctionnement de la MADA en moteur hyper-synchrone [2] .....	44
Figure II.5 - Fonctionnement de la MADA en génératrice hypo-synchrone [2] .....	44
Figure II.6 - Fonctionnement de la MADA en génératrice hyper-synchrone [2].....	45
Figure II.7 - Fonctionnement en moteur alimenté par un seul convertisseur [2].....	45
Figure II.8 - Fonctionnement d'une MADA en moteur alimenté par deux convertisseurs [2] .....	46
Figure II.9 - Fonctionnement d'une MADA en génératrice alimentée par un seul convertisseur [2] ...	46
Figure II.10 - Système de conversion d'énergie éolienne [2] .....	48
Figure II.11 - Coefficient de puissance $C_p$ en fonction de $\lambda$ pour différents $\beta$ .....	51
Figure II.12 - Puissance aérodynamique générée par la turbine éolienne.....	52
Figure II.13 - Modèle mécanique de la turbine éolienne [2].....	53
Figure II.14 - Schéma bloc du modèle de la turbine [3] .....	54
Figure II.15 - Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable [2] .....	55
Figure II.16 - Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique .....	57
Figure II.17 - Profil du vent .....	57
Figure II.18 - Représentation de la MADA dans le repère triphasé [1] .....	58
Figure II.19 - Passage du repère triphasé au repère biphasé dq [1] .....	61
Figure II.20 - Schéma d'un onduleur de tension triphasé alimentant le rotor de la MADA [2] .....	67
Figure III.1 - Configuration de la DPC-C de la MADA [3].....	72
Figure III.2 - Les six secteurs du flux rotorique.....	73
Figure III.3 - Comparateurs à hystérésis : (a) puissance active, (b) puissance réactive [3].....	74
Figure III.4 - Profil du vent utilisé (m/s).....	76
Figure III.5 - Puissance active $P_s$ (W) .....	76
Figure III.6 - Puissance réactive $Q_s$ (Var) .....	77
Figure III.7 - Couple $C_{em}$ (N.m) .....	77
Figure III.8 - Vitesse de la machine $W_{mec}$ (rd/s).....	77

---

Figure III.9 - Courant statorique $I_s$ (A) .....	78
Figure III.10 - Courant rotorique $I_r$ (A).....	78
Figure IV.1 - États des interrupteurs pour chaque vecteur de tension [3].....	81
Figure IV.2 - Représentation des vecteurs de tension dans le repère $(\alpha-\beta)$ [3] .....	82
Figure IV.3 - Décomposition d'un vecteur de tension de référence $V_r\_ref$ [3].....	83
Figure IV.4 - Séquence d'application des vecteurs sur une période $T_e$ [3] .....	85
Figure IV.5 - Boucle de régulation des courants [1] .....	90
Figure IV. 6- Schéma bloc de la structure de contrôle DPC-SVM appliquée à la MADA [3].....	91
Figure IV.7- Puissance active $P_s$ (W).....	92
Figure IV.8 - Puissance réactive $Q_s$ (Var).....	92
Figure IV.9 - Couple $C_{em}$ (N.m) .....	92
Figure IV.10- Vitesse de la machine $\omega_{mec}$ (rd/s) .....	93
Figure IV.11 - Courant statorique $I_s$ (A).....	94
Figure IV.12 - Courant rotorique $I_r$ (A) .....	94

Liste des sigles

MADA : Machine Asynchrone à Double Alimentation

GADA : Génératrice Asynchrone à Double Alimentation

DFIM : Double Fed Induction Machine

DFIG : Double Fed Induction Generator

MPPT : Maximum Power Point Tracking

VAWT : Vertical Axis Wind Turbine

HAWT : Horizontal Axis Wind Turbine

DTC : Direct Torque Control

DPC : Direct Power Control

DCP-SVM : Direct Power Control With Space Vector Modulation

MLI : Modulation à Large Impulsion

SVM : Space Vector Modulation

THD : Total Harmonic Distortion

CCR : Convertisseur côté réseau

CCM : Convertisseur côté machine

GWEC : Global Wind Energie Council

EWEA : European Wind Energie Association

WWEA : World Wind Energie Association

CDER : Centre de développement des énergies renouvelables

HYPER : Hypersynchronisme

HYPO : Hyposynchronisme

PI : Proportionnel intégrateur

## Liste des symboles

- **Symboles spécifiques à la turbine :**

$V$  (m/s) Vitesse du vent,

$m$  (Kg) Masse de l'air,

$P_t$  (W) Puissance aérodynamique de la turbine,

$P_g$  (W) Puissance mécanique de la génératrice,

$P_v$  (W) Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé,

$\rho$  (Kg/m<sup>3</sup>) Masse volumique de l'air en température ambiante (15°C),

$S$  (m<sup>2</sup>) Surface circulaire balayée par la turbine  $S = \pi R^2$ ,

$C_P$  (–) Coefficient de puissance,

$C_{P-max}$  (–) Coefficient de puissance relatif à l'extraction maximale de puissance,

$C_C$  (–) Coefficient du couple,

$C_{C-max}$  (–) Coefficient du couple relatif à l'extraction maximale de puissance,

$\Omega_t$  (rad/s) Vitesse mécanique de la turbine,

$\Omega_g$  (rad/s) Vitesse mécanique de la génératrice,

$R$  (m) Longueur d'une pale (Rayon de l'éolienne),

$G$  (–) Gain du multiplicateur,

$\lambda$  (–) Vitesse relative ou Ratio de vitesse,

$\lambda_{opt}$  (–) Vitesse relative optimale,

$\beta$  (deg) Angle de calage des pales,

$\alpha$  (deg) Angle d'incidence des pales,

$C_g$  (N.m) Couple mécanique sur l'arbre de la génératrice,

$C_g^*$  (N.m) Couple mécanique de référence,

$C_t$  (N.m) Couple mécanique disponible sur l'arbre lent de la turbine,

$C_f$  (N.m) Couple de frottement visqueux,

$J_t$  (Kg.m<sup>2</sup>) Moment d'inertie de la turbine,

$J_g$  (Kg.m<sup>2</sup>) Moment d'inertie de la génératrice,

$J$  (Kg.m<sup>2</sup>) Moment d'inertie totale de l'ensemble « turbine + génératrice ».

- **Paramètres de modélisation de la MADA :**

$R_s$  ( $\Omega$ ) Résistance statorique par phase,

$R_r$  ( $\Omega$ ) Résistance rotorique par phase,

$L_s$  (H) Inductance cyclique statorique par phase,

$L_r$  (H) Inductance cyclique rotorique par phase,

$M_{sr}$  (H) Inductance cyclique mutuelle (entre stator et rotor), inductance magnétisante,

$L_s$  (H) Inductance propre d'une phase statorique,

$L_r$  (H) Inductance propre d'une phase rotorique,

$m_s$  (H) Inductance mutuelle entre deux phases statoriques,

$m_r$  (H) Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques,

$M$  (H) Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre phase statorique et autre rotorique,

$P$  (–) Nombre de paires de pôles,

$f_v$  (N.m.s/rd) Coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice,

$C_{em}$  (N.m) Couple électromagnétique de la génératrice.

- **Repères :**

( $s_a, s_b, s_c$ ) Axes magnétiques liés aux enroulements triphasés statorique,

( $r_a, r_b, r_c$ ) Axes magnétiques liés aux enroulements triphasés rotoriques,

( $d, q$ ) 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).

- **Grandeurs statoriques :**

$V_s$  (a, b, c) (V) Tensions instantanées statoriques triphasées,

$V_s$  d, q (V) Tensions statoriques diphasées dans le repère (d, q),

$V_s$   $\alpha, \beta$  (V) Tensions statoriques diphasées dans le repère ( $\alpha, \beta$ ),

$[V_s] = [V_{s_a}, V_{s_b}, V_{s_c}]^T$  (V) Vecteur des tensions instantanés des phases a, b et c statoriques,

$V_s$  (V) Module du vecteur de tension statorique,

$i_s$  (a, b, c) (A) Courants instantanés statoriques triphasées,

$i_s$  (d, q) (A) Courants statoriques diphasés dans le repère (d, q),

$i_s$  ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) (A) Courants statoriques diphasés dans le repère ( $\alpha$ ,  $\beta$ ),

$[i_s] = [i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}]^T$  (A) Vecteur des courants instantanés des phases a, b et c statoriques,

$P_s$  (W) Puissance active statorique,

$Q_s$  (VAr) Puissance réactive statorique,

$P_s^*$  :(W) Consigne de la puissance active statorique,

$Q_s^*$  :(VAr) Consigne de la puissance réactive statorique,

$\phi_s$  (a, b, c) (Wb) Flux instantané magnétiques au stator,

$\phi_s$  ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) (Wb) Flux statoriques diphasés dans le repère ( $\alpha$ ,  $\beta$ ),

$\phi_s$  (d, q) (Wb) Flux statoriques diphasés dans le repère tournant (d, q),

$[\phi_s] = [\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}]$  (Wb) Vecteur des flux instantanés des phases a, b et c statoriques,

$\phi_s$  (Wb) Module du vecteur de flux statorique.

- **Grandeurs rotoriques**

$V_r$  (a, b, c) (V) Tensions instantanées statoriques triphasées,

$V_r$  (d, q) (V) Tensions statoriques diphasées dans le repère (d, q),

$V_r$  ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) (V) Tensions statoriques diphasées dans le repère ( $\alpha$ ,  $\beta$ ),

$[V_r] = [V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}]^T$  (V) Vecteur des tensions instantanés des phases a, b et c rotoriques,

$V_r$  (V) Module du vecteur de tension rotorique,

$i_r$  (a, b, c) (A) Courants instantanés statoriques triphasées,

$i_r$  (d, q) (A) Courants statoriques diphasés dans le repère (d, q),

$i_r$  ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) (A) Courants statoriques diphasés dans le repère ( $\alpha$ ,  $\beta$ ),

$[i_r] = [i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}]^T$  (A) Vecteur des courants instantanés des phases a, b et c rotoriques,

$P_r$  (W) Puissance active rotorique,

$Q_r$  (VAr) Puissance réactive rotorique,

$\phi_r$  (a, b, c) (Wb) Vecteur de flux magnétiques au rotor,

$\phi_r$  ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) (Wb) Flux rotoriques diphasés dans le repère ( $\alpha$ ,  $\beta$ ),

$\phi_r$  (d, q) (Wb) Flux rotoriques diphasés dans le repère tournant (d, q),

$[\phi_r] = [\phi_{ra}, \phi_{rb}, \phi_{rc}]$  (Wb) Vecteur des flux instantanés des phases a, b et c rotoriques,  
 $\phi_r$  (Wb) Module du vecteur de flux rotorique.

- **Grandeurs mécaniques :**

$\omega$  (rad/s) Pulsation électrique correspondante à la vitesse de rotation,

$\omega_s$  (rad/s) Pulsation électrique des grandeurs statoriques (champ tournant),

$\omega_r$  (rad/s) Pulsation électrique des grandeurs rotoriques (Pulsation de glissement),

$g$  (–) Glissement de la vitesse de rotation,

$f_s$  (Hz) Fréquence électrique des grandeurs statoriques,

$f_r$  (Hz) Fréquence électrique des grandeurs rotoriques,

- **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  $X_{r\ a,b,c} \rightarrow X_{r\ \alpha,\beta}$ ,

## Introduction générale

De nos jours, l'électricité est devenue un élément primordial pour l'humanité et elle est présente dans toutes les activités de la vie quotidienne. En effet, elle constitue un facteur essentiel dans le développement économique, social et industriel et est considérée comme un indice de mesure du développement d'un pays.

Toutefois, face à la demande croissante, l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et aux problèmes environnementaux causés par l'émission des gaz à effet de serre lors de l'exploitation de ces ressources, les gisements des ressources énergétiques traditionnelles d'origines principalement fossiles ne peuvent être exploités que pour quelques décennies, ce qui laisse présager d'une situation de pénurie énergétique au niveau mondial de façon imminente.

A cet effet, les sources d'énergie renouvelables s'avèrent être une opportunité en droite ligne avec une stratégie globale de développement durable. Elles aident à réduire la dépendance des importations/exportations d'énergie, assurant ainsi une sécurité d'approvisionnement durable.

L'orientation vers l'énergie éolienne prend ses racines de deux facteurs. En premier lieu, la protection de l'environnement. Et en deuxième lieu, la rentabilité et la compétitivité de cette énergie face aux ressources fossiles grâce au développement des technologies de sa conversion.

Dans cette optique, les générateurs éoliens à vitesse variable utilisent souvent la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) comme génératrice en raison de ses avantages notamment la possibilité de produire le maximum de puissance possible sur une large plage de variation de la vitesse ( $\pm 30\%$  autour de la vitesse de synchronisme). En effet, le schéma de raccordement le plus typique de cette machine consiste à raccorder le stator directement au réseau, alors que le rotor est alimenté à travers deux convertisseurs statiques en mode back-to-back (un côté rotor CCM et l'autre côté réseau CCR).

De plus, les convertisseurs statiques utilisés dans cette configuration pour le contrôle de la machine peuvent être dimensionnés pour transiter seulement une fraction de la puissance totale identifiée dans ce cas par la puissance de glissement.

Ce choix permet de minimiser les pertes par commutation, de réduire le coût de production du convertisseur ainsi que la taille des filtres passifs et par conséquent les pertes additionnelles.

Le présent travail a comme objectif de concevoir une stratégie de commande à appliquer sur le Convertisseur Côté Machine (CCM) qui alimente le rotor de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) intégrée dans un système de conversion éolien.

Ceci va nous permettre de fournir une puissance constante au réseau avec un bon facteur de puissance. De plus, il a d'autres avantages en termes de réduction des ondulations des puissances et du couple tout en diminuant le taux harmonique des courants générés par la MADA.

Afin d'atteindre l'objectif décrit ci-dessus, ce mémoire s'articule sur quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons abordé les énergies renouvelables en général puis présenté un état de l'art sur l'énergie éolienne.

Nous avons également traité l'aérogénérateur, ses composantes et ses types, notamment, l'éolienne à axe vertical et à axe horizontal ainsi que sa configuration électrique et son mode de fonctionnement.

Enfin, nous avons présenté une synthèse des différentes éoliennes.

Le second chapitre nous a permis de modéliser un système éolien à vitesse variable basé sur la MADA à travers les étapes suivantes :

- L'intérêt économique du faible dimensionnement des convertisseurs ;
- La modélisation complète de la chaîne de conversion éolienne basée sur la MADA ainsi que le convertisseur côté machine (CCM).

Le troisième chapitre, nous a permis de présenter les résultats de simulation de la commande DPC-C appliquée sur le convertisseur <<CCM>> à deux niveaux qui alimente le rotor de la MADA intégrée dans un système éolien.

Néanmoins, cette technique présente des harmoniques de courant statorique injecté dans le réseau (THD élevé) en raison de la fréquence de commutation variable produite par les comparateurs à hystérésis.

Pour remédier aux inconvénients de la technique de contrôle classique DPC-C : une autre technique de commande DPC-SVM est abordée dans le dernier chapitre.

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation de la technique de commande DPC-SVM appliquée sur le convertisseur « CCM » qui alimente le rotor de la MADA. Ces derniers démontrent que la méthode appliquée constitue une amélioration par rapport à la méthode DPC-C.

Ainsi, l'utilisation de la modulation vectorielle nous a permis d'obtenir une fréquence de commutation fixe et de minimiser les pulsations des puissances et les harmoniques des courants.

*Chapitre I :*  
*État de l'art*

## Chapitre I État de l'art

### Introduction

De nos jours, l'électricité est devenue un élément primordial pour l'humanité et elle est présente dans toutes les activités de la vie quotidienne. En effet elle constitue un facteur essentiel dans le développement économique, social et industriel et est considérée comme un indice de mesure de développement d'un pays.

Toutefois, face à la demande croissante, l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et aux problèmes environnementaux causés par l'émission des gaz à effet de serre lors de l'exploitation de ces ressources, les gisements des ressources énergétiques traditionnelles d'origines principalement fossiles ne peuvent être exploités que pour quelques décennies, ce qui laisse présager d'une situation de pénurie énergétique au niveau mondial de façon imminente

A cet effet, les sources d'énergie renouvelables s'avèrent être une opportunité en droite ligne avec une stratégie globale de développement durable. Elles aident à réduire la dépendance des importations/exportation d'énergie, assurant ainsi une sécurité d'approvisionnement durable.

#### I.1. Les sources d'énergie renouvelable

Une énergie est dite renouvelable lorsqu'elle est produite par une source que la nature renouvelle en permanence, contrairement à une énergie dépendant de sources qui s'épuisent. [13]

Surnommées « énergies propres » ou « énergies vertes », leur exploitation engendre très peu de déchets et d'émissions polluantes.

Les énergies renouvelables sont très diverses mais elles proviennent toutes de deux sources naturelles principales :

- le Soleil : il émet des rayonnements transformables en électricité ou en chaleur, il génère des zones de températures et de pression inégales à l'origine des vents, il engendre le cycle de l'eau, il permet la croissance des plantes et la génération de la biomasse ;
- la Terre, dont la chaleur interne peut être récupérée à la surface.



Figure I.1 - Sources d'énergie renouvelable [13]

### I.1.1. Energie solaire

Elle est produite sous deux formes : le solaire photovoltaïque qui transforme le rayonnement lumineux du soleil en électricité grâce à des panneaux formés de cellules de semi-conducteurs et le solaire thermique qui capte la chaleur du soleil, qu'on utilise comme telle ou bien qu'on transforme en énergie mécanique, puis en électricité. [13]

### I.1.2. Energie éolienne

Elle convertit l'énergie du vent en énergie mécanique. La ressource éolienne vient du déplacement des masses d'air. Le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres créent une différence de pression et ainsi le déplacement des masses d'air. Le vent ainsi créé permet de faire tourner des pales d'une éolienne qui entraînent une génératrice qui la convertit en électricité. [5]

### I.1.3. Energie Hydraulique

Elle exploite les mouvements de l'eau actionnés par le Soleil et la gravité à travers le cycle de l'eau, les marées et les courants marins.

Qu'elles utilisent les chutes d'eau naturelles (cascades) ou artificielles (barrages hydroélectriques) : centrales de haute ou moyenne chute, le débit des cours d'eau ou les courants marins (marée, circulation thermo-haline, etc.) : Centrales au fil de l'eau, les centrales hydrauliques produisent de l'énergie mécanique convertie la plupart du temps en électricité (hydroélectricité). Elle est la plus importante source d'énergie renouvelable. [9]

#### I.1.4. Energie marine

Les énergies marines dépendent des ressources naturelles des eaux des mers et des océans. Elles permettent de produire de l'électricité grâce aux flux naturels d'énergie des vagues, des courants et des marées, des différences de température des océans et de certaines caractéristiques du couple eau salée/eau douce (énergie osmotique). [13]

#### I.1.5. Energie Biomasse

L'énergie issue de la biomasse est une source d'énergie renouvelable qui dépend du cycle de la matière vivante végétale et animale.

L'énergie biomasse est la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme depuis la découverte du feu à la préhistoire. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces matières (bois, végétaux, déchets agricoles, ordures ménagères organiques) ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, dans des centrales biomasses. [9]

#### I.1.6. Energie géothermique

La géothermie utilise la chaleur des aquifères du sous-sol, voire des roches sèches, captée à plus ou moins grande profondeur, pour alimenter des quartiers urbains, des bâtiments ou des usines, ou encore produire de l'électricité via des centrales. Certains pays dont les conditions géologiques sont favorables l'utilisent de façon massive, comme l'Islande ou les Philippines, deux pays volcaniques. La chaleur d'autres sources peut aussi être captée et utilisée dans des réseaux ou des processus industriels. [13]

### I.2. Energie Eolienne

L'énergie éolienne est employée pendant longtemps dans les fermes pour rectifier les grains ou l'eau de pompe sous forme de moulin de vent et dans les bateaux à voile. Le principe est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Aujourd'hui, ce principe est appliqué à l'énergie éolienne dans le système d'alimentation, mais on la transforme en énergie électrique par l'emploi d'aérogénérateurs. C'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif.

Le nouvel intérêt porté à l'énergie éolienne depuis la moitié des années 70 résulte de deux préoccupations : d'une part, la protection de l'environnement et l'économie des combustibles fossiles qui en résulte. D'autre part, l'évolution des technologies rend la conversion de cette énergie de plus en plus rentable et donc son utilisation devient économiquement compétitive par rapport aux sources traditionnelles de même puissance.

Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores. [3] [5]

### 1.2.1. Historique et développement de l'éolienne

Le vent causé par le mouvement de l'air contient une grande quantité d'énergie. L'utilisation de cette énergie pour effectuer un travail est une pratique aussi vieille que l'histoire.

Des moulins à vent étaient utilisés non seulement pour moudre des grains mais aussi pour le pompage et le transport d'eau.

C'est le physicien et mathématicien Lord Kelvin qui eut le premier la brillante idée de coupler une génératrice électrique à un moulin à vent. Ce premier pas vers les premiers aérogénérateurs modernes remonte à 1802. Mais les premières applications concluantes durent attendre un demi-siècle de plus, lorsque Zénobe Gramme inventa la dynamo. C'est en 1888 que la première éolienne reliée à un système de stockage du courant vit le jour. On doit cette réalisation au chercheur américain Charles Brush. L'idée était là, mais pas encore les performances. Elles ne tardèrent pas à monter en flèche grâce aux travaux du danois Poul LaCour, qui découvrit en 1891 que le nombre de pales ainsi que leur forme ont une très nette influence sur le rendement. Grâce à cette découverte majeure sur l'aérodynamisme et le perfectionnement des générateurs, les éoliennes montèrent sans cesse en puissance.

Des moulins à vent qui produisaient de l'électricité, innovation danoise de 1891, Poul LaCour fut le premier à avoir utilisé les anciens moulins à vent pour produire de l'électricité au 19<sup>ème</sup> siècle. Elles permirent aux habitants des zones rurales de produire leur propre électricité pour faire marcher les ampoules, les outils et, ensuite, les radios. Cependant, dans les années trente du 20<sup>ème</sup> siècle, malgré les services qu'elle avait rendus à la société, les jours de l'énergie éolienne semblaient être comptés. Alors que la demande énergétique augmentait et que les réseaux électriques atteignaient les zones rurales, des millions de petits moulins à vent tombèrent en désuétude et furent remplacés par de grandes centrales brûlant des combustibles fossiles bon marché et abondants.

Il ne fait aucun doute que les moulins à vent ont connu dans le passé, un grand succès. Ils ont fourni à l'homme l'énergie mécanique qui manquait à l'époque, à la réalisation de ses desseins.

Mais avec l'invention de la machine à vapeur, du moteur à explosion et du moteur diesel, le développement de l'électricité, leur exploitation est négligée et souvent abandonnée. L'utilisation du vent semble par conséquent de plus en plus délaissée et son avenir très compromis jusqu'à la crise pétrolière de 1973.

Suite à la panique engendrée par les deux chocs pétroliers 1973 et 1979, qui déboucha sur la recherche d'énergies alternatives et avec la diminution du stock mondial en hydrocarbure et surtout la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante et destructive pour l'environnement, l'énergie éolienne revient au premier plan de l'actualité et connaît un développement galopant. On cherche surtout à l'utiliser pour produire de l'énergie électrique suivant le principe exploité dans toutes les centrales électriques conventionnelles. Ainsi la demande mondiale d'éoliennes connaît une croissance rapide depuis une vingtaine d'années ; la majorité de la demande découle du souci d'aménager des centrales électriques utilisant des combustibles « moins polluants ».

C'est dans ce contexte que l'énergie éolienne est considérablement développée ces dernières années, ainsi la conception des éoliennes s'est orientée vers la conception des prototypes d'éolienne qui dépasse le 1MW. Cette tendance s'est concrétisée avec la conception et l'installation de plusieurs prototypes d'éoliennes à savoir l'E112 d'ENERCON (4.5MW en 2002), la M5000 de REPOWER et MULTIBRID (5MW en 2004) et l'E126 d'ENERCON de 6MW et 7.5MW en 2007 et 2010 respectivement. Ces éoliennes de grande puissance sont destinées principalement aux applications offshore. Des prototypes de 10MW fabriqués par les constructeurs CLIPPER WINDPOWER et WINDTEC sont déjà en cours de développement, alors qu'ils vont être commercialisés dans un futur proche. [3]

### 1.2.2. L'énergie éolienne dans le monde

L'année 2018 a connu une production significative dans l'industrie éolienne mondiale avec 51,3 GW de nouvelles installations d'énergie éolienne et une légère diminution de 4,0% par rapport à 2017.

Depuis 2014, les nouvelles installations ont dépassé 50 GW chaque année malgré les fluctuations sur certains marchés. Les 51,3 GW de nouvelles installations ont permis au total des installations cumulatives d'atteindre 591 GW. En onshore, 46,8 GW ont été installés soit une diminution de 4,3% par rapport à 2017. La Chine et les États-Unis sont restés les plus grands marchés onshore avec 21,2 GW et 7,6 GW de nouvelles capacités respectivement. Le marché Européen onshore a installé 9 GW, soit une diminution de 32% par rapport à 2017.

Les marchés en voie de développement en Afrique, au Moyen-Orient, en Amérique Latine et en Asie du Sud-Est ont installé une puissance combinée de 4,8 GW en 2018 (près de 10% des toutes les nouvelles installations), contre 8% en 2017 où ils ont installés 3,8 GW.

D'après le Global Wind Energy Council (GWEC), le marché onshore atteindra les 50 GW par an et ce jusqu'en 2023. Les marchés matures en Asie, en Europe et en Amérique du Nord garderont des volumes stables. La croissance viendra du développement des marchés de l'énergie éolienne en Afrique, au Moyen Orient, en Amérique Latine et en Asie du Sud-Est.

Le marché offshore mondial est resté stable en 2018 avec 4,5 GW de nouvelles installations, soit les mêmes volumes qu'en 2017. Le total des installations offshore cumulatives a maintenant atteint 23 GW, soit 4 % du total cumulé des installations.

GWEC prévoit une augmentation des installations offshore d'abord en Asie puis en Amérique du Nord, avec des installations dépassant les 6 GW par an dans un avenir proche.

La dynamique du marché a continué de changer en 2018. De nombreuses industries ont révisé leurs stratégies par l'acquisition de nouvelles filiales en domaines connexes et / ou à travers l'expansion des services offerts. Ce qui a permis de développer de nouvelles solutions avec une meilleure maîtrise des coûts et plus de facilité dans l'intégration. [11]

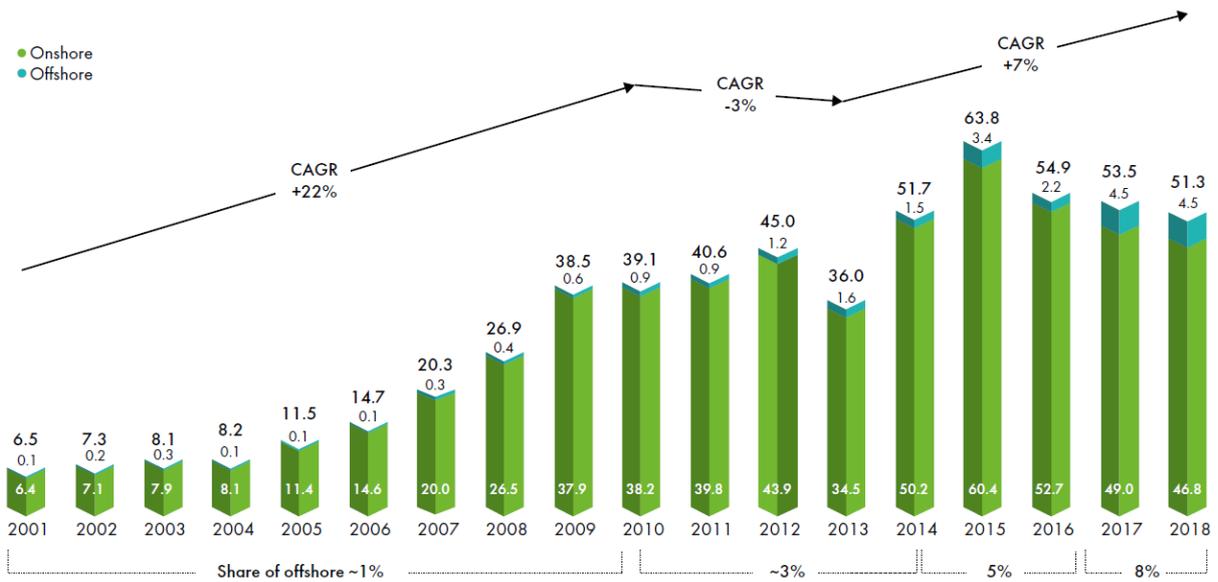


Figure I.2 - Energie éolienne mondiale installée pour chaque année [11]

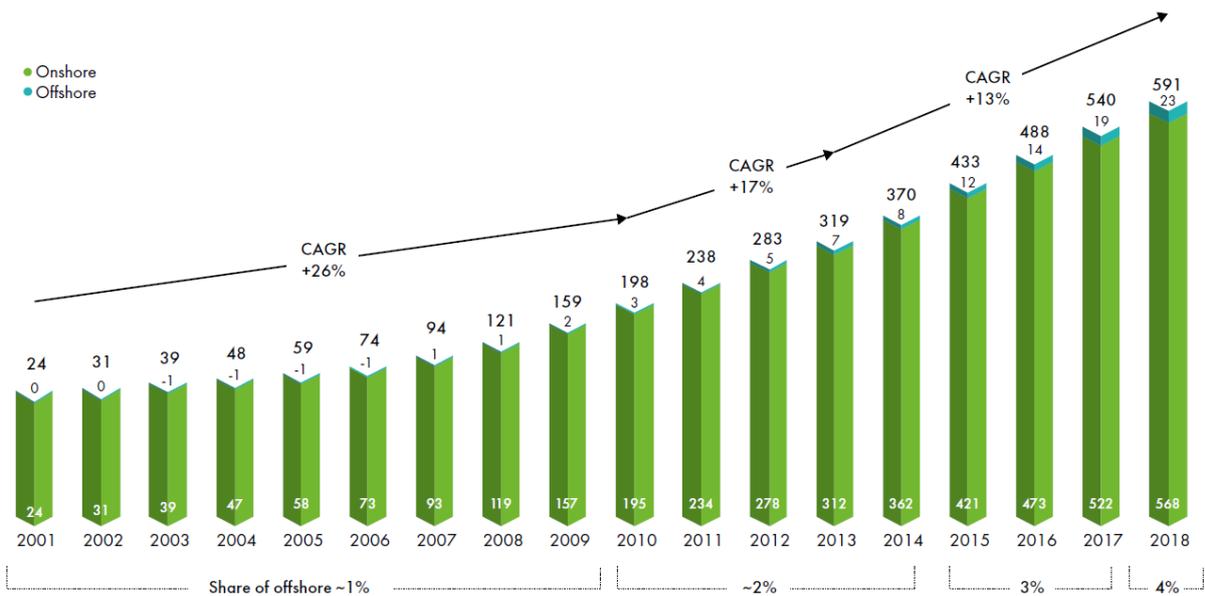


Figure I.3 - Energie éolienne mondiale globale installée [11]

### 1.2.3. L'énergie éolienne en Algérie

En ce qui concerne l'Algérie, l'énergie éolienne n'est pas encore connue à l'heure actuelle le développement qui permettrait leur exploitation, malgré le gisement éolien dont dispose l'Algérie. Ceci constitue un atout majeur qui pourra être valorisé pour faire de l'Algérie un fournisseur en énergie électrique. [3]

Un premier pas a été déjà fait par le groupe Sonelgaz en 13 décembre 2010, qui a confié la réalisation de la première ferme éolienne de Kabertène à Adrar d'une puissance totale de 10MW (figure I.4). Douze éoliennes d'une puissance unitaire de 0.85MW chacune, installées dans cette ferme ont été mises en service le 8 juin 2014.



Figure I.4 - La ferme éolienne de 10MW à Kabertène (Adrar) [3]

Signalons que la ferme éolienne d'Adrar, première du genre à l'échelle nationale, d'une capacité de 10 mégawatts, est implantée sur une superficie de 30 hectares, dans la zone de Kabertène, 72 kilomètres au nord de la wilaya d'Adrar. Elle est constituée de 12 éoliennes de 850kW chacune et d'une puissance cumulée de 10.2MW dont six ont été déjà réceptionnées en juin 2014. Les turbines utilisées dans ce parc sont de type « G52/850/50-60Hz » fournies par le constructeur espagnol GAMESA, équipées par des générateurs asynchrones à double alimentation (GADA). Cette nouvelle centrale de production d'électricité, dont les travaux ont été entamés en 2011, appartient à la phase pilote du programme national des énergies renouvelables, qui consiste en l'installation d'une puissance globale en énergies renouvelables de 22GW à l'horizon 2030.

Dans le cadre de l'intégration nationale, les capacités de réalisation nationales ont été associées à ce projet attribué au consortium algéro-français (CEGELEC). C'est ainsi que deux sociétés du Groupe Sonelgaz, à savoir ETTERKIB et INERGA, ont pris en charge les travaux de génie civil et de montage des installations.

L'implication de ces dernières traduit la vision stratégique de l'Algérie qui vise à développer tant l'intégration nationale que la maîtrise des nouvelles techniques dans le domaine des énergies renouvelables. Le choix de la région de Kabertène, relevant territorialement de la commune de Tsabit, a été fait suite à une étude cartographique sur les grandes régions de vent en Algérie, et à l'issue de laquelle deux régions dont Adrar ont été définies.

Cette wilaya verra également la réalisation de huit nouvelles centrales électriques exploitant des énergies renouvelables, pour une production globale de plus de 270 mégawatts.

Il importe de dire que si Sonelgaz veut développer l'éolien dans certaines régions, notamment au sud du pays, c'est pour alimenter en électricité des villes et des villages enclavés. Ces projets s'inscrivent ainsi dans un vaste plan de développement des régions sahariennes, initié par le gouvernement pour fixer les populations locales et avant tout satisfaire leurs demandes en électricité.

Deux autres fermes éoliennes de 20MW chacune devraient être réalisées, des études seront menées pour détecter les emplacements favorables afin de réaliser d'autres projets sur la période 2016-2030 pour une puissance d'environ 1.7GW.

Etant engagée dans une nouvelle phase d'exploitation des énergies renouvelables, l'Algérie prévoit d'atteindre à l'horizon 2030 près de 40% de la production nationale d'électricité de sources renouvelables. Bien que le choix de l'énergie solaire soit prédominant, l'énergie éolienne représente le deuxième axe de production de ce programme. Avant d'étudier la possibilité d'implanter une ferme éolienne dans une région donnée, il est nécessaire de faire des études du gisement éolien pour une connaissance précise de la météorologie du vent. [3]

Le potentiel éolien en Algérie diffère selon la situation géographique. Ainsi au nord du pays, le potentiel éolien se caractérise par une vitesse moyenne des vents modérée (1 à 4m/s) avec des microclimats autour d'Oran, Annaba, sur les hauts plateaux et à Biskra. Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les hauts plateaux. Au sud, la vitesse moyenne des vents dépasse les 4m/s, plus particulièrement au sud-ouest, avec des vents qui dépassent les 6m/s dans la région d'Adrar. La figure I.5, présente la cartographie des vents en Algérie.

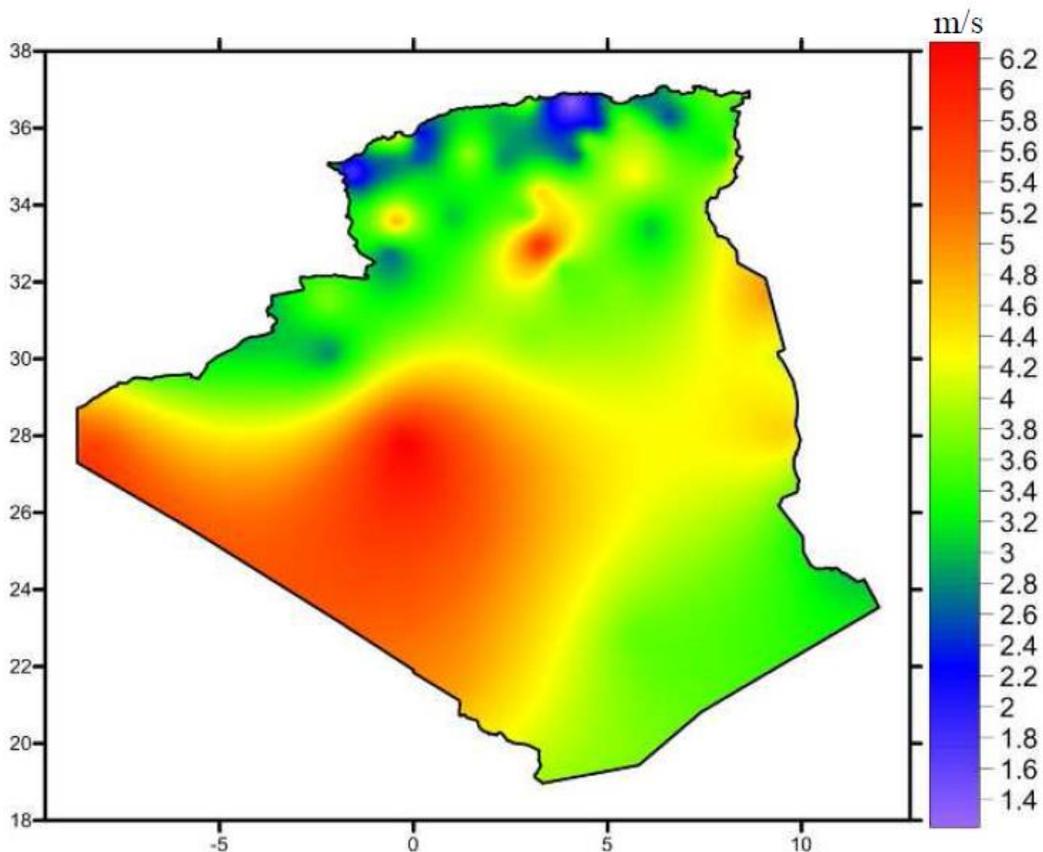


Figure I.5 - Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol [8]

Il est évident que certains pays doivent réagir très vite s'ils veulent remplir leurs obligations de 2020, sur le moyen et long termes, les perspectives de croissance de la filière restent intéressantes.

WWEA estime une capacité globale de plus de 500GW à l'horizon 2016, et environ 1000GW (soit 1TW) sera possible par l'année 2020. [14]. D'autre part, EWEA estime que 12% de l'électricité mondiale sera d'origine éolienne en 2020 et plus de 20% en 2040. [10]

#### 1.2.4. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

##### 1.2.4.1. Avantages

Outre les nombreux avantages qu'elle partage avec les autres sources renouvelables d'énergie, l'exploitation de l'énergie du vent présente une série d'avantages propres [3] :

- ✓ Il s'agit d'une forme d'énergie indéfiniment durable et propre ;
- ✓ Elle ne nécessite aucun carburant ;
- ✓ Elle ne crée pas de gaz à effet de serre (sauf si l'on considère que ce type d'énergie est intermittent et nécessite l'utilisation de centrales thermiques constamment au ralenti afin de réguler les variations imprévisibles de la production éolienne) ;
- ✓ Chaque mégawattheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0.8 à 0.9 tonne les émissions de CO<sub>2</sub> rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique ;
- ✓ Elle ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs car elle est entièrement en métal et plastique ;
- ✓ Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2 % du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations ;
- ✓ Les propriétaires fonciers reçoivent souvent un paiement pour l'utilisation de leur terrain, ce qui augmente leur revenu ainsi que la valeur du terrain, les loyers sont autour de 2000 à 3000€ par an et par éolienne implantée sur leur terrain ;
- ✓ L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple ;
- ✓ Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà ;
- ✓ Les éoliennes permettent au travers de la taxe professionnelle de participer au développement local avec une contribution annuelle de l'ordre de 10 000€ par MW (ce chiffre peut varier en fonction des communautés de communes concernées). Certaines communes rurales peuvent ainsi revivre et assurer des travaux pour lesquels elles s'endettaient jusque-là ;
- ✓ Une éolienne est en grande partie recyclable car se construit en acier. Après son temps de fonctionnement (environ 20 ans) elle est entièrement démontable,

on peut même si besoin retirer la fondation en béton. Elle n'aura laissé aucun produit contaminant autour d'elle et pourra être très facilement remplacée.

#### 1.2.4.2. Inconvénients

L'énergie éolienne a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement [3] :

- ☒ L'inconvénient majeur des énergies renouvelables vient de la non régularité des ressources (à l'exception de l'énergie géothermique). De même, la source d'énergie éolienne (vent) étant stochastique, donc la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante.
- ☒ L'impact visuel : les éoliennes installées sur terre ont tendance à défigurer le paysage, mais après l'apparition des fermes offshore on commence à oublier cette idée reçue.
- ☒ Les riverains déplorent le bruit des éoliennes : le bruit peut être d'origine mécanique ou d'origine aérodynamique, il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée. En effet, selon l'ADEME, le niveau sonore d'une éolienne est de 50dB à 150 mètres et devient imperceptible au-delà de 400 mètres. Dans la plupart des cas, le bruit du vent dans les branches est supérieur à celui engendré par l'éolienne ;
- ☒ La réception des ondes hertziennes peut être perturbée, ce qui provoque une image bruitée sur les récepteurs de télévision. Dans ce cas, il est fréquent que la société implantant les éoliennes finance la construction d'un nouvel émetteur de télévision ;
- ☒ Des flashes très puissants sont émis toutes les cinq secondes en haut des masts éoliens à la demande de l'aviation civile. Plus le parc éolien est dense plus ce risque de collision est grand, des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger. Cependant, ces flashes perturbent la quiétude nocturne de la campagne et sont une pollution lumineuse supplémentaire ;
- ☒ L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que les oiseaux migrateurs s'adaptent aux obstacles et peuvent éviter les parcs éoliens [10]. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les pales des éoliennes. Plusieurs études sur les éoliennes montrent que le nombre d'oiseaux tués par les éoliennes est négligeable par rapport au nombre qui meurt en raison d'autres activités humaines. Par exemple, au Royaume-Uni, où il y a quelques centaines d'éoliennes, il y a environ chaque année un oiseau tué par une éolienne et 10 millions par les voitures.
- ☒ Les parcs éoliens produisent des interférences avec les radars et en particulier avec les radars météorologiques. En effet, les éoliennes peuvent constituer un obstacle à la propagation de l'onde. Selon la proximité et la densité du parc d'éoliennes, ceci peut constituer un blocage majeur à basse altitude donnant une zone d'ombre dans les données. De plus, comme les pales sont en rotation, le radar note leur vitesse de déplacement qui est indifférentiable d'une cible en mouvement comme la pluie. Habituellement, on filtre les échos indésirables de sol par leur vitesse Doppler. Dans le cas d'une précipitation, la vitesse enregistrée sera un mélange entre la vitesse des gouttes et celle des pales ce

qui peut mener à une fausse interprétation des mouvements de l'air. Une étude sur ce possible interférence est donc nécessaire lors de l'examen d'un projet d'éoliennes ;

- ☒ Par son principe de fonctionnement même, une éolienne absorbe l'énergie du vent et le rend turbulent, créant ainsi un effet de sillage jusqu'à 10 diamètres de rotor derrière elle.

### I.3. L'aérogénérateur

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure I.6). [2]

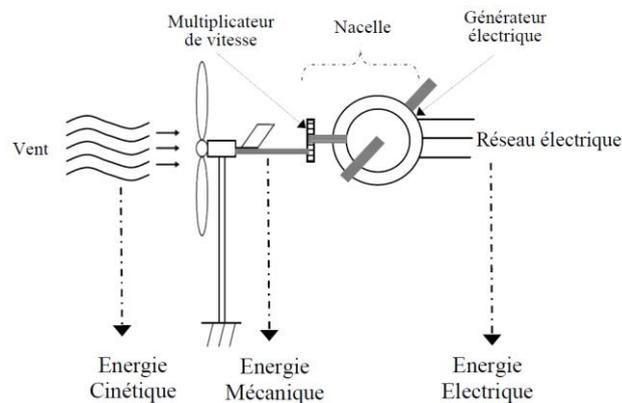


Figure I.6 - Conversion de l'énergie cinétique du vent [2]

Selon leur puissance nominale, les éoliennes sont divisées en trois catégories : [6]

- 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.

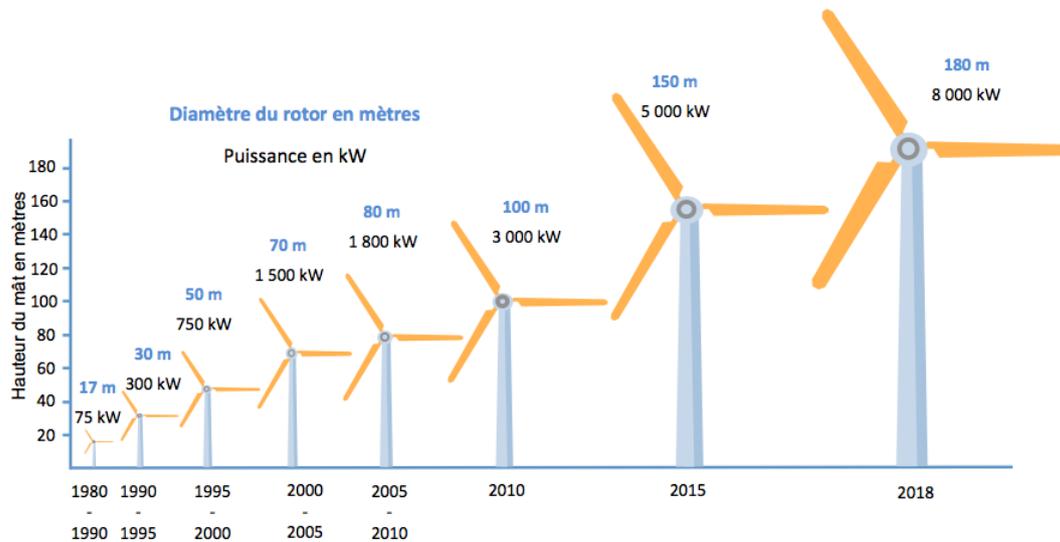


Figure I.7 - Évolution de la taille et de la puissance des éoliennes [12]

### I.3.1. Différents types d'aérogénérateurs

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. En effet, les turbines éoliennes sont classées selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice, en deux types : [4]

- Les éoliennes à axe vertical, VAWT : **Vertical Axis Wind Turbine**.
- Les aérogénérateurs à axe horizontal, HAWT : **Horizontal Axis Wind Turbine**.

#### I.3.1.1. Eoliennes à axe vertical « VAWT »

Les VAWT sont très peu mises en jeu de nos jours car elles sont moins performantes que celles à axe horizontal, elles tournent en moyenne 2 à 8 fois moins vite qu'une tripale classique avec le même rayon. Les VAWT fonctionnent sur le même principe que les roues hydrauliques avec une direction du vent perpendiculaire à l'axe de rotation. La conception verticale offre l'avantage de mettre la machinerie au sol (accès plus facile à la génératrice et au multiplicateur ce qui facilite la maintenance et l'entretien), mais cela impose que l'éolienne fonctionne avec des vents proches du sol, moins forts qu'en hauteurs car freinés par le relief. De par son axe vertical, il y a symétrie de révolution et le vent peut provenir de toutes les directions sans avoir à orienter le rotor. Par contre ce type d'éolienne ne peut pas démarrer automatiquement, il faut la lancer dès l'apparition d'un vent suffisamment fort pour permettre la production. En ce qui concerne leur implantation, elles ont une emprise au sol plus importante que les éoliennes à tour car elles sont haubanées sur de grandes distances. En effet, les câbles des haubans doivent passer au-dessus des pales. Cela représente un inconvénient majeur sur un site agricole par exemple. Les principaux capteurs à axe vertical sont le rotor de Savonius (Inventé par le finlandais Sigurd Savonius en 1924), le rotor de Darrieus (Conçue par l'ingénieur français George Darrieus en 1931). [3]

## I.3.1.1.1. Aérogénérateurs à rotor de Savonius

Ils sont basés sur le principe de la traînée différentielle qui stipule qu'un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure [4] (Figure I.8)

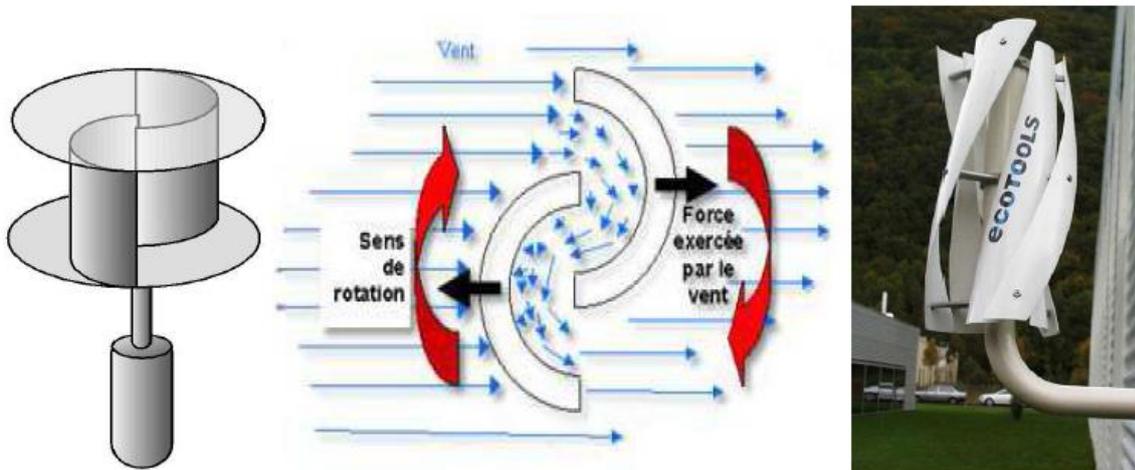


Figure I.8 - Éolienne de Savonius [3]

## I.3.1.1.2. Aérogénérateurs à rotor de Darrieus

Ce type d'aérogénérateur est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction d'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensités variables selon l'orientation de ce profil (Figure I.9) La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif [4].

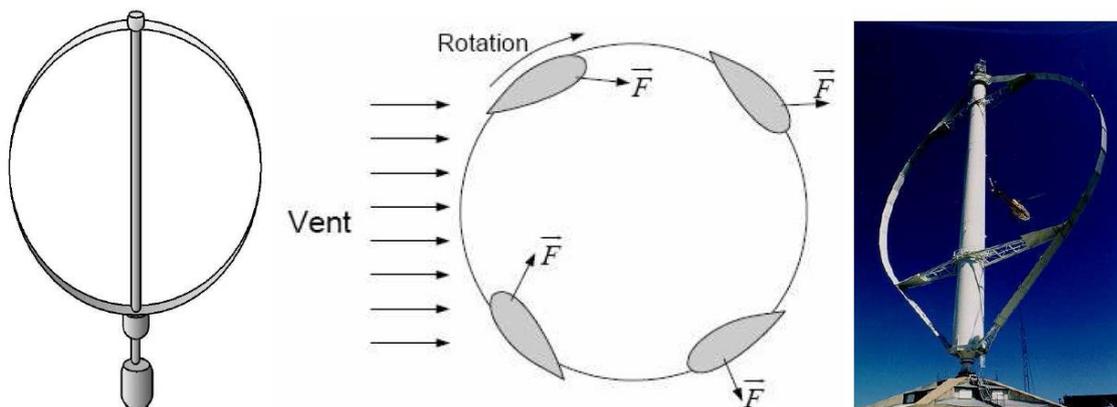


Figure I.9 - Éolienne de Darrieus [3]

## I.3.1.2. Eoliennes à axe horizontal (HAWT)

L'efficacité énergétique et la faible emprise au sol rendent ce type d'éolienne le plus répandu à l'heure actuelle.

Cette structure d'éoliennes est fondée sur la technique ancienne des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées, comme des ailes d'avion, pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien.

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.

Un autre avantage, et non des moindres, est l'emprise au sol qui est très faible par rapport aux éoliennes à axe vertical. Ici, seule la tour occupe de la place au sol et contient généralement tous les systèmes de raccordement. Ainsi il n'est pas nécessaire de rajouter un local électrique et l'emprise au sol est vraiment minimale. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal. [2]



a) Parc offshore



b) Parc onshore

Figure I.10 - Exemples des éoliennes horizontales [3]

### I.3.2. Principaux constituants d'une éolienne à axe horizontal

L'éolienne comporte généralement des éléments mécaniques et électriques qui sont illustrés sur la (Figure I.11). [6]

- **Mat** : il permet de placer le rotor à une hauteur suffisante pour permettre son mouvement (nécessaire pour les éoliennes à axe horizontal) et/ou placer ce rotor à une hauteur lui permettant d'être entraîné par un vent plus fort et régulier qu'au niveau du sol. Le mat abrite généralement une partie des composants électrique et électroniques (modulateur, commande, multiplicateur, générateur, etc.).
- **Rotor** : il est composé de plusieurs pales (en général trois) et du nez de l'éolienne. Le rotor est entraîné par l'énergie du vent, il peut être branché directement ou indirectement à une pompe (cas des éoliennes de pompage) ou plus généralement à un générateur électrique. Le rotor est relié à la nacelle par moyeu.
- **Nacelle** : Elle est montée au sommet du mat, abritant les composants mécaniques et pneumatique.
- **Moyeu** : Le moyeu est une pièce en acier moulé, il supporte les pales et relie le rotor à la nacelle.

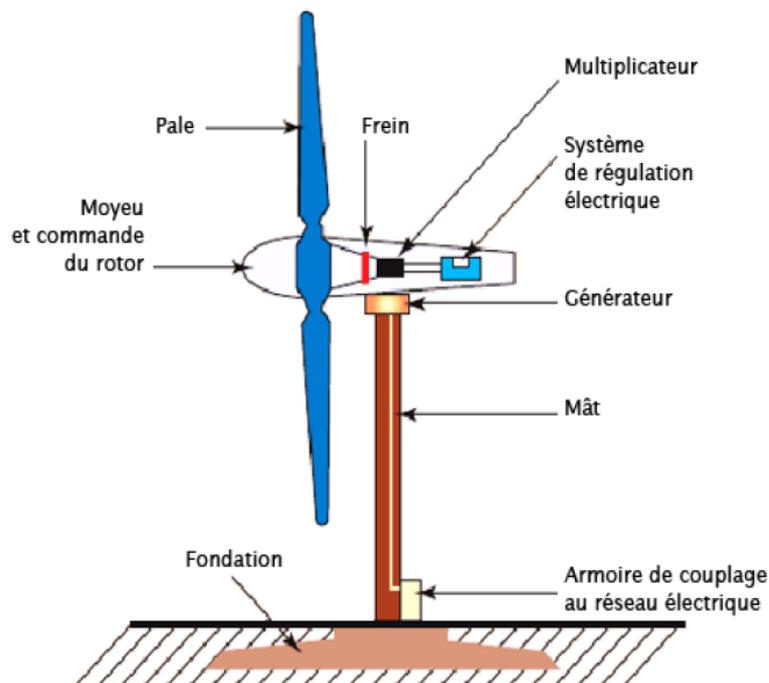


Figure I.11 - Composants d'une turbine éolienne [2]

- **Fondation** : Une fondation solide assurant la résistance de l'ensemble par grand vent et/ou dans des conditions de givrage.
- **Pales** : Les pales sont généralement en fibre de verre, leur diamètre varie en fonction de la puissance désirée (entre 7m et 72m). Elles ont pour rôle de capter l'énergie du vent et de la transférer ensuite au rotor. Le nombre de pales peut varier

suivant les éoliennes. Actuellement, le système tripale est le plus utilisé car il permet de limiter les variations.

- **Génératrice** : La génératrice est l'élément qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Elle peut être Synchrone ou Asynchrone.
- **Multiplicateur** : Le multiplicateur relie l'arbre (primaire) de la turbine à l'arbre (secondaire) de la génératrice électrique. Il permet de transformer une puissance à un couple élevé et à vitesse lente en une puissance à couple faible et vitesse rapide.
- **Arbre de transmission** : Il est composé de deux arbres :
  - ❖ L'arbre primaire : cet arbre transmet l'effort fourni par le rotor au multiplicateur. Il est dit arbre lent, car il tourne à des vitesses comprises entre (20-40 tr/min).
  - ❖ L'arbre secondaire : il entraîne la génératrice à des vitesses élevées (environ 2000rpm) et est muni d'un frein à disque actionné en cas d'urgence.
- **Système de refroidissement** : Il comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur qui encaisse les efforts mécaniques d'un arbre à l'autre.
- **Outils de mesure de vent** : Nous avons deux types : une girouette pour évaluer la direction du vent et un anémomètre pour en mesurer la vitesse.
- **Système d'orientation de la nacelle** : Les grandes éoliennes utilisent des moteurs électriques ou hydrauliques pour faire pivoter la nacelle face au vent.
- **Système de contrôle** : C'est un dispositif qui surveille l'état et le dispositif d'orientation. En cas de défaillance le système stop l'éolienne et le signale à l'ordinateur via un modem téléphonique. Dans le cas des éoliennes produisant de l'électricité, un poste de livraison situé à proximité du parc éolien permet de relier ce parc au réseau électrique pour y injecter l'intégralité de l'énergie produite.

### 1.3.3. Configuration électrique d'un aérogénérateur

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. Le contrôle au niveau de cette dernière permet d'optimiser le captage de l'énergie pour les vents faibles et moyens.

#### 1.3.3.1. Eolienne à vitesse fixe

Dans ce cas, le générateur, utilisant souvent des machines asynchrones, tourne à vitesse fixe ou varie très lentement en jouant sur le glissement de la machine. Deux types de génératrices sont utilisés pour cette configuration, à savoir : Un générateur asynchrone dimensionné pour des faibles puissances correspondant à des vitesses de vent faibles et un générateur dimensionné pour des fortes puissances correspondant à des vitesses de vent plus élevées. Le problème majeur de cette

solution est la complexité du montage qui augmente sa masse. Une autre solution consiste à utiliser un câblage du stator qui peut être modifié afin de faire varier le nombre de pôles. Cette disposition permet également de proposer deux régimes de rotation l'un rapide en journée et l'autre plus lent la nuit permettant de diminuer le bruit. Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique (Figure I.12). Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales (pitch control). [2]

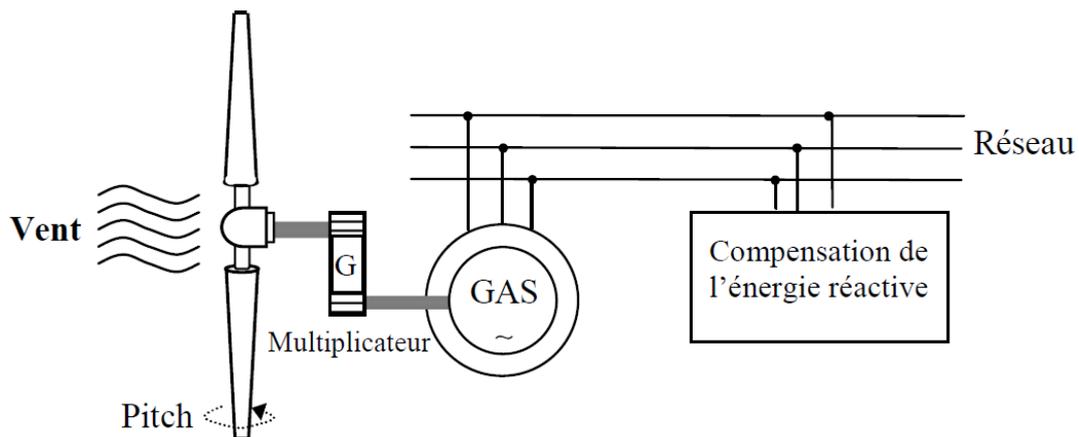


Figure I.12 - Eolienne à vitesse fixe utilisant une génératrice asynchrone [2]

### I.3.3.2. Eolienne à vitesse variable

Les éoliennes à vitesse variable sont actuellement les plus utilisées dans l'industrie. Le terme vitesse variable désigne le fait que la vitesse de la turbine est indépendante de la fréquence du réseau électrique. L'avantage principal d'opérer la turbine à vitesse variable est de maximiser la capture de l'énergie disponible dans le vent.

Trois types de génératrice peuvent être utilisés dans les éoliennes à vitesse variable : la génératrice synchrone, la génératrice asynchrone et la génératrice asynchrone à double alimentation (MADA). [2]

#### I.3.3.2.1. Eolienne à vitesse variable utilisant une génératrice synchrone

Le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Autrement dit, si la génératrice est connectée au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous-multiple de la pulsation des courants statoriques. L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion. Pour ces raisons, on place systématiquement une interface électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation.

L'utilisation de génératrices synchrones dans les applications éoliennes à grande puissance est récente. Deux types de génératrices sont utilisés, à bobinage inducteur ou à aimants permanents (Figure I.13). Les génératrices synchrones à aimants permanents étaient, jusqu'ici, très peu utilisées principalement pour les raisons suivantes : [2]

- Prix relativement élevé des aimants (constitués de terres rares) ;
- Démagnétisation progressive découlant de l'utilisation de ces aimants en présence de champs magnétiques intenses régnant dans le générateur.

Pour une puissance désirée, on a le choix entre une petite génératrice (à faible nombre de pôles) tournant à grande vitesse, ou une génératrice de grande dimension (présentant un grand nombre de pôles) mais tournant plus lentement.

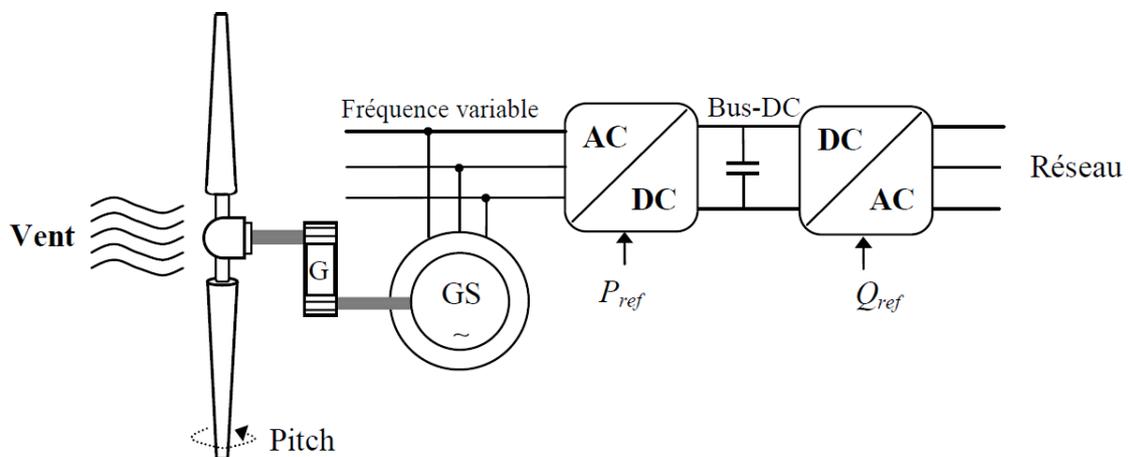


Figure I.13 - Eolienne à vitesse variable utilisant une génératrice synchrone [2]

#### I.3.3.2.2. Eolienne à vitesse variable utilisant une génératrice asynchrone

L'éolienne dans cette configuration entraîne une génératrice asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance situé sur le circuit statorique (Figure I.14). Contrairement à une éolienne à vitesse fixe, les tensions et les fréquences à la sortie de la génératrice ne sont plus imposées par le réseau, ce qui permet de réguler la vitesse de l'éolienne. La commande de l'onduleur permet de garder constante la tension du bus continu. [2]

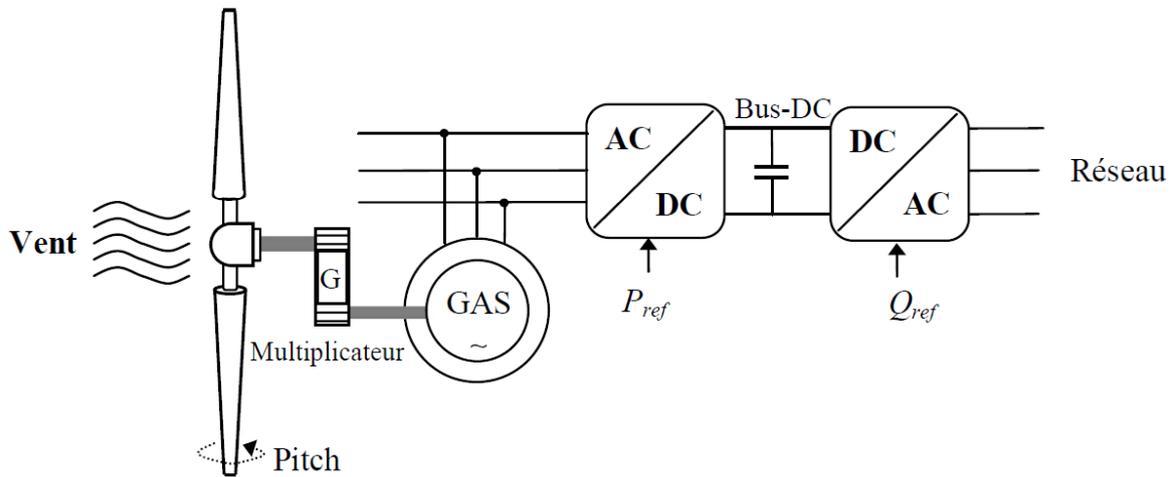


Figure I.14 - Eolienne à vitesse variable utilisant une génératrice asynchrone [2]

### I.3.3.2.3. Eolienne utilisant une génératrice asynchrone à double alimentation (MADA)

Dans cette configuration le stator de la MADA est connecté directement au réseau et le convertisseur de puissance se trouve sur le circuit rotorique (Figure I.15). La commande du redresseur permet de contrôler le fonctionnement de la génératrice en imposant la tension des enroulements rotoriques. La commande de l'onduleur permet de maintenir constante la tension du bus continu. [2]

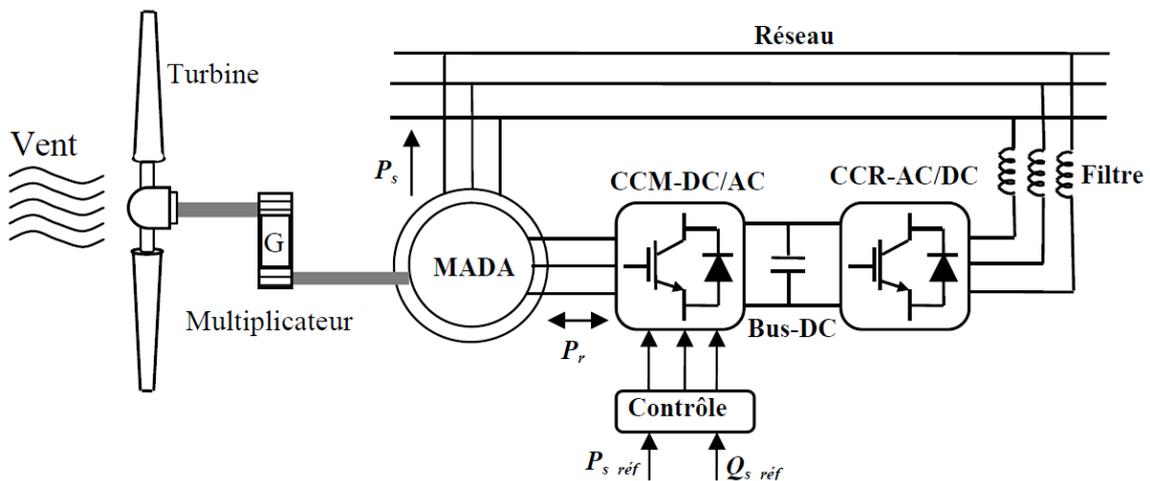


Figure I.15 - Eolienne à vitesse variable utilisant une MADA [2]

### I.3.3.3. Synthèse des différentes éoliennes

#### I.3.3.3.1. Comparaison entre les deux types de fonctionnement

Le tableau I.1 illustre un comparatif entre les deux types de fonctionnement.

Tableau I.1 - Comparatif entre le Générateur à vitesse fixe et à vitesse variable [2]

Générateur à vitesse fixe	Générateur à vitesse variable
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Faible cout;</li> <li>➤ Système électrique simple;</li> <li>➤ Haute fiabilité ;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Fonctionnement à vitesse variable (<math>\pm 30\%</math> de la vitesse nominale).</li> <li>➤ Augmentation du rendement énergétique ;</li> <li>➤ Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance ;</li> <li>➤ Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.</li> </ul>

I.3.3.3.2. Avantages et inconvénients entre différentes éoliennes

Le tableau I.2 résume les principaux avantages et inconvénients entre différentes éoliennes :

Tableau I.2 - Avantages et inconvénients des différentes éoliennes [2]

Types d'éolienne	Avantages	Inconvénients
MAS à vitesse fixe	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Machine robuste</li> <li>➤ Faible coût</li> <li>➤ Pas d'électronique de puissance</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Puissance extraite non optimisée</li> <li>➤ Maintenance boîte de vitesse</li> </ul>
MS à vitesse variable	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens ;</li> <li>➤ Absence de boîte de vitesse ;</li> <li>➤ Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Machine spécifique ;</li> <li>➤ Prix de l'électronique de puissance dimensionnée au moins à 100% de la puissance nominale ;</li> <li>➤ Grand diamètre de la machine.</li> </ul>
MAS à vitesse variable	Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens.	Electronique de puissance dimensionnée au moins à 100% de la puissance
MADA à vitesse variable	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens ;</li> <li>➤ Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale ;</li> <li>➤ Fonctionnement à vitesse variable (<math>\pm 30\%</math> de vitesse nominale).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Maintenance du multiplicateur ;</li> <li>➤ Commande complexe ;</li> <li>➤ Oscillations mécaniques.</li> </ul>

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les énergies renouvelables en général puis présenté un état de l'art sur l'énergie éolienne.

Nous avons commencé par l'historique de cette énergie, son développement dans le monde et en Algérie ainsi que ses avantages et inconvénients.

Nous avons également traité l'aérogénérateur, ses composantes et ses types, notamment, l'éolienne à axe vertical et à axe horizontal.

Par la suite, nous avons présenté la configuration électrique de l'aérogénérateur qui définit le fonctionnement de l'éolienne et qui peut se faire à vitesse fixe ou à vitesse variable. Et ce en fonction du type des machines utilisées.

Enfin, nous avons présenté une synthèse des différentes éoliennes.

A la lumière de ce chapitre, nous avons choisi d'étudier la chaîne de conversion éolienne basée sur la MADA.

Cette machine fera l'objet des chapitres suivants.

*Chapitre II :*  
*Modélisation d'un*  
*système de conversion*  
*éolien basé sur la*  
*MADA*

## Chapitre II Modélisation d'un système de conversion éolien basé sur la MADA

### Introduction

Le présent chapitre a comme objectif la modélisation détaillée du système éolien caractérisé par une chaîne de conversion basée sur la MADA.

Il est structuré en quatre parties. La première partie consiste à décrire la MADA, ses différents modes de fonctionnement ainsi que leur configuration.

La deuxième partie présente la modélisation de la turbine éolienne (modèle aérodynamique des pales et modèle de la partie mécanique) puis la stratégie de commande MPPT.

La troisième partie quant à elle traite le modèle de la MADA dans le repère triphasé puis dans le repère de Park.

Enfin, la quatrième partie aborde la modélisation du convertisseur côté machine (CCM) utilisé pour l'alimentation du rotor de la MADA.

L'ensemble du système sera validé par simulation à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK.

### II.1. Description du système

Le système de conversion éolienne à vitesse variable basé sur une MADA, est illustré sur la figure (II.1) La turbine éolienne entraîne la MADA à une vitesse de rotation variable à travers un multiplicateur ou une boîte de vitesse (BDV). Le stator de la MADA est directement raccordé au réseau électrique, tandis que son rotor est connecté au réseau mais via un filtre triphasé de courant et deux convertisseurs statiques bidirectionnels triphasés commandés en Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI), mis en cascade à travers un bus continu.

L'intérêt majeur de ce système éolien réside dans le fait que le convertisseur côté rotor ou bien côté MADA « CCM » et le convertisseur côté réseau « CCR », transférant la puissance de glissement et l'acheminant vers le réseau électrique, ne sont dimensionnés que pour une partie de la puissance nominale de la MADA. En général, le dimensionnement de la chaîne rotorique se limite jusqu'à 30% de la puissance nominale du stator de la MADA, ce qui suffit à assurer une variation de 30% de la plage de vitesse autour de la vitesse du synchronisme. Ceci constitue le principal avantage de cette structure. [3]

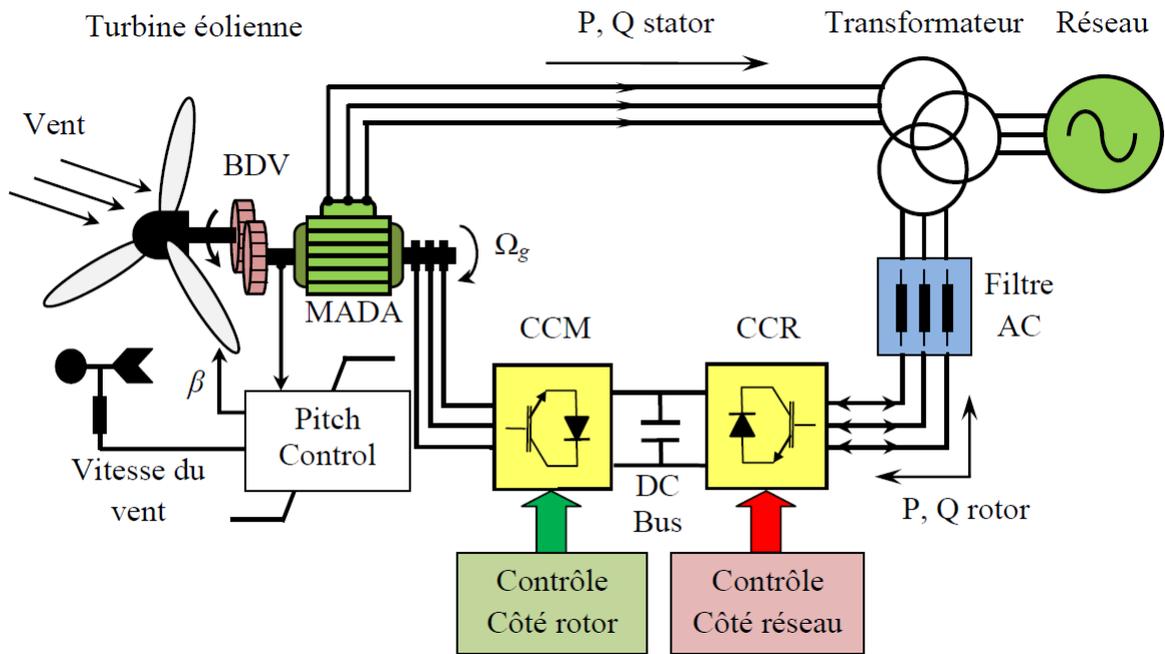


Figure II.1 - Système de conversion éolienne à base de la MADA [3]

Le surcoût engendré par la maintenance due à l'emploi d'un multiplicateur de vitesse et du système bagues/balais de la MADA est alors compensé par l'économie réalisée sur les convertisseurs comparé à un système éolien pour lequel les convertisseurs seraient dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice.

## II.2. Description et modes de fonctionnement de la MADA

### II.2.1. Description de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation possède un stator identique à celui d'une machine asynchrone à cage constitué de tôles magnétiques empilées et munies d'encoches dans lesquelles sont logés des enroulements. Le rotor de cette machine n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles frottent des balais (Figure II.2).

En fonctionnement moteur, le premier intérêt de la machine asynchrone à rotor bobiné a été de pouvoir 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.

Plutôt que de dissiper l'énergie rotorique dans des résistances, l'adjonction d'un convertisseur entre le bobinage rotorique et le réseau permet de renvoyer cette énergie sur le réseau (énergie qui est normalement dissipée par effet joule dans les barres si la machine est à cage).

Le rendement de la machine est ainsi amélioré avec cette configuration. [2]

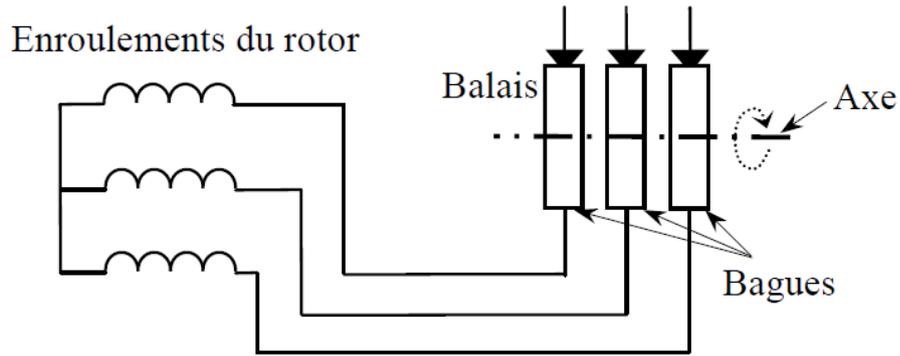


Figure II.2 - Rotor d'une MADA [2]

## II.2.2. Modes de fonctionnement de la MADA

### II.2.2.1. Fonctionnement en moteur hypo-synchrone

Dans ce mode, une partie de la puissance consommée du réseau est transformée en puissance mécanique. Le reste est transmis au réseau à travers les contacts glissants du rotor. Pour les moteurs à cage, la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor (Figure II.3). [2]

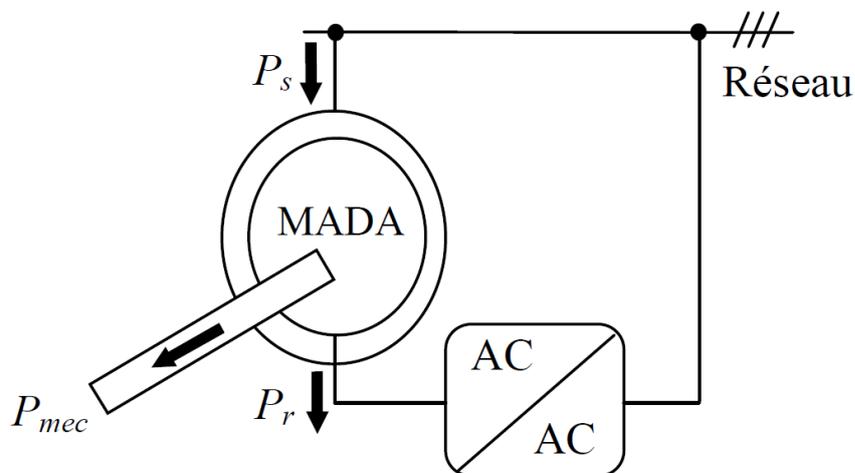


Figure II.3 - Fonctionnement de la MADA en moteur hypo-synchrone [2]

### II.2.2.2. Fonctionnement en moteur hyper-synchrone

Les puissances, statorique et rotorique, sont fournies par le réseau pour ce type de fonctionnement. Le moteur à cage ne peut avoir ce mode car celui-ci ne peut être obtenu qu'à l'aide d'un accès au rotor via un circuit électronique (Figure II.4). [2]

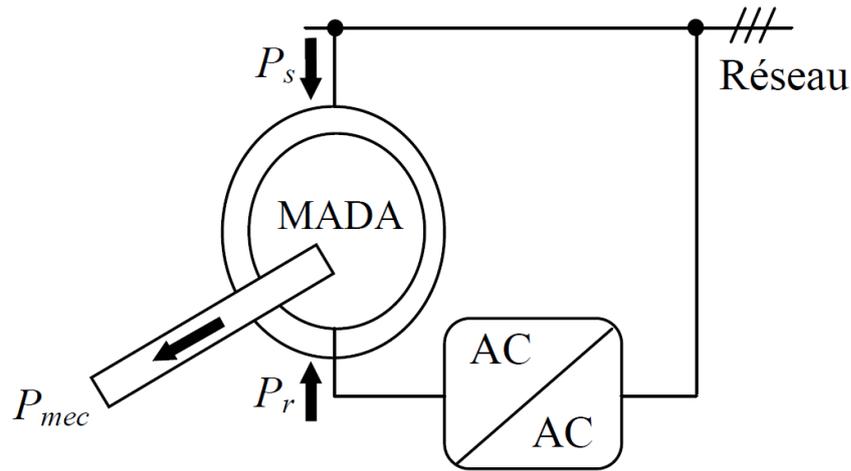


Figure II.4 - Fonctionnement de la MADA en moteur hyper-synchrone [2]

### II.2.2.3. Fonctionnement en génératrice hypo-synchrone

La puissance mécanique est transmise à l'arbre de la machine, celui-ci la fournit au stator, lequel la transmet au réseau. D'autre part, la puissance de glissement, provenant du réseau, doit d'être transmise au rotor. Ainsi pour ce type de fonctionnement, une alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de la vitesse de rotation. Il est évident qu'un moteur à cage ne peut avoir ce type de fonctionnement, car celui-ci n'a pas d'accès permettant un apport de puissance au rotor (Figure II.5). [2]

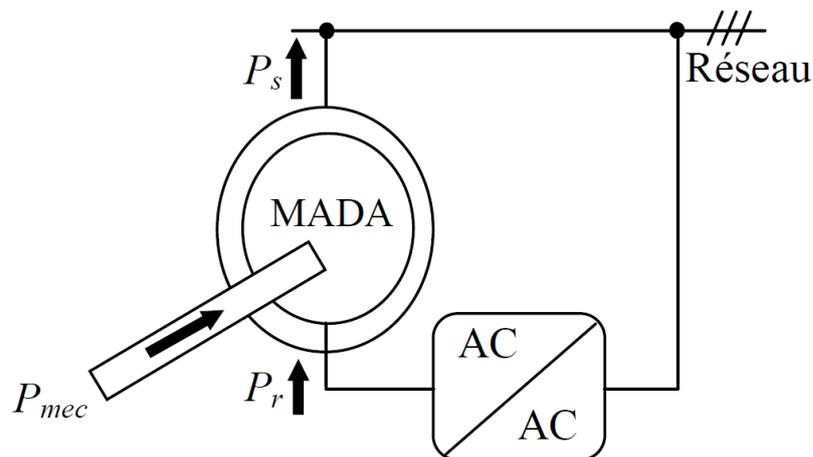


Figure II.5 - Fonctionnement de la MADA en génératrice hypo-synchrone [2]

### II.2.2.4. Fonctionnement en génératrice hyper-synchrone

Pour ce mode de fonctionnement, la puissance statorique est fournie au réseau et la puissance rotorique est récupérée pour être réinjectée au réseau via le rotor. Ainsi un générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme est conçu (Figure II.6). [2]

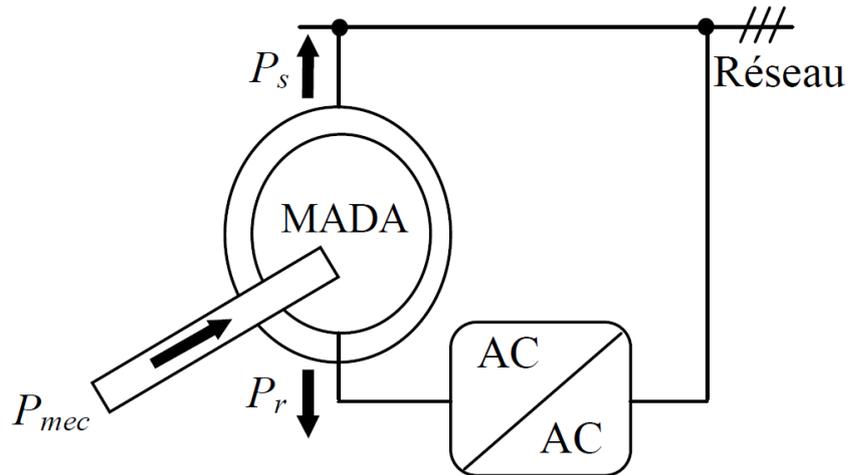


Figure II.6 - Fonctionnement de la MADA en génératrice hyper-synchrone [2]

### II.2.3. Configuration du mode de fonctionnement de la MADA

#### II.2.3.1. Fonctionnement en moteur avec un seul convertisseur

Dans ce type de fonctionnement, le stator est relié au réseau à fréquence et tension constantes, tandis que le rotor est relié à son propre convertisseur (un onduleur). Cette solution permet de réduire fortement la puissance du convertisseur (Figures II.7). [2]

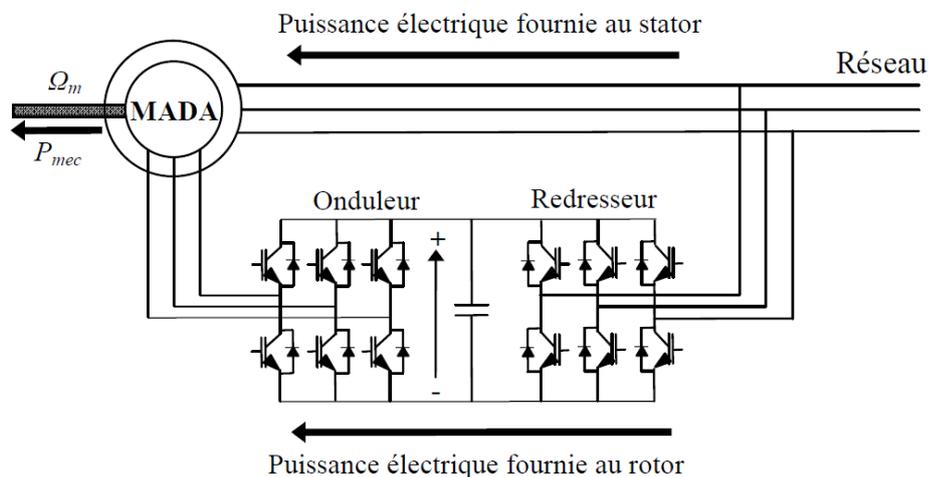


Figure II.7 - Fonctionnement en moteur alimenté par un seul convertisseur [2]

#### II.2.3.2. Fonctionnement en moteur avec deux convertisseurs

L'alimentation de la MADA, Dans cette configuration, est assurée par deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs (Figure II.8).

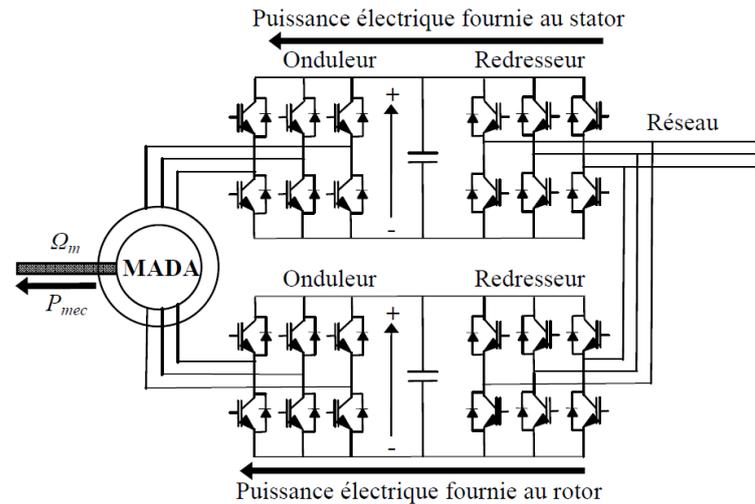


Figure II.8 - Fonctionnement d'une MADA en moteur alimenté par deux convertisseurs [2]

### II.2.3.3. Fonctionnement en génératrice avec un seul convertisseur

Dans ce type de fonctionnement, le stator est relié au réseau et un convertisseur alimente le rotor comme nous le montre la figure (II.9). Cette solution permet de fournir une tension et une fréquence fixes même lors d'une fluctuation de la vitesse. Dans ce cas, la plus grande partie de la puissance est directement distribuée au réseau par le stator et moins de 30% de la puissance totale passe par le convertisseur de puissance à travers le rotor. Ceci donne l'occasion d'utiliser des convertisseurs plus petits et donc moins coûteux. [2]

C'est cette configuration qui sera retenue dans notre travail.

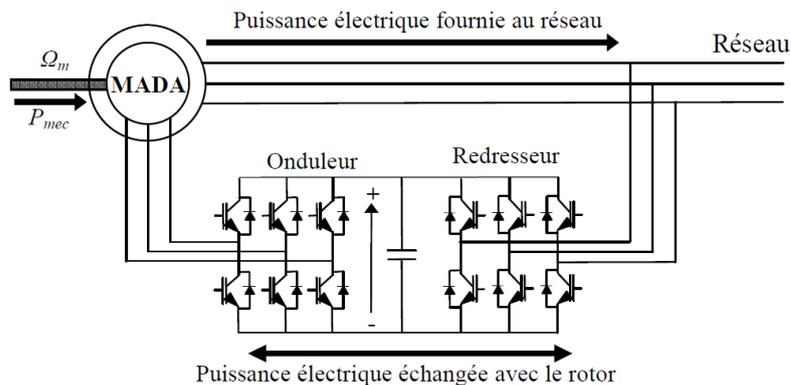


Figure II.9 - Fonctionnement d'une MADA en génératrice alimentée par un seul convertisseur [2]

#### II.2.4. Avantages et inconvénients de la MADA

Nous introduisons brièvement dans ce paragraphe les avantages principaux et inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation lors de son utilisation dans le domaine des vitesses variables [3] :

##### II.2.4.1. Avantages

Parmi ses nombreux avantages, on peut citer :

- ✓ 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 ;
- ✓ L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir une grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique, et par conséquent pour bien contrôler le transfert des puissances active et réactive ;
- ✓ La possibilité de fonctionner la MADA comme un filtre actif pour les harmoniques de courant grâce à la commande indirecte des puissances active et réactive par les courants rotoriques ;
- ✓ Le convertisseur côté rotor est dimensionné au tiers de la puissance nominale de la MADA, ce qui divise pratiquement leur prix par 3 par rapport à des convertisseurs dimensionnés pour la puissance nominale, les pertes dans les interrupteurs à semi-conducteurs sont faibles dans ce cas, le rendement du système de conversion est ainsi amélioré ;
- ✓ 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 ;
- ✓ Un fonctionnement en régime dégradé, si l'un des deux onduleurs tombe en panne, plus souple que la machine à simple alimentation, par exemple dans une application ferroviaire, nous pouvons revenir à mode de fonctionnement de type machine asynchrone (à rotor court-circuité) en cas de l'apparition d'un défaut sur l'un des bras des onduleurs ;
- ✓ La MADA présente une puissance massique légèrement plus élevée que les autres machines à grandes puissances, elle est envisagée pour des puissances élevées (> 1MW) où elle s'avère être une concurrente de la machine asynchrone à cage ;
- ✓ La MADA est une "machine généralisée", effectivement c'est une machine pouvant "assurer" tous les fonctionnements des autres machines. Par extension, cette généralisation nous permet d'envisager le pilotage de cette machine de manière plus globale en le dédiant à la gestion de l'optimisation des échanges d'énergie au sein du système auquel la MADA est intégrée ;
- ✓ La MADA se comporte comme une machine synchrone et l'on peut pratiquer des rapports de démagnétisation très importants (de l'ordre de 1 à 6).

### II.2.4.2. Inconvénients

Comparativement aux autres machines, la MADA présente des inconvénients liés essentiellement au système bagues-balais comme :

- ☒ Elle est plus volumineuse qu'une MAS à cage de puissance équivalente grâce à la présence du système bagues-balais ;
- ☒ Le surcoût engendré par la maintenance due à l'emploi d'un multiplicateur de vitesse et du système bagues-balais de la MADA, comparativement aux autres machines telles que : la machine synchrone à aimants permanents et la machine à réluctance variable ;
- ☒ L'aspect multi-convertisseurs, augmente le nombre de convertisseurs (redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) et par conséquent le prix. Pourtant certaines études prétendent le contraire.

### II.3. Modélisation de la turbine éolienne

Le dispositif étudié est constitué d'une turbine éolienne comprenant trois pales de longueur  $R$ , fixées sur un arbre d'entraînement qui est relié à un multiplicateur de gain  $G$ . Ce dernier entraîne une génératrice électrique (Figure II.10).

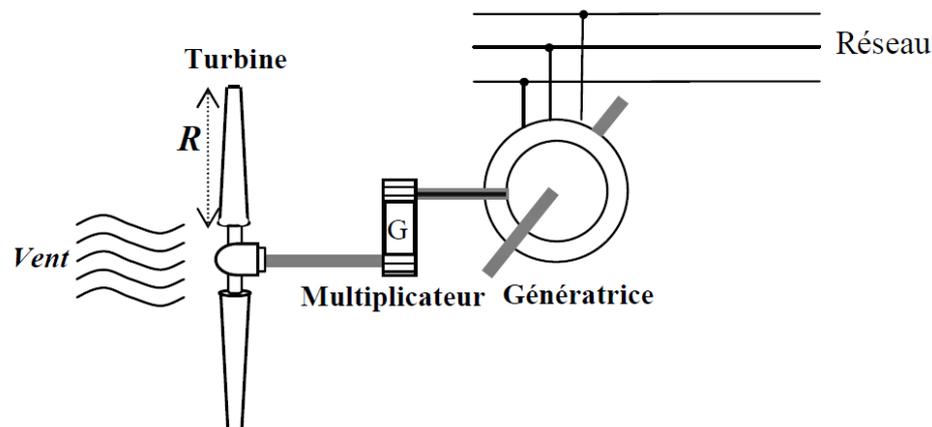


Figure II.10 - Système de conversion d'énergie éolienne [2]

#### II.3.1. Hypothèses simplificatrices

Afin de modéliser la turbine, nous nous appuyerons sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, qui sont le plus couramment considérées. Ainsi nous supposerons que [3] :

- Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc la même inertie, la même élasticité et le même coefficient de frottement par rapport à l'air ;
- Les trois pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support ;

- La répartition de la vitesse du vent est uniforme sur toutes les pales, et donc une égalité de toutes les forces de poussée ;
- Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air est négligeable ;
- La vitesse de la turbine étant très faible, donc les pertes par frottement de la turbine sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice.

### II.3.2. Modèle aérodynamique des pales

A partir de l'énergie cinétique, des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active  $S$  de la voilure, la puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active  $S$  de l'éolienne est donnée par [2] :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 \quad (II.1)$$

Où  $v$  est la vitesse du vent (m/s),  $\rho$  est la masse volumique de l'air (approximativement 1.225kg/m<sup>3</sup> à la pression atmosphérique et à 15°C) et  $R$  est la longueur d'une pale ou le rayon de l'aérogénérateur (m).

L'éolienne ne pouvant récupérer qu'une fraction de la puissance du vent et la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors :

$$P_t = C_p P_v = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (II.2)$$

Où  $C_p(\lambda, \beta)$  est le coefficient de puissance ou de performance qui représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. La vitesse relative  $\lambda$  est définie comme étant le rapport entre la vitesse linéaire des pales ( $R \cdot \Omega_t$ ) et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_t}{V} \quad (II.3)$$

Où  $\Omega_t$  (rad/s) est la vitesse mécanique de l'arbre de la turbine.

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

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 V^2 C_c(\lambda, \beta) \quad (II.4)$$

Où  $C_c$  représente le coefficient du couple :

$$C_c = \frac{C_p}{\lambda} \quad (II.5)$$

### **Modèle analytique du coefficient de puissance :**

Le coefficient de puissance  $C_p$  dépend du nombre de pâles du rotor et de leurs formes géométrique et aérodynamique (longueur et profil des sections). Celles-ci sont conçues en fonction des caractéristiques du site, de la puissance nominale souhaitée, du type de régulation (en pitch ou par décrochage) et du type de fonctionnement (à vitesse fixe ou variable) [3]

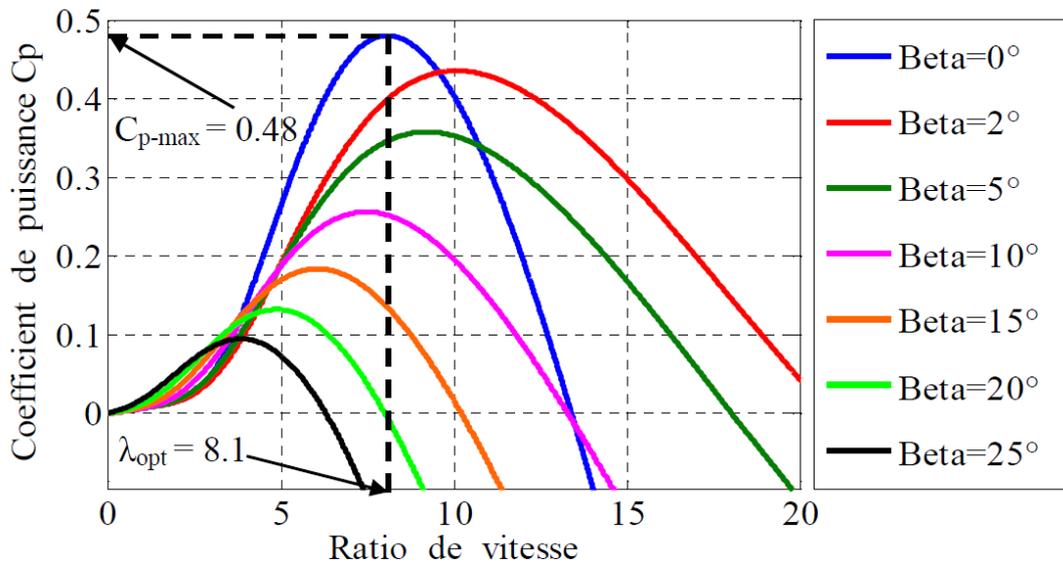
Dans le cadre de ce projet, nous utiliserons une expression approchée du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  et de l'angle de calage des pales  $\beta$ . La formule analytique pour le calcul de  $C_p = f(\lambda, \beta)$  pour des éoliennes à rotation rapide à 2 ou 3 pales basée sur des données expérimentales. Cette expression empirique est donnée par : [3]

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) \exp\left( \frac{-21}{\lambda_i} \right) + 0.0068\lambda \quad (\text{II.6})$$

$$\text{Avec : } \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

La figure (II.11) montre les résultats de simulation sous MATLAB/SIMULINK de l'évolution du coefficient de puissance  $C_p$  en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  pour quelques angles de calage  $\beta$ .

Quand la turbine éolienne est à l'arrêt ( $\Omega_t = 0$ ), le ratio des vitesses  $\lambda$  s'annule. La puissance de la turbine doit être nulle aussi puisque  $P_t = C_t \Omega_t$  (où  $C_t$  le couple mécanique de la turbine). Ceci ne veut pas dire que le couple  $C_t$  exercé par le vent sur la turbine est nul. Quand la vitesse de rotation augmente par rapport à la vitesse du vent ( $\lambda$  augmente),  $C_p$  augmente jusqu'à une valeur maximale. Si  $\lambda$  devient trop grand, le coefficient de puissance  $C_p$  peut prendre une valeur négative qui provoque une inversion de l'écoulement de puissance sur l'arbre de la turbine (figure II.11). Ceci signifie qu'à partir d'une certaine vitesse de rotation de la turbine, et pour une vitesse de vent donnée, la turbine se retrouve en mode "propulsion" et fonctionne comme un ventilateur. Elle transfère de l'énergie mécanique fournie sur son arbre vers l'atmosphère. [3]


 Figure II.11 - Coefficient de puissance  $C_p$  en fonction de  $\lambda$  pour différents  $\beta$ 

D'après la figure (II.11), on constate que pour chaque angle de calage  $\beta$  il existe un ratio de vitesses  $\lambda$  optimal qui maximise le coefficient  $C_p$ . On peut voir aussi sur la figure (II.11) que ce coefficient  $C_p$  passe par un maximum ( $C_{p-max} = 0.48$ ) pour un angle de calage ( $\beta = 0^\circ$ ) et une valeur particulière du ratio de vitesse que l'on désigne  $\lambda_{opt}$  (où  $\lambda_{opt} = 8.1$ ).

Il est alors possible d'élaborer des lois de commande qui permettent de capter la puissance maximale quelle que soit la vitesse du vent jusqu'à la puissance nominale de la génératrice où la puissance extraite est limitée à cette valeur. Ceci peut réaliser à l'aide de l'algorithme MPPT « Maximum Power Point Tracking » permettant d'imposer un couple de référence. Néanmoins, l'angle d'orientation des pales  $\beta$  est maintenu constant. Ce type de réglage sera traité en détail par la suite dans ce chapitre.

L'équation (II.3) montre que pour maintenir  $\lambda$  à sa valeur optimale, et donc maximiser la puissance de la turbine éolienne, il faut varier la vitesse de rotation  $\Omega_t$  de manière linéaire avec la vitesse du vent  $v$ . Dans ce cas, la vitesse de rotation optimale  $\Omega_t^{opt}$  pour la transmission mécanique maximale de la turbine éolienne est donné par :

$$\Omega_t^{opt} = \frac{\lambda_{opt}}{R} v \quad (II.7)$$

Cela nous conduit à tracer les caractéristiques de la puissance aérodynamique optimale de notre aérogénérateur fonctionnant à vitesse variable, en fonction de la vitesse de rotation du générateur et pour différentes vitesses du vent selon l'équation (II.2) qui devient :

$$P_t^{opt} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p^{max}(\lambda_{opt}, \beta_{opt}) \quad (II.8)$$

La caractéristique du coefficient de puissance varie avec l'angle d'orientation des pales  $\beta$  et le ratio de vitesse  $\lambda$ . L'équation (II.2) montre qu'une petite variation de la vitesse du vent  $v$  induit une grande variation de la puissance générée  $P_t$ . La figure (II.12) présente les résultats de simulation de cette caractéristique pour une éolienne de 7.5 kW à travers la courbe d'extraction de la puissance aérodynamique de la turbine en fonction de la vitesse de rotation de la génératrice pour les différentes vitesses du vent.

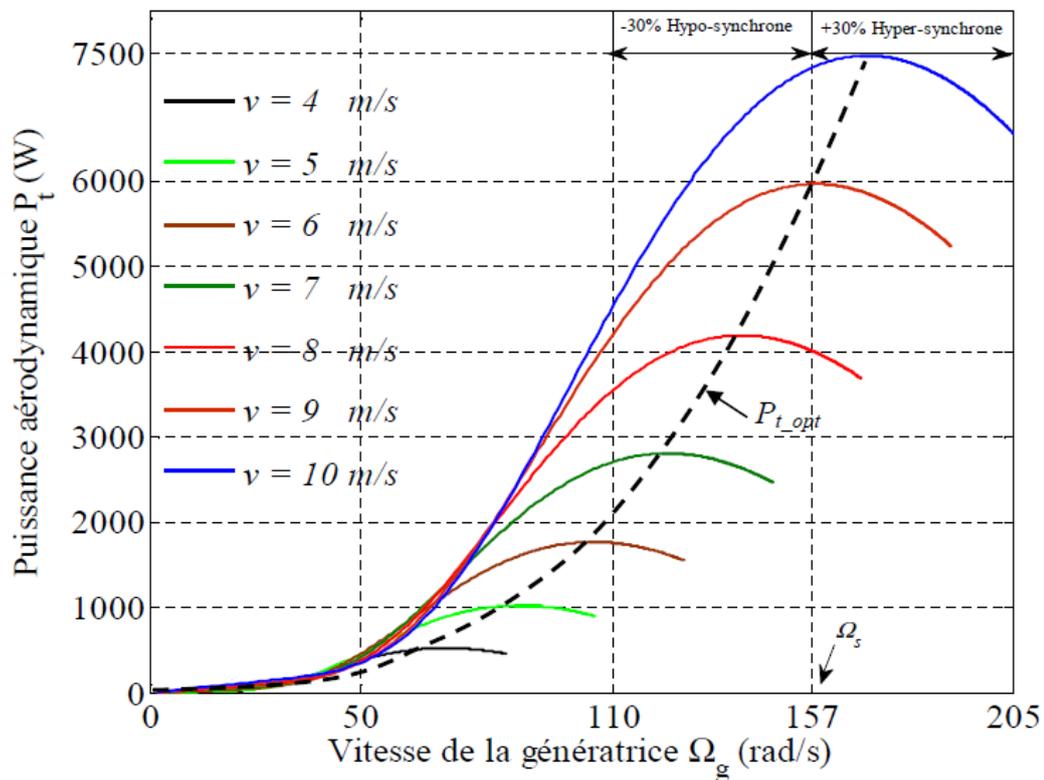


Figure II.12 - Puissance aérodynamique générée par la turbine éolienne

La figure (II.12) montre ainsi tout l'intérêt du fonctionnement à vitesse variable d'un aérogénérateur. Il permet en effet par un réglage adapté de maximiser la puissance de la turbine pour chaque valeur de la vitesse du vent sur le site et donc la production annuelle d'énergie.

Pour une vitesse de vent donnée, il existe deux grandeurs contrôlables pour la puissance d'une turbine éolienne : la vitesse de rotation et l'angle de calage des pales par rapport à la direction du vent. La troisième consiste à changer la position de la nacelle vis-à-vis de la direction du vent, mais dans cette étude nous supposons que le plan de rotation décrit par la turbine éolienne est toujours maintenu perpendiculaire à la direction du vent. [3]

### II.3.3. Modèle de la partie mécanique

La partie mécanique de la turbine comprend trois pales orientables et de longueur  $R$ . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse de rotation  $\Omega_t$ , relié à un multiplicateur de gain  $G$ . Ce multiplicateur entraîne la génératrice électrique à une vitesse  $\Omega_g$ .

Sur la base des hypothèses simplificatrices mentionnées au début, on obtient alors un modèle mécanique constitué de deux masses comme l'illustre la figure (II.13)

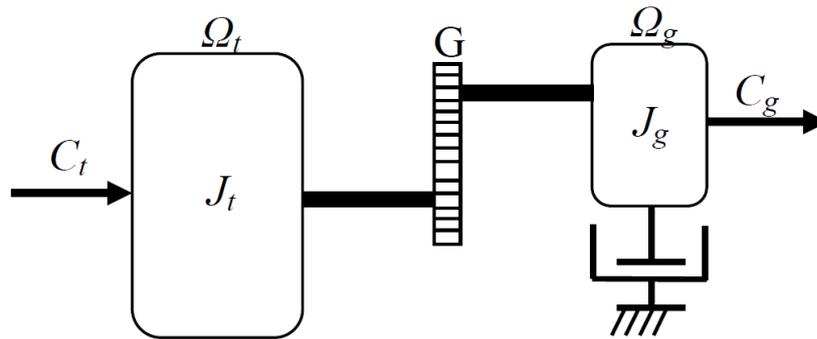


Figure II.13 - Modèle mécanique de la turbine éolienne [2]

Avec :

- $J_t$  : Le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des 3 pales de l'éolienne.
- $J_g$  : Le moment d'inertie de la génératrice.
- $f_v$  : Le coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice.
- $C_g$  : Le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice après multiplicateur.
- $\Omega_g$  : La vitesse de rotation de la génératrice.
- $G$  : Le gain du multiplicateur de vitesse.

### Modèle du multiplicateur :

Le multiplicateur adapte la vitesse de rotation de la turbine (arbre lent) à la vitesse de rotation de la MADA (arbre rapide). Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain  $G$ . L'élasticité et les frottements du multiplicateur sont négligés ; ainsi les pertes énergétiques dans celui-ci sont considérées comme étant nulles. Le couple aérodynamique de la turbine éolienne est divisé par le rapport du multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur. [3]

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les deux relations suivantes :

$$C_g = \frac{C_t}{G} \quad (II.9)$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_g}{G} \quad (II.10)$$

### Modèle de l'arbre mécanique :

La liaison entre la turbine et la partie électrique de l'éolienne est représentée ici par l'intermédiaire de l'équation du mouvement. Plusieurs modèles du comportement mécanique de l'arbre de l'éolienne, sont proposés dans la littérature. La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie  $J_t$  et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine.

Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale  $J$  constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice  $J_g$  : [3]

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g \quad (\text{II.11})$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe.

D'après la figure (II.3), nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la génératrice par :

$$J \frac{d\Omega_g}{dt} = C_{\text{méc}} = C_g - C_{\text{em}} - C_f \quad (\text{II.12})$$

Donc, l'évolution de la vitesse mécanique  $\Omega_g$  dépend du couple mécanique appliqué au rotor de la génératrice  $C_{\text{méc}}$  qui est la résultante du couple de la turbine après multiplicateur, le couple électromagnétique produit par la génératrice  $C_{\text{em}}$ , et le couple de frottement visqueux  $C_f$  donné par la relation :

$$C_f = f_v \Omega_g \quad (\text{II.13})$$

Le schéma bloc de la figure (II.14) correspond aux modélisations aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne. Ce schéma bloc montre que la vitesse de rotation  $\Omega_g$  de la génératrice, donc de la turbine, peut être contrôlée par action soit sur l'angle de calage des pales  $\beta$ , soit sur le couple électromagnétique  $C_{\text{em}}$  de la MADA. La vitesse du vent  $v$  est considérée comme une entrée perturbatrice au système.

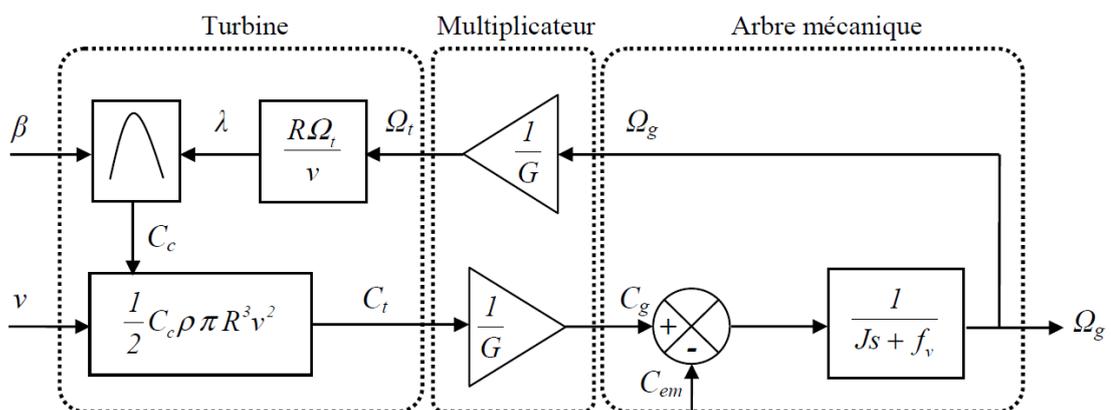


Figure II.14 - Schéma bloc du modèle de la turbine [3]

### II.3.4. Stratégie de maximisation de puissance "MPPT"

#### II.3.4.1. Les Différents zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable

Les zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable sont représentées sur la figure (II.15). [2] :

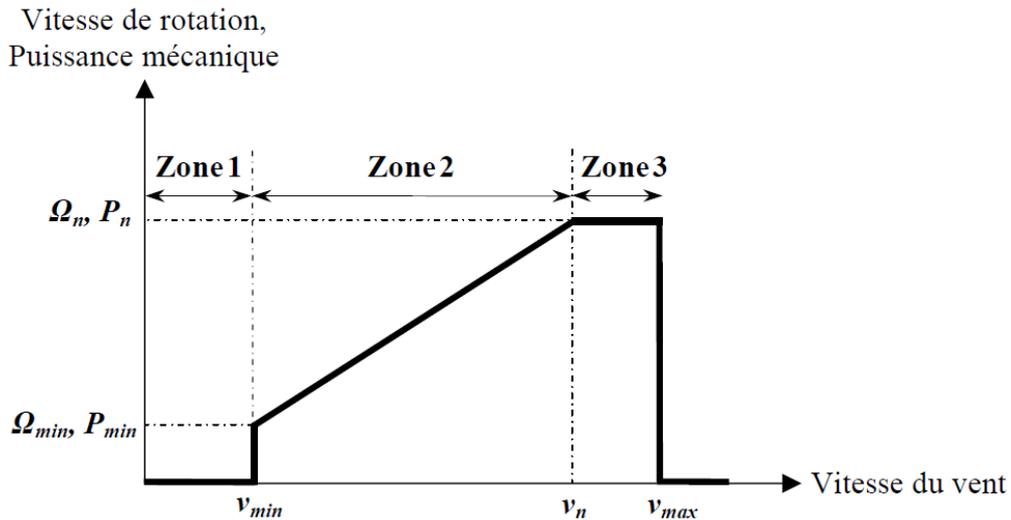


Figure II.15 - Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable [2]

Trois zones principales de fonctionnement peuvent être distinguées :

- Zone 1 : la vitesse du vent est faible, insuffisante pour permettre de démarrer l'éolienne ; la vitesse de rotation et la puissance mécanique sont alors égales à zéro ;
- Zone 2 : le vent atteint une vitesse minimale  $V_{min}$  pour permettre le démarrage. Une fois ce démarrage effectué, l'éolienne va fonctionner de manière à extraire le maximum de puissance disponible pour avoir un fonctionnement optimal jusqu'à ce que le vent atteigne la vitesse nominale  $V_n$  correspondant aux valeurs nominales de la puissance mécanique  $P_n$  et de la vitesse de rotation  $\Omega_n$  ;
- Zone 3 : le vent atteint des vitesses élevées supérieures à la vitesse nominale, la vitesse de rotation et la puissance mécanique doivent être maintenues à leur valeurs nominales afin de ne pas détériorer l'éolienne. Ces limitations peuvent s'effectuer, par exemple, en orientant les pales de l'éolienne afin de dégrader le rendement de l'éolienne (augmentation de l'angle de calage des pales  $\beta$ ). Dès que le vent a atteint sa valeur maximale  $V_{max}$ , une procédure d'arrêt de l'éolienne est effectuée afin d'éviter toute destruction de celle-ci.

Dans le cadre de ce projet, nous nous intéresserons plus particulièrement à des points de fonctionnement de l'éolienne se situant dans la zone 2. En effet, dans cette zone, nous considérerons que l'angle de calage des pales  $\beta$  est constant. Un fonctionnement en zone 3 aurait uniquement pour conséquence une modification de cet angle afin de limiter la puissance mécanique pour éviter toute destruction de l'éolienne.

Dans la Zone 2, il existe différentes stratégies de commande pour contrôler le couple électromagnétique de la MADA afin de régler la vitesse de rotation de manière à maximiser la puissance électrique produite.

#### II.3.4.2. Stratégie de maximisation de puissance "MPPT"

Les éoliennes utilisées pour la production d'électricité doivent permettre de produire un maximum de puissance en exploitant au mieux l'énergie disponible dans le vent. C'est pour cela que de nombreux systèmes de commande de l'éolienne, agissant au niveau de la partie mécanique par l'intermédiaire de l'angle de calage des pales ou électrique par la commande de la machine électrique via l'électronique de puissance, sont développés pour maximiser la conversion d'énergie. [3]

D'après l'équation (II.2) la puissance mécanique extraite  $P_t$  est maximale si la valeur maximale du coefficient  $C_p$  est atteinte. Celle-ci est obtenue si la vitesse relative  $\lambda$  est égale à sa valeur optimale  $\lambda_{opt}$ .

A partir de la figure (II.11) nous pouvons remarquer que :

$$C_p = C_{p-max} = 0.48 \text{ pour } \lambda = \lambda_{opt} = 8.1 \text{ et } \beta = 0.$$

En remplaçant  $C_p$  par  $C_{p-max}$  = constante dans l'équation (II.2) on obtient l'expression de la puissance maximale  $P_{t-max}$  extraite de la turbine :

$$P_{t-max} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_{p-max} \quad (II.14)$$

$$P_{t-max} = k.V^3 \quad (II.15)$$

Avec :

$$\Omega_t^* = \frac{\lambda_{opt} V}{R} \quad (II.16)$$

La dernière équation nous ramène à dire que l'éolienne tourne à une vitesse  $\Omega_t^*$  d'une manière à ce que la puissance extraite de la turbine est maximale.

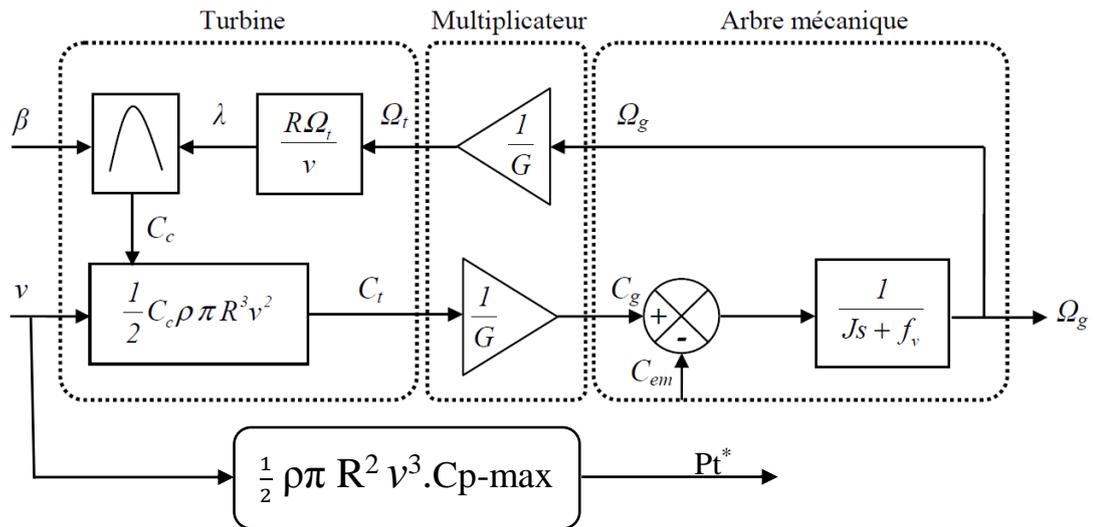


Figure II.16 - Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique

**N.B :** La sortie  $Pt^*$  sera utilisée par la suite comme une puissance de référence  $Ps^*$  dans le cadre de la commande DPC.

### II.3.5 Profil du vent

Le Profil du vent est généré par un modèle autorégressive à moyenne mobile 'ARMA' (autoregressive moving average) dans MATLAB/Simulink. [1]

La vitesse moyenne du vent est de 8 (m/s) voir figure (II.17).

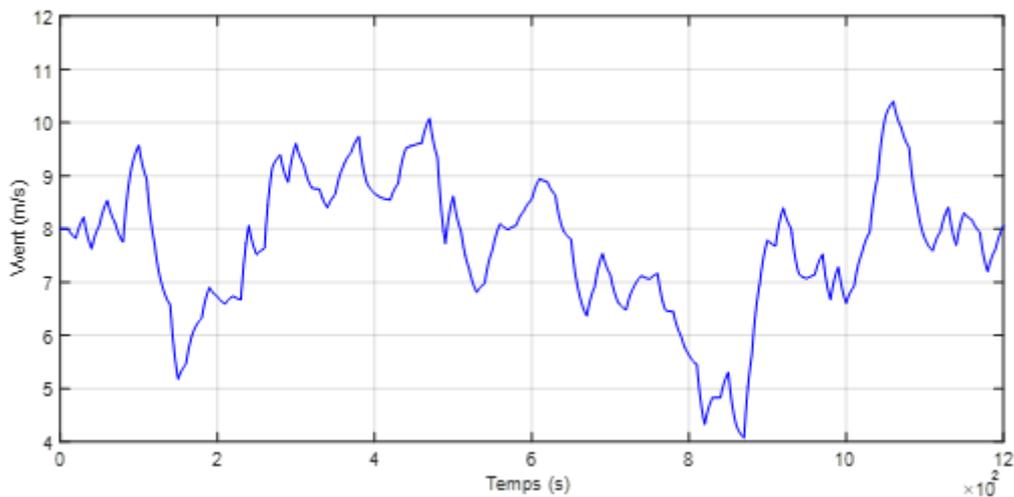


Figure II.17 - Profil du vent

## II.4. Modèle de la MADA

### II.4.1. 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 : [2]

- 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.
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme (constant), les inductances propres sont constantes. Les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes des enroulements rotoriques et statoriques.
- Nous tenons compte que du premier harmonique d'espace de distribution de force magnétomotrice de chaque phase du stator et du rotor.

### II.4.2. Modèle de la MADA dans le repère triphasé :

La représentation schématique d'une machine triphasée asynchrone à double alimentation dans le repère triphasé est donnée par la figure (II.17).

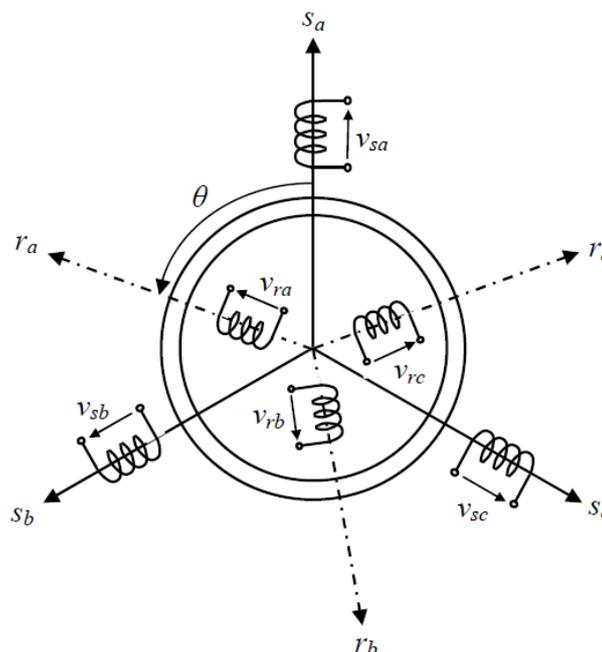


Figure II.18 - Représentation de la MADA dans le repère triphasé [1]

## II.4.2.1. Equations électriques de la MADA

Les équations de tension : [1]

$$\text{Avec : } \left\{ \begin{array}{l} \text{Stator : } [V_s] = [R_s] [I_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s] \\ \text{Rotor : } [V_r] = [R_r] [I_r] + \frac{d}{dt}[\Phi_r] \end{array} \right. \quad (II.17)$$

$$[V_s] = \begin{pmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{pmatrix}, [I_s] = \begin{pmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{pmatrix}, [V_r] = \begin{pmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{pmatrix}, [I_r] = \begin{pmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{pmatrix}$$

$$[R_s] = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{pmatrix} \quad [R_r] = \begin{pmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{pmatrix}$$

$R_s, R_r$  : Résistances des enroulements statoriques et rotoriques.

Les flux sont donnés par :

$$\begin{aligned} [\Phi_s] &= [L_s] [I_s] + [M_{sr}] [I_r] \\ [\Phi_r] &= [L_r] [I_r] + [M_{rs}] [I_s] \end{aligned} \quad (II.18)$$

$$[\Phi_s] = \begin{pmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{pmatrix} \quad [\Phi_r] = \begin{pmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} [\Phi_s] \\ [\Phi_r] \end{pmatrix} = [L(\theta)] \begin{pmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{pmatrix}, \quad [L(\theta)] = \begin{pmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{pmatrix}, \quad [M_{rs}] = [M_{sr}]^T$$

$[L(\theta)]$  : Matrice des inductances (relation entre les flux et les courants)

Avec :  $\theta$  la position du rotor.

$$[I_s] = \begin{pmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{pmatrix}, \quad [I_r] = \begin{pmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{pmatrix}$$

$$[\text{Msr}] = \text{Msr} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (\text{II.19})$$

$l_s, l_r$  : Les inductances propres statoriques et rotoriques.

$m_s, m_r$  : Les inductances mutuelles entre deux phases statoriques et entre deux phases rotoriques de la MADA, respectivement.

$M_{sr}$  : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

$\theta$  : L'angle électrique entre une phase statorique et une autre rotorique.

En remplaçant les flux par leurs expressions dans les équations des tensions, on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [l_s][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} [l_r][I_r] + [M_{rs}][I_s] \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

II.4.2.2. Equation mécanique de la MADA :

L'équation mécanique de la machine s'écrit : [1]

$$J \frac{d}{dt} \omega = C_{em} - C_r - f_r \omega \quad (\text{II.21})$$

Avec :

$C_{em}$  : Le couple électromagnétique.

$C_r$  : Le couple résistant.

$f_r$  : Coefficient de frottement.

$J$  : Moment d'inertie.

L'expression générale du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{em} = p [I_s] T \frac{d}{d\theta} [M_{sr}][I_r] \quad (\text{II.22})$$

$p$  : Le nombre de paire de pôles.

### II.4.3. Modélisation de la MADA dans le repère de Park dq :

#### II.4.3.1. Transformé de Park :

Après établissement du modèle électromagnétique de la machine dans le repère triphasé en tenant compte des hypothèses simplificatrices, on peut noter sa complexité, ce qui nous oblige à faire appel à des modèles plus simples dans des repères à nombre d'axes réduits permettant facilement la traduction mathématique de la MADA, l'étude et l'analyse de son régime transitoire.

Parmi ces modèles, on cite celui le plus utilisé dit modèle de Park. Ce modèle a la possibilité de faire une transformation d'un système triphasé (a-b-c) au système équivalent biphasés généralisé (d-q-o) et inversement, avec la création des mêmes forces magnétomotrices du champ électromagnétique tournant. Cette transformation est appelée la transformation de Park. Elle est nommée transformation de Park modifiée si on a une conservation de puissance lors de la transition triphasée biphasée et l'inverse. [3]

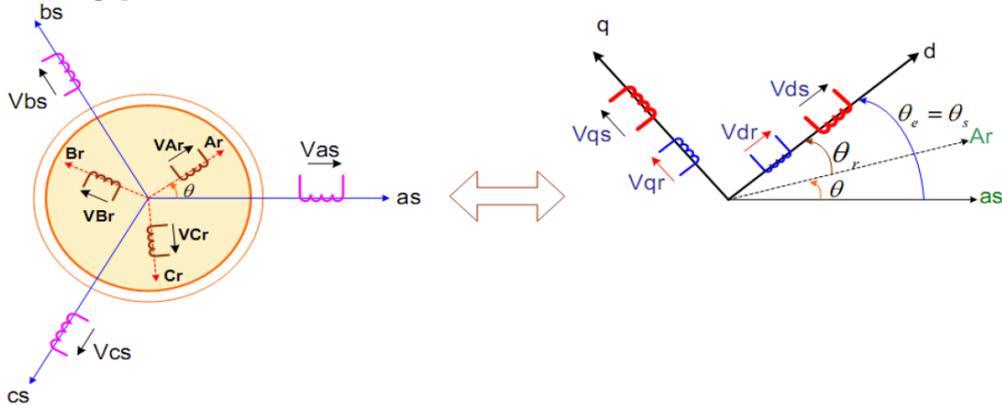


Figure II.19 - Passage du repère triphasé au repère biphasé dq [1]

Le produit matriciel définissant la transformée de Park est le suivant :

$$[X_{dq}] = [P(\alpha)] [X_{abc}]$$

Avec :

$$[P(\alpha)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\alpha) & -\sin(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (II.23)$$

L'angle  $\alpha$  est choisi en fonction de l'application :

$$\alpha = \theta_s : \text{pour les grandeurs statoriques.}$$

$\alpha = \theta_r$  : pour les grandeurs rotoriques.

La relation entre l'angle statorique  $\theta_s$  et l'angle rotorique  $\theta_r$  s'exprime par :

$$\theta_s = \theta_r + \theta.$$

Le fait que  $[P(\alpha)]$  soit orthogonale :  $[P(\alpha)]^{-1} = [P(\alpha)]^T$

II.4.3.2. Application de transformation de Park à la MADA :

II.4.3.2.1. Equations électriques

Les tensions, courants et flux se transforment de la manière suivante :

$$\begin{aligned} [V_{s,dq}] &= [P(\theta_s)][V_{s,abc}] & [I_{s,dq}] &= [P(\theta_s)][I_{s,abc}] & [\Phi_{s,dq}] &= [P(\theta_s)][\Phi_{s,abc}] \\ [V_{r,dq}] &= [P(\theta_r)][V_{r,abc}] & [I_{r,dq}] &= [P(\theta_r)][I_{r,abc}] & [\Phi_{r,dq}] &= [P(\theta_r)][\Phi_{r,abc}] \end{aligned}$$

On obtient finalement les équations électriques suivantes :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (II.24)$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - \omega_r \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + \omega_r \Phi_{dr} \end{cases} \quad (II.25)$$

Avec :

$$\begin{aligned} \theta_s - \theta_r &= \theta \\ \omega_s - \omega_r &= \frac{d}{dt} \theta = \omega = p\Omega \end{aligned}$$

$\omega_s = \frac{d}{dt} \theta_s$  : Vitesse angulaire des axes dq dans le repère statorique.

$\omega_r = \frac{d}{dt} \theta_r$  : Vitesse angulaire des axes dq dans le repère rotorique.

Les flux sont donnés par :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad \begin{cases} \Phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (II.26)$$

$$\begin{pmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{pmatrix} \quad (II.27)$$

Avec :

$L_s = l_s - m_s$  : Inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r - m_r$  : Inductance cyclique rotorique.

$M = \frac{3}{2} M_{sr}$  : La mutuelle cyclique entre le stator et le rotor.

A partir des équations des flux, les expressions des courants s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{1}{\sigma L_s L_r} (L_r \Phi_{ds} - M \Phi_{dr}) \\ i_{qs} = \frac{1}{\sigma L_s L_r} (L_r \Phi_{qs} - M \Phi_{qr}) \\ i_{dr} = \frac{1}{\sigma L_s L_r} (L_s \Phi_{dr} - M \Phi_{ds}) \\ i_{qr} = \frac{1}{\sigma L_s L_r} (L_s \Phi_{qr} - M \Phi_{qs}) \end{cases} \quad (II.28)$$

Avec :  $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$  Coefficient de fuite.

#### II.4.3.2.2. Puissances Actives et puissances Réactive

Les puissances actives et réactives statoriques et rotoriques s'expriment par :

$$\text{Stator : } \begin{cases} P_s = \text{Re} (\bar{U}_s i_s^*) \\ Q_s = \text{Im} (\bar{U}_s i_s^*) \end{cases} \quad \begin{cases} P_s = (V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs}) \\ Q_s = (V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs}) \end{cases} \quad (II.29)$$

$$\text{Rotor : } \begin{cases} P_r = \text{Re} (\bar{U}_r i_r^*) \\ Q_r = \text{Im} (\bar{U}_r i_r^*) \end{cases} \quad \begin{cases} P_r = (V_{dr} i_{dr} + V_{qr} i_{qr}) \\ Q_r = (V_{qr} i_{dr} - V_{dr} i_{qr}) \end{cases} \quad (II.30)$$

II.4.3.2.3. Equations du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique est obtenu à l'aide du bilan des puissances.

La puissance électrique instantanée  $P_e$  fournie aux enroulements statoriques et rotoriques s'exprime comme suit :

$$P_e = (V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} + V_{dr} i_{dr} + V_{qr} i_{qr}) \quad (II.31)$$

En remplaçant les tensions par leurs expressions, elle se décompose en trois séries de termes :

a. Puissance dissipée en pertes Joule :

$$[R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + R_r (i_{dr}^2 + i_{qr}^2)] \quad (II.32)$$

b. Puissance représentant les échanges d'énergie avec les sources :

$$[i_{ds} \frac{d\Phi_{ds}}{dt} + i_{qs} \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + i_{dr} \frac{d\Phi_{dr}}{dt} + i_{qr} \frac{d\Phi_{qr}}{dt}] \quad (II.33)$$

c. Puissance mécanique :

$$P_m = [(\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \frac{d\theta_s}{dt} + (\Phi_{qr} i_{dr} - \Phi_{dr} i_{qr}) \frac{d\theta_r}{dt}] \quad (II.34)$$

Les équations des flux nous permettent d'écrire que :

$$P_m = (\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \left( \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \right)$$

Or :

$$P_m = C_e \Omega \text{ et } \left( \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \right) = \frac{d}{dt} \theta = \omega = p\Omega.$$

$$\implies P_m = C_e \omega / p$$

Ainsi nous pouvons avoir plusieurs expressions scalaires du couple électromagnétique :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_e = p (\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \\ C_e = p (\Phi_{qr} i_{dr} - \Phi_{dr} i_{qr}) \\ C_e = p M (i_{dr} i_{qs} - i_{ds} i_{qr}) \\ C_e = p \frac{M}{L_r} (\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds}) \\ C_e = p \frac{M}{L_s} (\Phi_{qs} i_{dr} - \Phi_{ds} i_{qr}) \end{array} \right. \quad (II.35)$$

II.4.3.2.4. Choix du référentiel

Il existe différentes possibilités concernant le choix de l'orientation du repère d'axes d,q qui dépend des objectifs de l'application :

- a. Repère lié au Stator ( $\theta_s = 0, \theta_r = \theta$ ) : étude des grandeurs rotoriques, démarrage et freinage de la machine.
- b. Repère lié au Rotor ( $\theta_r = 0, \theta_s = \theta$ ) : étude des grandeurs statorique, simulation des régimes transitoires des machines.
- c. Repère lié au champ tournant ( $\theta_s = \theta_s, \theta_r = \theta_s - \theta$ ) : étude de la commande, les grandeurs de réglage sont continués.

Pour la commande de la MADA on travaille dans le repère lié au champ tournant. Le modèle de la MADA dans le repère des PARK d,q lié au champ tournant s'écrit comme suit :

$$\begin{pmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s & -L_s \omega_s & 0 & -M \omega_s \\ L_s \omega_s & R_s & M \omega_s & 0 \\ 0 & -M(\omega_s - \omega) & R_r & -L_r(\omega_s - \omega) \\ M(\omega_s - \omega) & 0 & L_r(\omega_s - \omega) & R_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{ds} \\ i_{ds} \\ i_{ds} \end{pmatrix} \quad (II.36)$$

II.4.3.2.5. Mise sous forme d'équations d'état

$$\begin{aligned} \dot{X} &= A.X + B.U \\ Y &= C.X + D.U \end{aligned}$$

Avec : X : vecteur d'état, U : vecteur d'entrée et Y : vecteur de sortie.

$$U = (V_{ds} \ V_{qs} \ V_{dr} \ V_{qr})^T$$

On choisit le vecteur  $X = (\Phi_{ds} \ \Phi_{qs} \ i_{dr} \ i_{qr})^T$  comme vecteur d'état.

Après le calcul, on obtient le système suivant :

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\Phi_{ds}}{dt} &= -\alpha_s \Phi_{ds} + \omega_s \Phi_{qs} + \alpha_s M i_{dr} + V_{ds} \\ \frac{d\Phi_{qs}}{dt} &= -\alpha_s \Phi_{qs} - \omega_s \Phi_{ds} + \alpha_s M i_{qr} + V_{qs} \\ \frac{di_{dr}}{dt} &= -\gamma_r i_{dr} + (\omega_s - \omega) i_{qr} + \alpha_s \beta \Phi_{ds} - \beta \omega \Phi_{qs} - \beta V_{ds} + \frac{1}{\sigma_r} V_{dr} \\ \frac{di_{qr}}{dt} &= -\gamma_r i_{qr} - (\omega_s - \omega) i_{dr} + \alpha_s \beta \Phi_{qs} + \beta \omega \Phi_{ds} - \beta V_{qs} + \frac{1}{\sigma_r} V_{qr} \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{p\mu}{J} (\Phi_{qs} i_{dr} - \Phi_{ds} i_{qr}) - \frac{1}{J} C_r - \frac{f_r}{J} \omega \end{aligned} \right. \quad (II.37)$$

Avec :

$$\alpha_s = \frac{R_s}{L_s} ; \gamma_r = \frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_s M^2}{L_s^2 \sigma_r} ; \beta = \frac{M}{L_s \sigma_r}$$

$$\sigma_r = L_r \sigma ; \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} ; \mu = \frac{M}{L_s}$$

## II.5. Modélisation du convertisseur côté machine (CCM)

Le convertisseur côté machine est un onduleur de tension assurant la conversion continu-alternatif (figure II.19). Il est composé de six transistors shuntés en antiparallèle par des diodes de récupération qui permettent de renvoyer le courant négatif vers le condensateur de filtrage à l'entrée de l'onduleur. [2]

Pour modéliser l'onduleur de tension, on considère que :

- La commutation des interrupteurs est instantanée ;
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable ;
- La charge triphasée est équilibrée, couplée en étoile avec un neutre isolé.

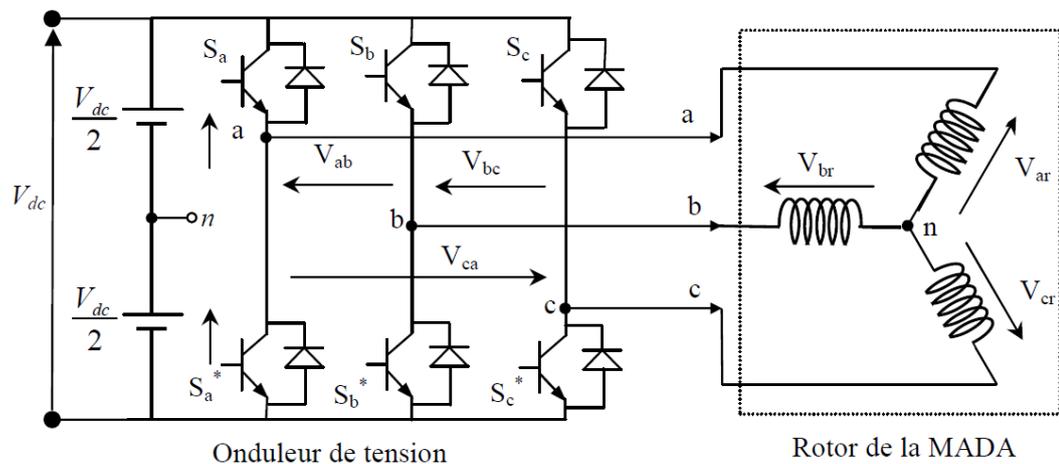


Figure II.20 - Schéma d'un onduleur de tension triphasé alimentant le rotor de la MADA [2]

### II.5.1. Modélisation de l'onduleur de tension

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

$S_i = 1$  si l'interrupteur du demi-haut (a, b ou c) est fermé.

$S_i = 0$  si l'interrupteur du demi-bas (a, b ou c) est fermé.

Pour les tensions composées, on a :

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_c (S_a - S_b) \\ V_{bc} &= V_c (S_b - S_c) \\ V_{ca} &= V_c (S_c - S_a) \end{aligned} \quad (II.38)$$

Sachant que la charge est équilibrée et le neutre est isolé, on a alors :

$$V_{ar} + V_{br} + V_{cr} = 0 \quad (II.39)$$

Avec :

$$\begin{aligned} V_{ar} &= \frac{V_{dc}}{6} (2S_a - S_b - S_c) \\ V_{br} &= \frac{V_{dc}}{6} (-S_a + 2S_b - S_c) \\ V_{cr} &= \frac{V_{dc}}{6} (-S_a - S_b + 2S_c) \end{aligned} \quad (II.40)$$

Enfin, on trouve

$$\begin{pmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{pmatrix} = \frac{V_{dc}}{6} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{pmatrix} \quad (II.41)$$

## Conclusion

Le présent chapitre nous a permis de modéliser un système éolien à vitesse variable basé sur la MADA à travers les étapes suivantes :

- Dans un premier temps, nous avons expliqué comment les économies réalisées à travers le faible dimensionnement des convertisseurs a fait de ce système éolien le système le plus utilisé actuellement.
- Par la suite, nous avons procédé à la modélisation des différents constituants du système éolien ainsi qu'au développement des modèles analytiques de ces constituants notamment, le modèle aérodynamique et mécanique de la turbine et le coefficient de puissance.
- Dans un second temps, nous avons modélisé la MADA dans le repère de Park lié au champ tournant en utilisant des hypothèses simplificatrices pour faciliter l'opération.
- Enfin, nous avons procédé à la modélisation du convertisseur côté machine (CCM) utilisé pour l'alimentation du rotor de la MADA.

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

*Chapitre III :*  
*Commande directe de*  
*puissance (DPC) de la*  
*MADA*

## Chapitre III Commande directe de puissance (DPC) de la MADA

### Introduction

Le présent chapitre traite la technique de commande directe des puissances active et réactive statoriques, appliquée sur le convertisseur côté machine << CCM >> qui alimente le rotor de la MADA. Cette technique consiste à sélectionner un vecteur de tension de sorte que les erreurs entre les puissances mesurées et les puissances de référence soient réduites et maintenues dans un domaine compris entre les bandes d'hystérésis.

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.

### III.1. Histoire de la DPC

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). La première configuration de ce type de contrôle a été proposée par T.Neghouchi en 1998, pour le contrôle direct des puissances instantanées active et réactive du redresseur à MLI triphasé sans capteurs de tension du réseau. Le but commun de ce contrôle était d'assurer le prélèvement des courants sinusoïdaux tout en garantissant un facteur de puissance unitaire avec un contrôle découplé des puissances active et réactive. [3]

### III.2. THEORIE DE LA COMMANDE DIRECTE DE PUISSANCE

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. 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.

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.

Il est entendu que l'augmentation du couple à vitesse constante implique une augmentation de la puissance consommée par la machine. On rappelle ici que la puissance positive est absorbée par la machine en mode moteur alors qu'elle est négative en mode génératrice. Cette relation est aussi vraie en mode génératrice où une augmentation du couple réduit la puissance générée par la machine (augmente la puissance positive). Il suffit essentiellement d'échanger le terme couple par puissance active et flux par puissance réactive dans la commande DTC afin d'obtenir un entraînement à commande directe des puissances active et réactive. Malheureusement, une grande difficulté persiste dans le calcul de l'angle du flux rotorique. A cet égard, la commande directe des puissances active et réactive offre un moyen robuste de connaître le secteur actuel du flux rotorique. [3]

### III.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 côté machine « CCM » est illustrée sur la figure (III.1). Elle est analogue à celle du contrôle direct de couple (DTC). Au lieu du couple et du flux rotorique, c'est la puissance active et réactive statoriques qui sont les grandeurs contrôlées.

Le principe de la DPC consiste à sélectionner une séquence des ordres de commutation ( $S_a$ ,  $S_b$ ,  $S_c$ ) des semi-conducteurs constituant « CCM », à partir d'une table de commutation. La sélection s'effectue sur la base des erreurs ( $\varepsilon P_s$  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. [3]

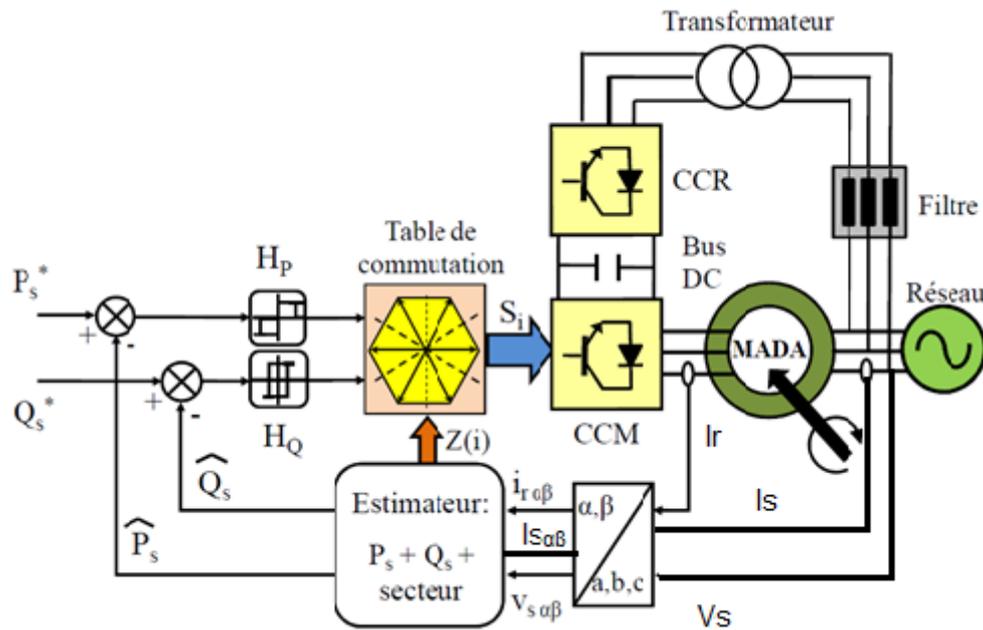


Figure III.1 - Configuration de la DPC-C de la MADA [3]

### III.4. DPC-C de la MADA

Afin d'aboutir à une table de commutation assurant un contrôle simultané des puissances active et réactive, dans tous les secteurs, il est indispensable d'étudier les variations provoquées par l'application de chacun des vecteurs de commande sur les puissances, et cela au cours d'une période complète de la tension rotorique. Les vecteurs de commande sélectionnés dans la table de commutation doivent assurer la restriction de l'erreur de suivi de référence des deux puissances active et réactive, simultanément.

#### III.4.1. Estimation de la puissance active et réactive

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 :

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

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

La puissance de référence  $P_s^*$  est issue de la stratégie MPPT (voir figure II.16).

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.

### III.4.2. Secteurs du Flux rotorique

Les expressions du flux rotorique (voir chapitre II équation II.26) dans le repère  $\alpha\beta$  s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} \Phi_{r\alpha} = L_r i_{r\alpha} + M i_{s\alpha} \\ \Phi_{r\beta} = L_r i_{r\beta} + M i_{s\beta} \end{cases} \quad (III.2)$$

L'angle du flux rotorique est donné par :

$$\delta = \text{Arctan} (\Phi_{r\beta} / \Phi_{r\alpha}) \quad (III.3)$$

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

La répartition du plan complexe  $\alpha\beta$  en six zones angulaires  $Z_i$  ( $i = 1, \dots, 6$ ) représentées dans la figure (III.2) dites secteurs peut être déterminée par la relation suivante :

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

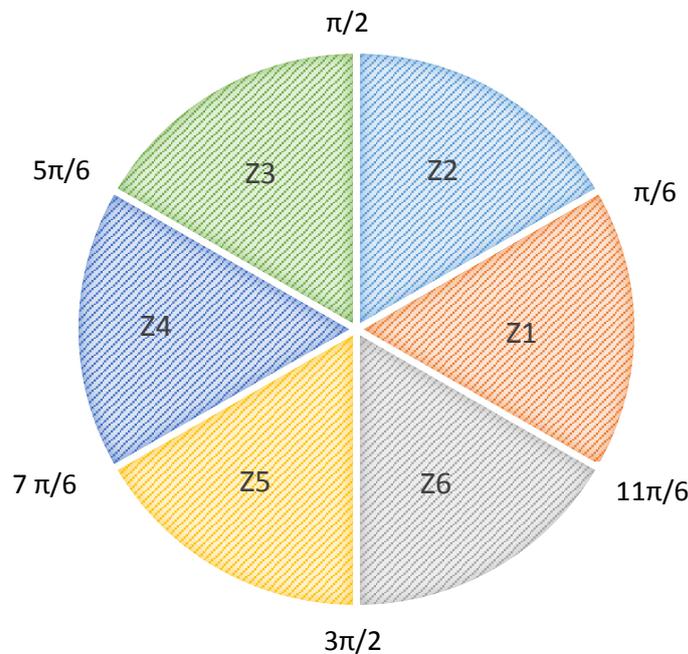


Figure III.2 - Les six secteurs du flux rotorique

## III.4.3. Choix des comparateurs à hystérésis

De manière à obtenir de très bonnes performances dynamiques, le choix d'un correcteur à hystérésis à trois niveaux pour  $P_s$  et à deux niveaux pour  $Q_s$  semble être la solution la plus simple et la mieux adaptée à la commande de la puissance active et réactive. Ces comparateurs (figure III.3) doivent permettre de contrôler l'échange de la puissance active et réactive entre la MADA et le réseau électrique dans les deux sens et avec les deux modes de fonctionnement hypo et hyper-synchrone de la MADA. La DPC pour la MADA 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.

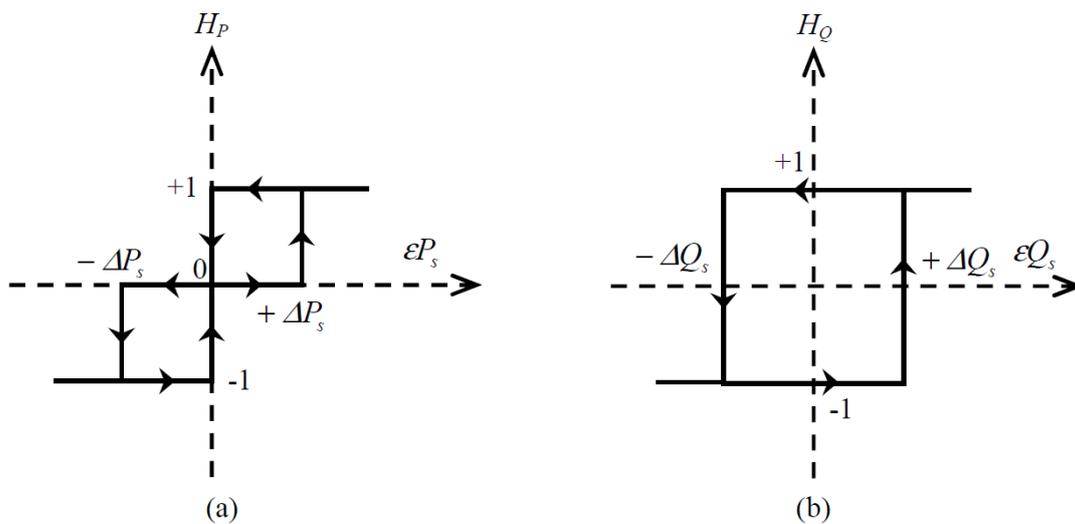


Figure III.3 - Comparateurs à hystérésis : (a) puissance active, (b) puissance réactive [3]

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

$$\begin{aligned}
 \text{Si } \varepsilon Q_s \geq \Delta Q_s & \Rightarrow H_Q = 1 \\
 \text{Si } \varepsilon Q_s \leq -\Delta Q_s & \Rightarrow H_Q = -1 \\
 \text{Si } \varepsilon P_s \geq \Delta P_s & \Rightarrow H_P = 1 \\
 \text{Si } -\Delta P_s \leq \varepsilon P_s \leq \Delta P_s & \Rightarrow H_P = 0 \\
 \text{Si } \varepsilon P_s \leq -\Delta P_s & \Rightarrow H_P = -1
 \end{aligned} \tag{III.5}$$

Les comparateurs analogiques ont un désavantage notable : la fréquence d'échantillonnage est variable. Mais, ce problème peut être éliminé, si on utilise des comparateurs discrets. Par cela, les variations des puissances ne sont pas maintenues exactement dans la bande d'hystérésis, mais on fonctionne à temps d'échantillonnage fixe. [3]

III.4.4. Elaboration de la table de commutation

Les signaux de HP et HQ (Figure III.3) ainsi que le secteur du vecteur flux rotorique Zi (Figure III.2), représentent les entrées de cette table de vérité (Tableau III.1), alors que les états de commutation Sa, Sb, Sc représentent sa sortie (vecteurs optimaux).

Un onduleur triphasé à deux niveaux de tension (Voir Chapitre II.5) peut produire huit combinaisons différentes, ces huit combinaisons engendrent huit vecteurs de tension à partir des sorties (Sa, Sb, Sc) qui peuvent être appliqués aux bornes rotoriques de la MADA.

Tableau III.1 - Table de sélection des vecteurs optimaux [3]

		Comparateur	3 niveaux			3 niveaux			
			2 niveaux			2 niveaux			
		Puissance réactive : $H_Q$		1			-1		
		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°)	$V_4$	$V_0$	$V_2$	$V_5$	$V_7$	$V_1$	
$V_0=[0,0,0]$ ; $V_1=[1,0,0]$ ; $V_2=[1,1,0]$ ; $V_3=[0,1,0]$ ; $V_4=[0,1,1]$ ; $V_5=[0,0,1]$ ; $V_6=[1,0,1]$ ; $V_7=[1,1,1]$									

### III.5. Résultats de simulation

Dans cette section la commande DPC de la MADA de 5kW (annexe A) a été testée en simulation sous l'environnement MATLAB/SIMULINK.

Toutefois, dans le cadre de la simulation le profil du vent utilisé (Figure III.4) représente une partie du profil de la figure (II.17). Afin de ne pas dépasser la puissance nominale de la machine.

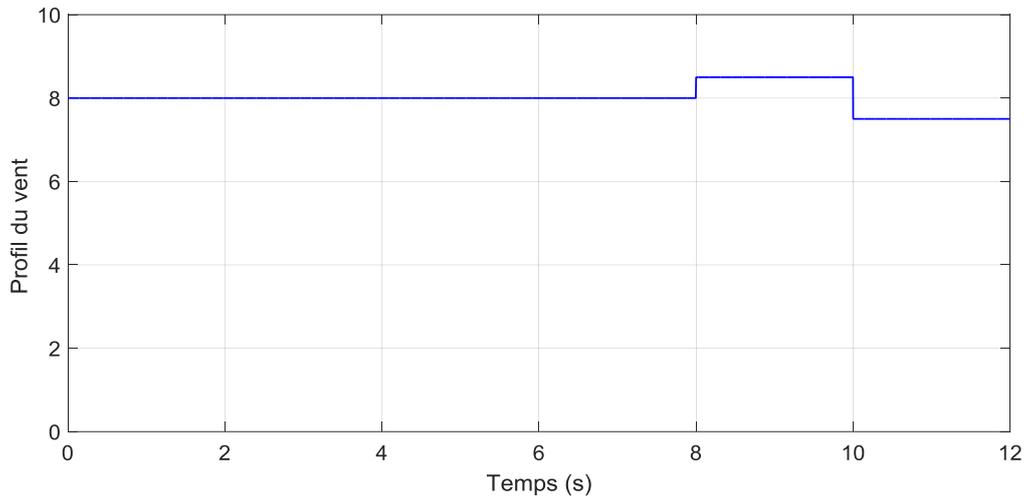


Figure III.4 - Profil du vent utilisé (m/s)

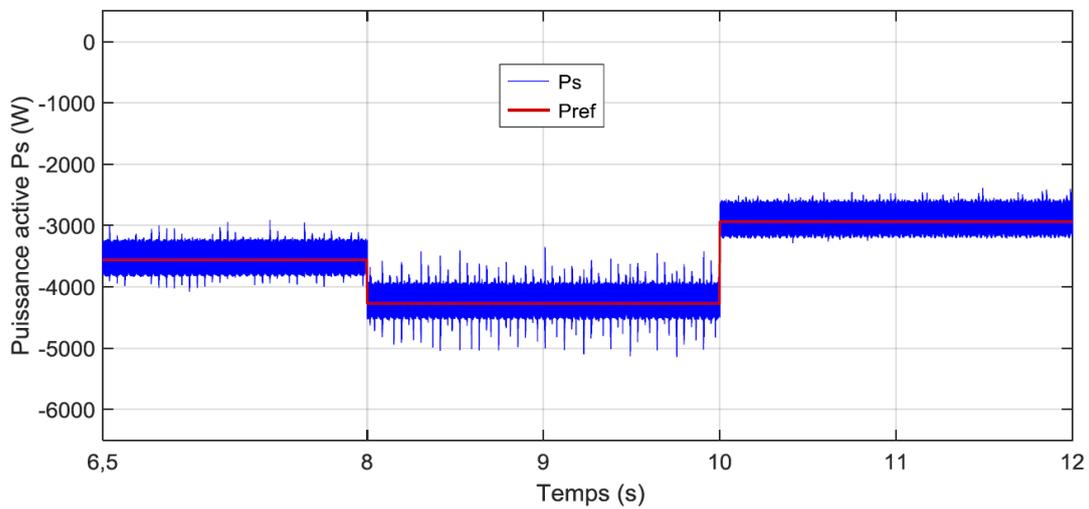


Figure III.5 - Puissance active Ps (W)

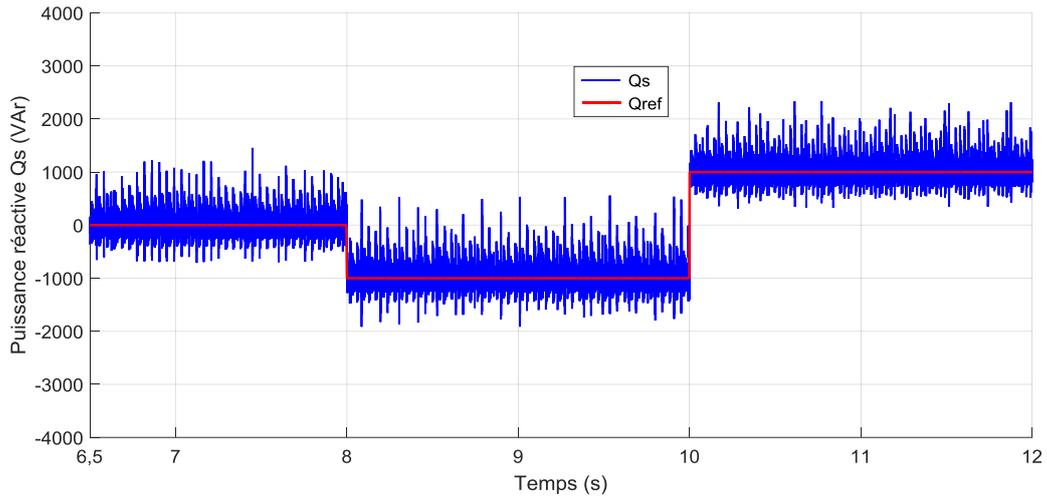


Figure III.6 - Puissance réactive  $Q_s$  (Var)

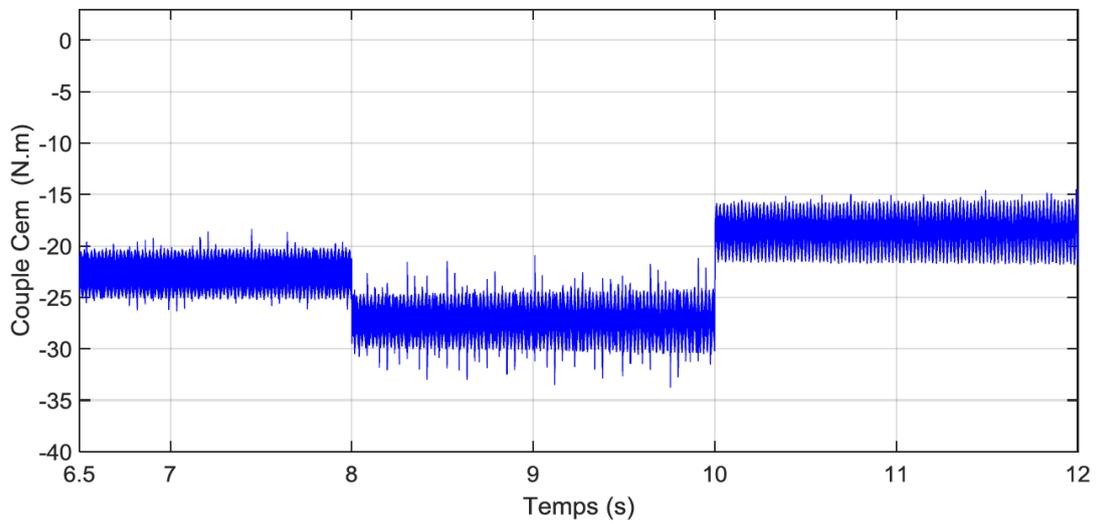


Figure III.7 - Couple  $C_{em}$  (N.m)

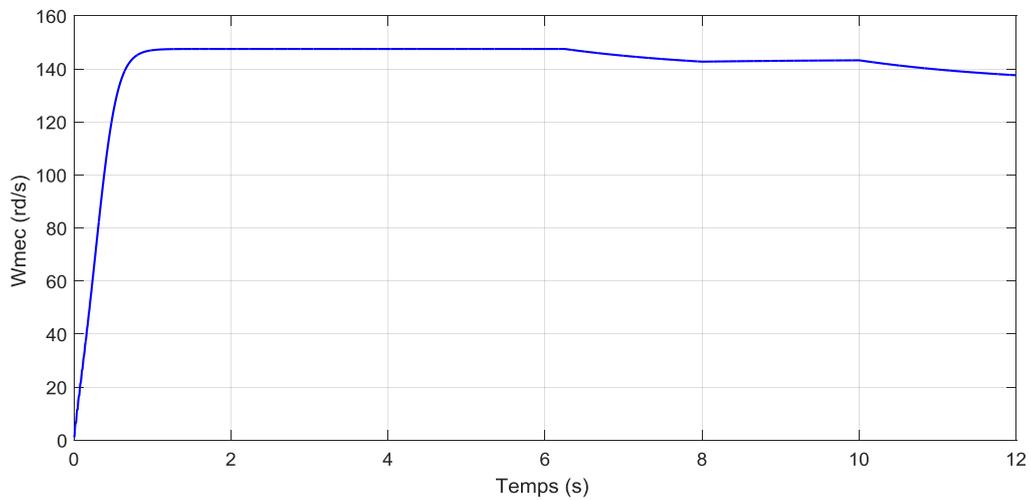


Figure III.8 - Vitesse de la machine  $W_{mec}$  (rd/s)

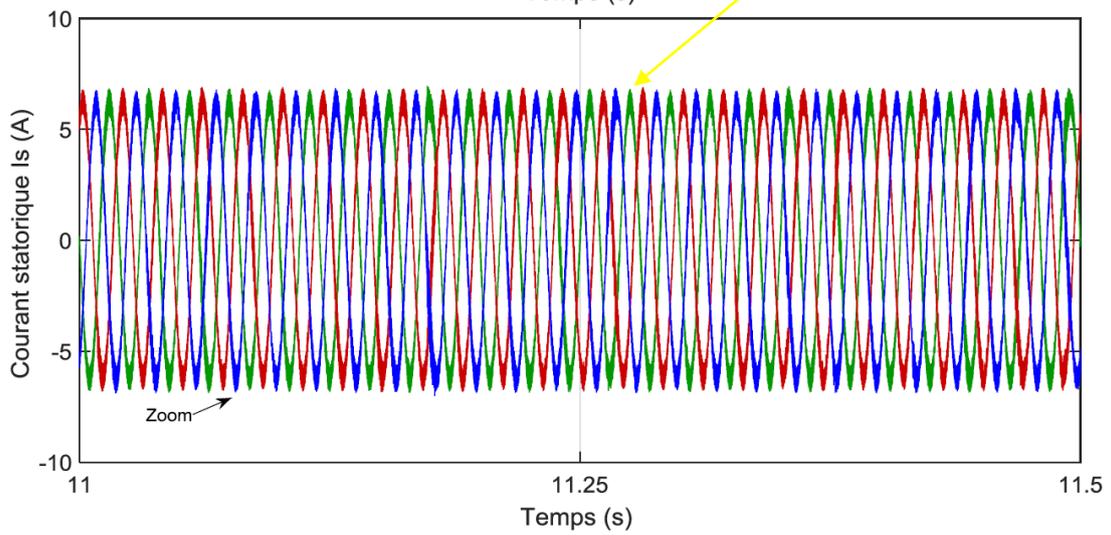
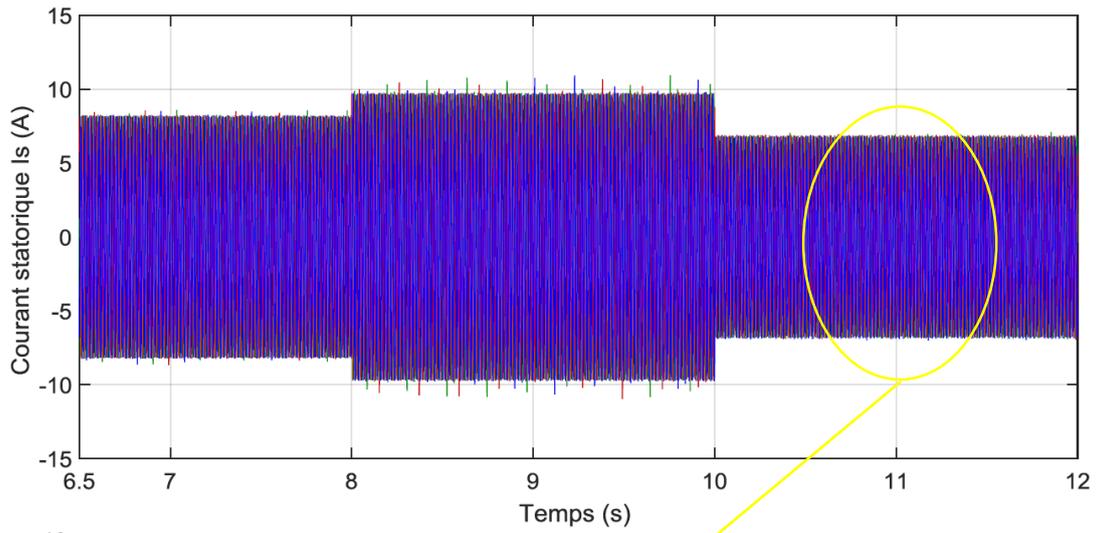


Figure III.9 - Courant statorique  $I_s$  (A)

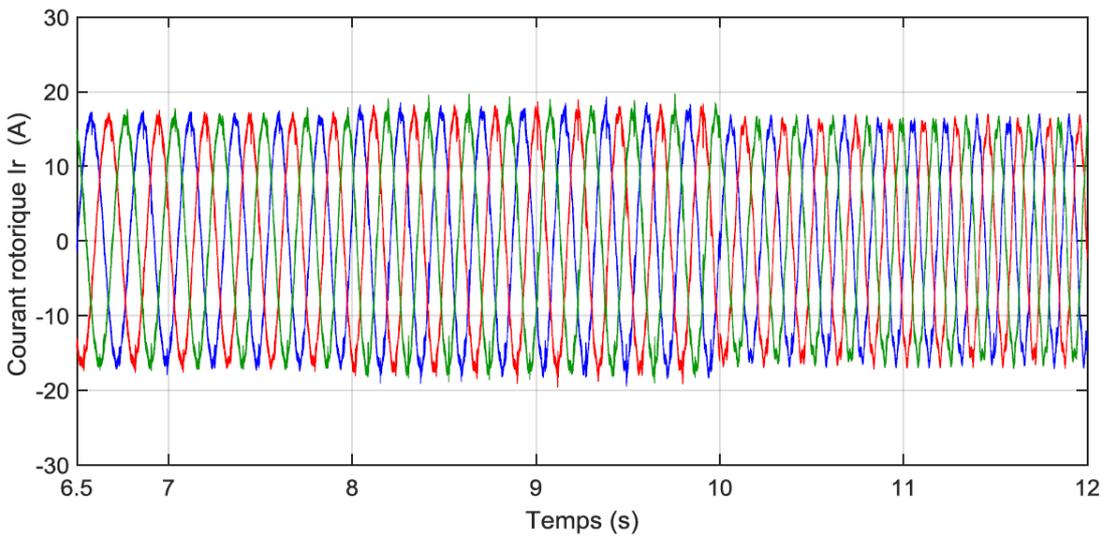


Figure III.10 - Courant rotorique  $I_r$  (A)

- **Interprétation des résultats**

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

La consigne de la puissance active ( $P_{ref}$ ) est obtenue par la stratégie de maximisation de puissance MPPT (Voir figure II.16). 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 bien leurs références et le découplage entre les deux puissances est visible (Figures : III.5 III.6).
- Le courant statorique  $I_s$  et le courant rotorique  $I_r$  générés par la MADA ont une allure sinusoïdale (Figures : III.9 III.10). 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.
- La figure (III.7) illustre le couple électromagnétique de la MADA qui est l'image de la puissance active statorique. Quant à la vitesse de la MADA, elle tourne autour du synchronisme et la réponse ne présente pas un grand dépassement (figure III.8).

## 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 alimente le rotor de la MADA 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.

Les principaux avantages de cette stratégie de commande sont la faible dépendance vis-à-vis des paramètres de la MADA et le découplage assuré entre la puissance active et réactive (le suivi des consignes des puissances, rapidité de la réponse). Néanmoins, ladite stratégie présente des harmoniques de courant statorique injecté dans le réseau (THD élevé) en raison de la fréquence de commutation variable produite par les comparateurs à hystérésis.

Cette fréquence variable peut être fixée à l'aide de la technique MLI vectorielle SVM, ceci pourra améliorer les performances de la commande. Cette technique fera l'objet du prochain chapitre.

*Chapitre IV*  
*Amélioration de la*  
*DPC par la*  
*modulation vectorielle*  
*(SVM)*

## Chapitre IV Amélioration de la DPC par la modulation vectorielle (SVM)

### Introduction

Dans ce dernier chapitre nous allons présenter une amélioration de la commande étudiée dans le chapitre précédent 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. Ceci va permettre de réduire les oscillations au niveau des puissances.

La table de commutation de la DPC-C et les comparateurs à hystérésis sont éliminés et les puissances active et réactive sont régulées par des régulateurs PI.

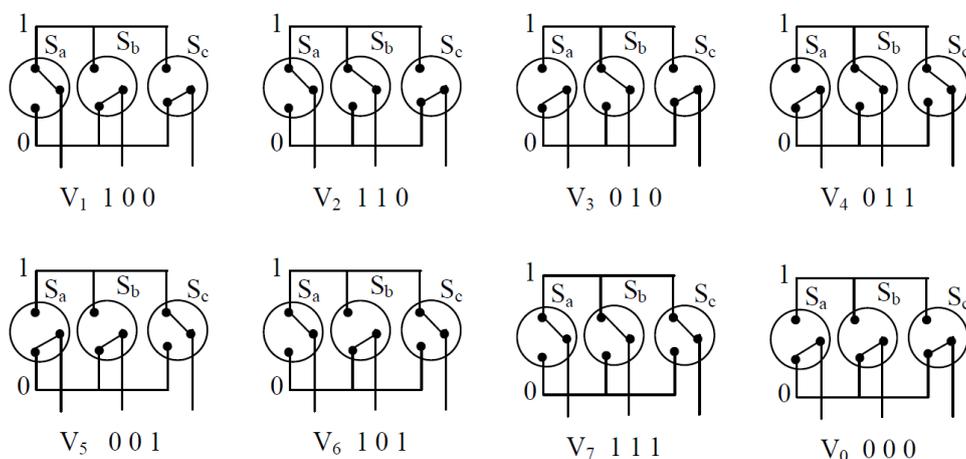
A la fin de ce chapitre, les résultats de simulation de cette stratégie de commande appliquée sur la MADA sous environnement MATLAB/SIMULINK seront présentés et interprétés afin de mettre en évidence les performances et les améliorations qui ont permis de remédier aux défauts de la DPC-C.

### IV.1. Principe de la MLI vectorielle SVM

La modulation de largeur d'impulsion vectorielle 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. [3]

Le principe de MLI vectorielle, 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 IV.1). [6]

Puisque le vecteur de commande de l'onduleur  $\vec{V}_r$  possède trois composantes booléennes et que chaque composante peut prendre le niveau 0 ou 1, donc il existe huit vecteurs de commande distincts. En adoptant le schéma équivalent simplifié où chaque bras est représenté par un interrupteur bipolaire, on définit les configurations possibles de l'onduleur (Figure IV.1). [3]



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 IV.2). Les vecteurs des tensions sont représentés par la relation suivante :

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

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  $T_e$ . [6]

Un vecteur de tension de référence  $V_{r\_ref}$  est calculé globalement et approximé sur une période de modulation  $T_e$  par un vecteur de tension moyen  $V_{r\_moy}$  ; ce dernier est élaboré par l'application des vecteurs de tension adjacents et des vecteurs nuls  $V_0$  et  $V_7$ . Les huit vecteurs de tension redéfinis par la combinaison des interrupteurs sont représentés dans le plan ( $\alpha$ - $\beta$ r) par la figure (IV.2). [6]

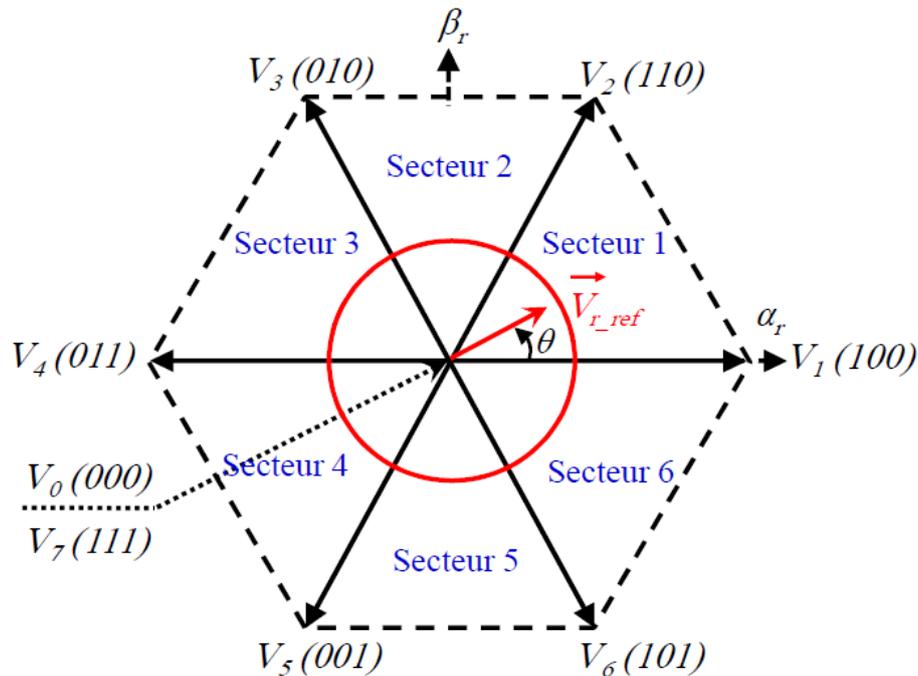


Figure IV.2 - Représentation des vecteurs de tension dans le repère ( $\alpha$ - $\beta$ ) [3]

La figure (IV.3) représente le cas où le vecteur référence se trouve dans le secteur 1 et les vecteurs adjacents sont représentés par  $V_1$  et  $V_2$ . La MLI vectorielle (SVM) consiste à projeter le vecteur de tension rotorique de référence désiré sur les deux vecteurs de tension 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 de commutation du CCM. [6]

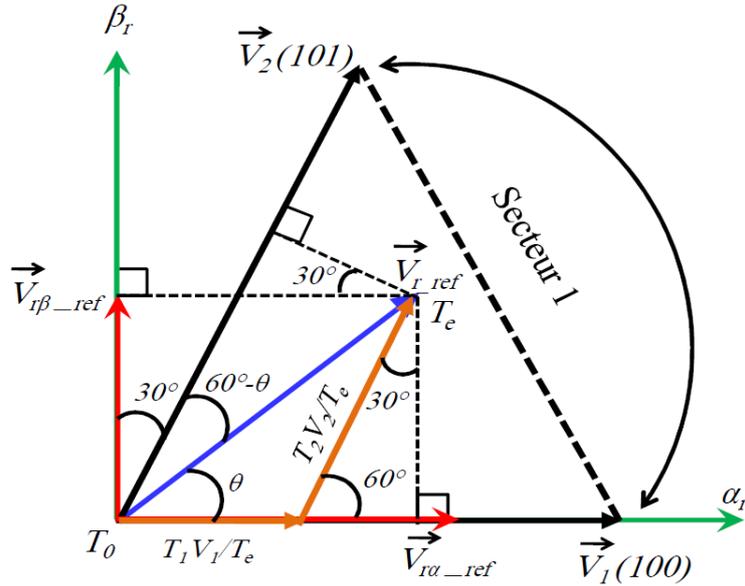


Figure IV.3 - Décomposition d'un vecteur de tension de référence  $V_{r\_ref}$  [3]

Dans le cas du secteur 1 (Figure IV.3), le vecteur de tension référence moyen est donné comme suit :

$$V_1 = \begin{cases} V_{r\_ref} T_e = T_0 V_0 + T_1 V_1 + T_2 V_2 \\ T_e = T_0 + T_1 + T_2 \end{cases} \quad (IV.2)$$

Où :

$T_e$  : Représente la période de commutation ;

$T_1$  : Temps d'application du vecteur  $V_1$  ;

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

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

En supposant qu'initialement, le vecteur  $V_{r\_ref}$  coïncide avec le vecteur  $V_1$ , deux séquences sont actives. La séquence qui correspond au vecteur  $V_1$  est appliquée durant la durée  $T_1$  et la séquence de roue-libre est appliquée durant la durée  $T_0$ . La séquence qui correspond au vecteur  $V_2$  est inactive car la durée  $T_2$  est nulle. Au fur et à mesure que le vecteur  $V_{r\_ref}$  s'éloigne du vecteur  $V_1$  et s'approche du vecteur  $V_2$ ,  $T_1$  diminue et  $T_2$  augmente. Quand le vecteur  $V_{r\_ref}$ , atteint le vecteur  $V_2$ ,  $T_1$  sera nul et  $T_2$ , sera maximal. [6]

## IV.2. Les étapes de la réalisation d'une MLI vectorielle (SVM)

### IV.2.1. Détermination des vecteurs tensions de références

A partir du modèle de l'onduleur à deux niveaux (équation II.41, chapitre II), nous pouvons définir les tensions aux bornes des enroulements de la machine. Pour obtenir ces tensions dans le repère ( $\alpha$ - $\beta$ r), nous utiliserons la transformation directe de Concordia (voir annexe B), ce qui, pour les huit vecteurs de commutation du CCM, fournira les résultats du tableau (IV.1). [6]

Tableau IV.1 - Calcul des Tensions rotoriques [3]

$S_a$	$S_b$	$S_c$	$V_{an}$	$V_{bn}$	$V_{cn}$	$V_{r\alpha}$	$V_{r\beta}$
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	$\frac{2U_{DC}}{3}$	$-\frac{U_{DC}}{3}$	$-\frac{U_{DC}}{3}$	$\frac{2U_{DC}}{3}$	0
1	1	0	$\frac{2U_{DC}}{3}$	$\frac{U_{DC}}{3}$	$-\frac{2U_{DC}}{3}$	$-\frac{U_{DC}}{3}$	$\frac{U_{DC}}{\sqrt{3}}$
0	1	0	$-\frac{U_{DC}}{3}$	$\frac{2U_{DC}}{3}$	$-\frac{U_{DC}}{3}$	$-\frac{U_{DC}}{3}$	$\frac{U_{DC}}{\sqrt{3}}$
0	1	1	$-\frac{2U_{DC}}{3}$	$\frac{U_{DC}}{3}$	$\frac{U_{DC}}{3}$	$-\frac{2U_{DC}}{3}$	0
0	0	1	$-\frac{U_{DC}}{3}$	$-\frac{U_{DC}}{3}$	$\frac{2U_{DC}}{3}$	$-\frac{U_{DC}}{3}$	$\frac{U_{DC}}{\sqrt{3}}$
1	0	1	$\frac{U_{DC}}{3}$	$-\frac{2U_{DC}}{3}$	$\frac{U_{DC}}{3}$	$\frac{U_{DC}}{3}$	$\frac{U_{DC}}{\sqrt{3}}$
1	1	1	0	0	0	0	0

### IV.2.2. Détermination des secteurs

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

$$\theta = \arctan\left(\frac{V_{ref(\beta)}}{V_{ref(\alpha)}}\right) \quad (IV.3)$$

Le tableau (IV.2) détermine le secteur  $Z(i)$  avec ( $i=1, \dots, 6$ ) pour les différentes angles  $\theta$  :

Tableau IV.2 - Identification du secteur [3]

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

### IV.2.3. 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 IV.4) ( $K_0$  est un facteur compris entre 0 et 1). [3]

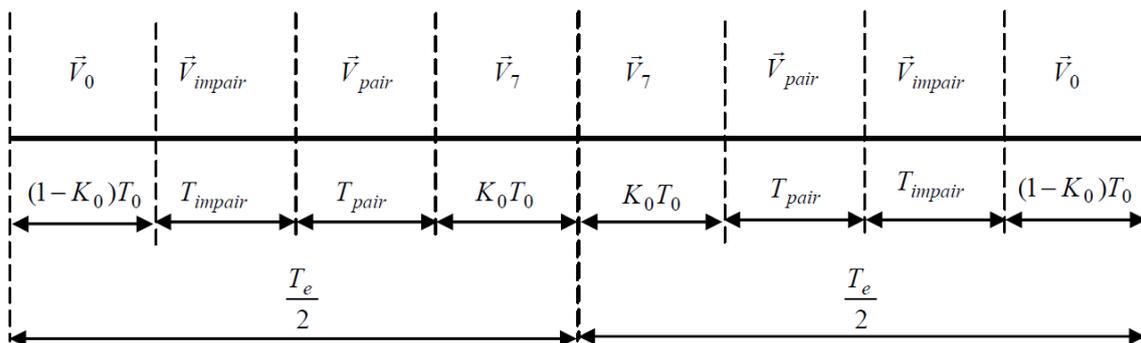


Figure IV.4 - Séquence d'application des vecteurs sur une période  $T_e$  [3]

Les trois rapports cycliques nécessaires sont donnés par :

$$\begin{cases} t_{a \text{ on}} = (T_e - (T_i + T_{i+1})) / 2 \\ t_{b \text{ on}} = t_{a \text{ on}} + T_i \\ t_{c \text{ on}} = t_{b \text{ on}} + T_{i+1} \end{cases} \quad (\text{IV.4})$$

En utilisant les relations trigonométriques, (la projection donnée par la figure IV.3) les temps d'application des vecteurs pour chaque secteur sont donnés par les relations suivantes : [7]

$$\begin{cases} T_i = \frac{3T_e |V_{ref}|}{2U_{Dc}} \left( \cos(\theta - \theta_i) - \frac{\sin(\theta - \theta_i)}{\sqrt{3}} \right) \\ T_{i+1} = \frac{3T_e |V_{ref}|}{U_{Dc}} \frac{\sin(\theta - \theta_i)}{\sqrt{3}} \\ T_0 = T_e - T_i - T_{i+1} \\ \theta_i = i \frac{\pi}{3} \end{cases} \quad (\text{IV.5})$$

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 IV.3). 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. Le tableau C.1 de l'annexe D 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  $T_e$ . [3]

$$\begin{aligned} t_{a \text{ on}} &= \frac{T_0}{4} & t_{a \text{ off}} &= \frac{3T_0}{4} + T_1 + T_2 \\ t_{b \text{ on}} &= \frac{T_0}{4} + \frac{T_1}{2} & t_{b \text{ off}} &= \frac{3T_0}{4} + \frac{T_1}{2} + T_2 \\ t_{c \text{ on}} &= \frac{T_0}{4} + \frac{T_1}{2} + \frac{T_2}{2} & t_{c \text{ off}} &= \frac{3T_0}{4} + \frac{T_1}{2} + \frac{T_2}{2} \end{aligned} \quad (\text{IV.6})$$

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

$$\begin{cases} \text{Si } t_{a \text{ on}} \leq t \leq t_{a \text{ off}}, \text{ alors } S_a = 1, \text{ sinon } S_a = 0 \\ \text{Si } t_{b \text{ on}} \leq t \leq t_{b \text{ off}}, \text{ alors } S_b = 1, \text{ sinon } S_b = 0 \\ \text{Si } t_{c \text{ on}} \leq t \leq t_{c \text{ off}}, \text{ alors } S_c = 1, \text{ sinon } S_c = 0 \end{cases} \quad (\text{IV.7})$$

#### IV.2.4. Génération des séries d'impulsions $S_a$ , $S_b$ et $S_c$

La détermination des signaux de commande  $S_a$ ,  $S_b$  et  $S_c$  en fonction des temps de commutation est donnée par la table suivante :

Tableau IV.3 - Signaux de commande des interrupteurs du CCM [3]

		Secteur					
		1	2	3	4	5	6
Signaux	$S_a$	$t_{a\ on}$	$t_{b\ on}$	$t_{c\ on}$	$t_{c\ on}$	$t_{b\ on}$	$t_{a\ on}$
	$S_b$	$t_{b\ on}$	$t_{a\ on}$	$t_{a\ on}$	$t_{b\ on}$	$t_{c\ on}$	$t_{c\ on}$
	$S_c$	$t_{c\ on}$	$t_{c\ on}$	$t_{b\ on}$	$t_{a\ on}$	$t_{a\ on}$	$t_{b\ on}$

#### IV.3 DPC-SVM de la MADA

On reprend les expressions des puissances statoriques (équation II.29 chapitre II) :

$$\begin{cases} P_s = (V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs}) \\ Q_s = (V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs}) \end{cases} \quad (IV.8)$$

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

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = \Phi_s \Rightarrow \Phi_s = \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Phi_{qs} = 0 \Rightarrow 0 = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (IV.9)$$

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

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad (IV.10)$$

A partir des équations du flux (IV.9), les expressions des tensions statoriques (II.24) du chapitre II deviennent :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s^* \Phi_s \end{cases} \quad (IV.11)$$

En remplaçant les expressions (IV.10) et (IV.11) dans (IV.8), les expressions des puissances statoriques en fonction des courants rotoriques s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{dr} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (IV.12)$$

De même :

$$\begin{cases} P_s^* = -V_s \frac{M}{L_s} i_{qr}^* \\ Q_s^* = -V_s \frac{M}{L_s} i_{dr}^* + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (IV.13)$$

Enfin :

$$\begin{cases} i_{qr}^* - i_{qr} = (P_s^* - P_s) \frac{-L_s}{V_s M} \\ i_{dr}^* - i_{dr} = (Q_s^* - Q_s) \frac{-L_s}{V_s M} \end{cases} \quad (IV.14)$$

Afin d'obtenir les tensions de référence  $V_{dr}^*$  et  $V_{qr}^*$ , on reprend les équations (II.25) et (II.26) du chapitre II comme suit :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{di_{dr}}{dt} - \omega_r \sigma L_r i_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{di_{qr}}{dt} + \omega_r \left( \sigma L_r i_{dr} + \frac{M \phi_{ds}}{L_s} \right) \end{cases} \quad (IV.15)$$

Avec :

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

- **Boucles internes de régulation des courants rotoriques**

Dans le système (IV.15), 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 : [1]

$$\begin{cases} R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{di_{dr}}{dt} = V_{dr} + \omega_r \sigma L_r i_{qr} \\ R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{di_{qr}}{dt} = V_{qr} - \omega_r \left( \sigma L_r i_{dr} + \frac{M \phi_{ds}}{L_s} \right) \end{cases} \quad (IV.16)$$

Les régulateurs linéaires sont utilisés pour contrôler les courants comme le montre la figure (IV.6), dans cette dernière on donne :

$$\begin{cases} \sigma_{dr} = R_r i_{dr} + \sigma L_r S i_{dr} \\ \sigma_{qr} = R_r i_{qr} + \sigma L_r S i_{qr} \end{cases} \quad (IV.17)$$

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

$$\begin{aligned} V_{dr}^* &= \sigma_{dr} - \omega_r \sigma L_r i_{qr} \\ V_{qr}^* &= \sigma_{qr} + \omega_r \left( \sigma L_r i_{dr} + \frac{M \phi_{ds}}{L_s} \right) \end{aligned} \quad (IV.18)$$

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 (IV.5). [1]

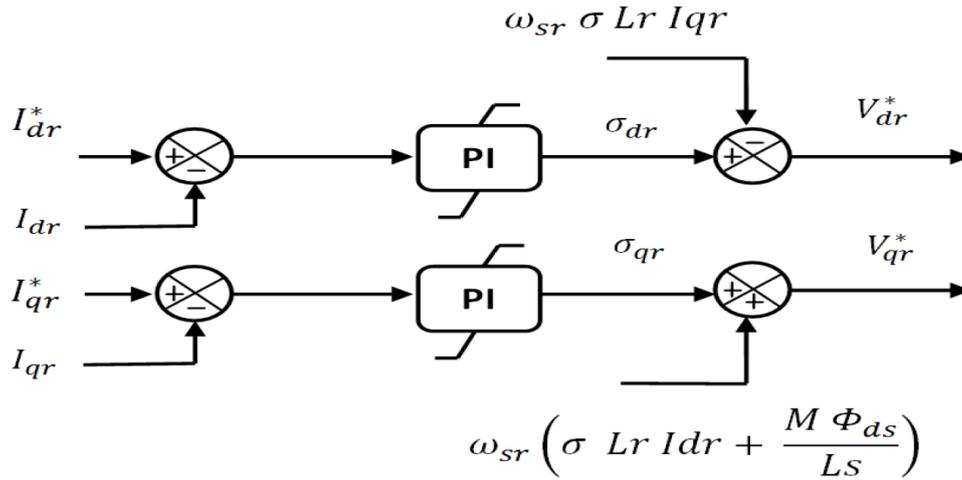


Figure IV.5 - Boucle de régulation des courants [1]

La boucle de régulation du courant  $i_{dr}$  à partir de l'équation (IV.16) est la suivante :

$$V_{dr}^* = R_r i_{dr} + \sigma L_r p i_{dr} = (R_r + \sigma L_r S) i_{dr} \quad (IV.19)$$

$$V_{dr}^* = (k_{dp} + \frac{K_{di}}{S}) (i_{dr}^* - i_{dr}) \quad (IV.20)$$

$$(R_r + \sigma L_r p) i_{dr} = (k_{dp} + \frac{K_{di}}{S}) i_{dr}^* - (k_{dp} + \frac{K_{di}}{S}) i_{dr} \quad (IV.21)$$

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

$$V_{qr}^* = R_r i_{qr} + \sigma L_r p i_{qr} = (R_r + \sigma L_r S) i_{qr} \quad (IV.22)$$

$$V_{qr}^* = (k_{dp} + \frac{K_{di}}{S}) (i_{qr}^* - i_{qr}) \quad (IV.23)$$

$$(R_r + \sigma L_r p) i_{qr} = (k_{dp} + \frac{K_{di}}{S}) i_{qr}^* - (k_{dp} + \frac{K_{di}}{S}) i_{qr} \quad (IV.24)$$

Les fonctions de transfert entre les courants rotoriques de référence et les courants mesurés sont données par : [1]

$$\frac{i_{dr}}{i_{dr}^*} = \frac{pk_{dp} + k_{di}}{p^2 \sigma L_r + p(R_r + k_{dp}) + k_{di}} \quad (IV.25)$$

$$\frac{i_{qr}}{i_{qr}^*} = \frac{pk_{dp} + k_{di}}{p^2 \sigma L_r + p(R_r + k_{dp}) + k_{di}} \quad (IV.26)$$

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

$$\begin{cases} K_{dp} = 2\xi\omega_n \sigma Lr - Rr \\ K_{di} = \omega_n^2 \sigma Lr \end{cases} \quad (IV.27)$$

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 (IV.6).

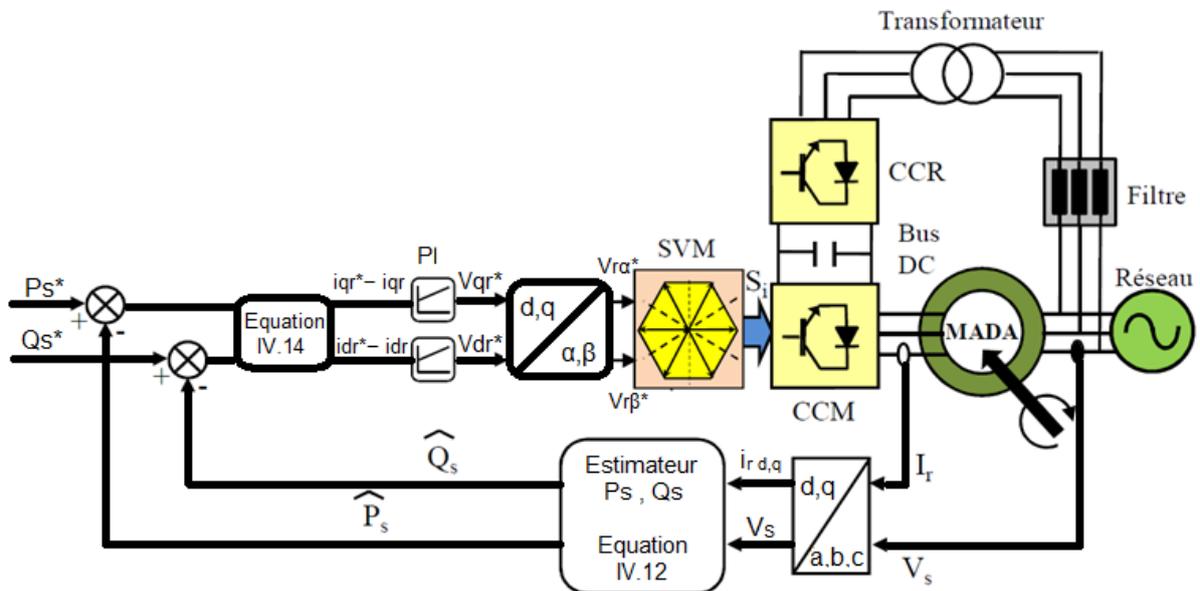


Figure IV. 6- Schéma bloc de la structure de contrôle DPC-SVM appliquée à la MADA [3]

#### IV.4. Résultats de simulation

Dans cette section, la commande DPC de la MADA de 5kW (annexe A) 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.

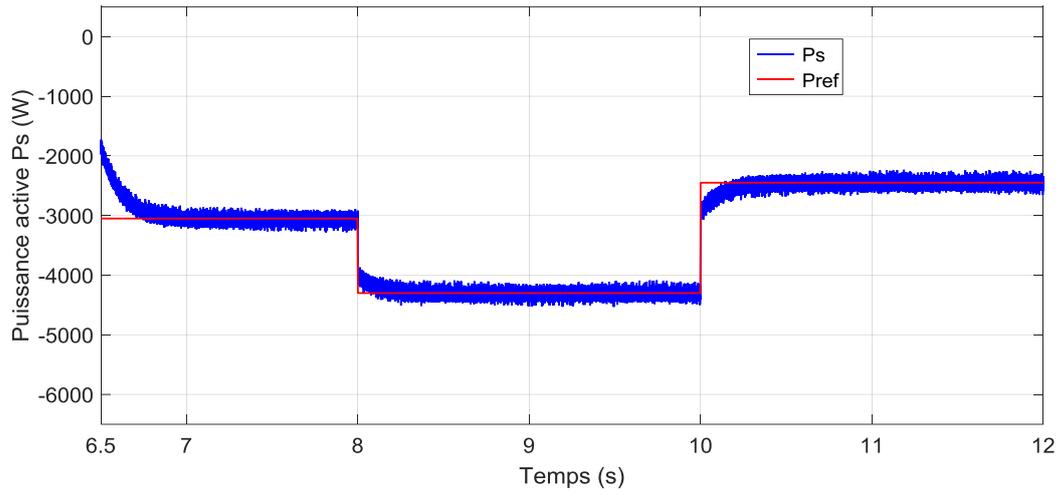


Figure IV.7- Puissance active  $P_s$  (W)

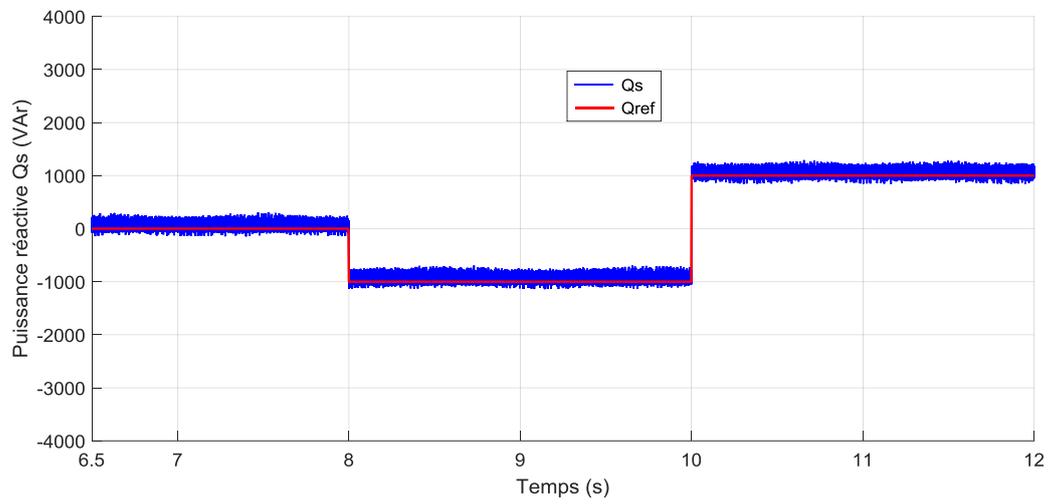


Figure IV.8 - Puissance réactive  $Q_s$  (Var)

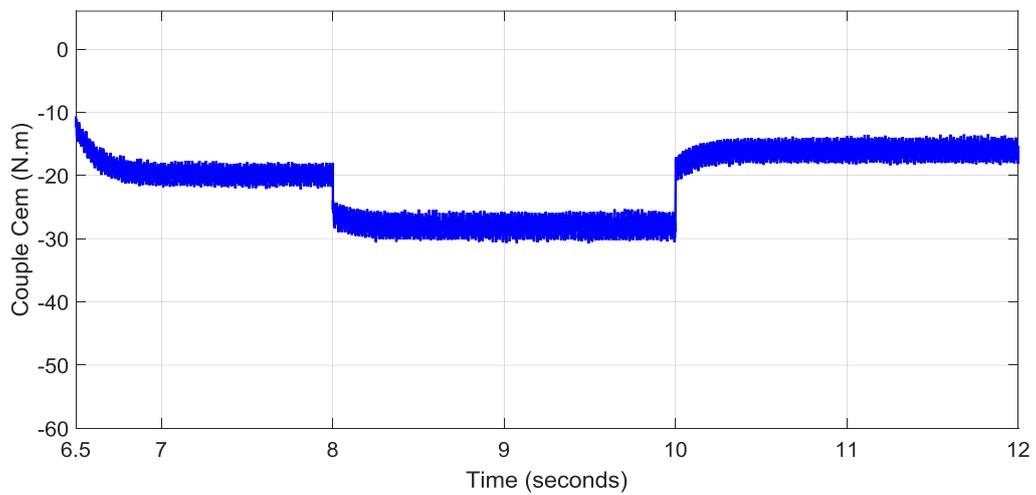


Figure IV.9 - Couple  $C_{em}$  (N.m)

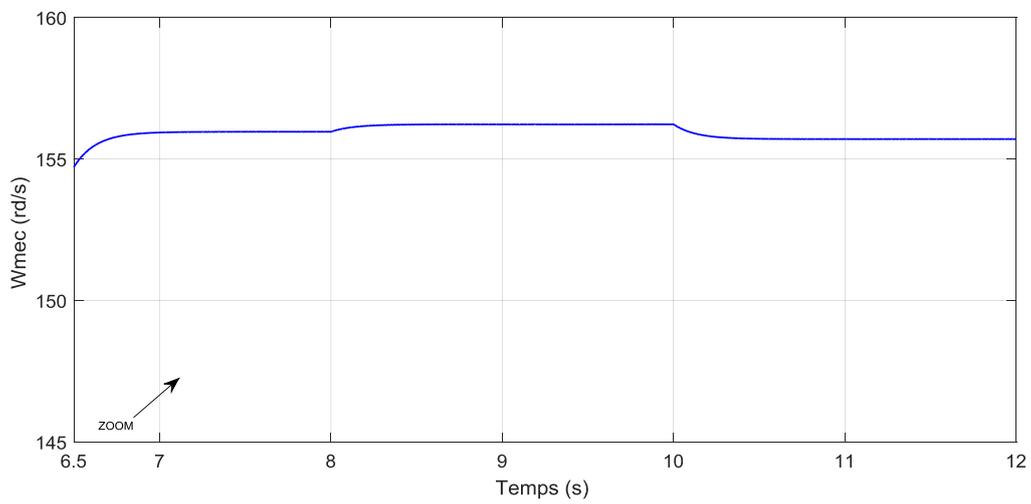
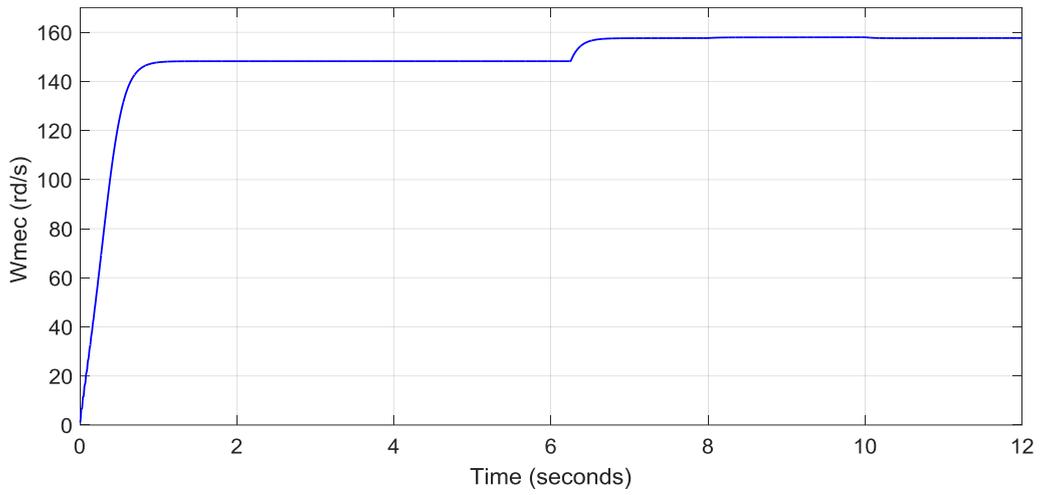


Figure IV.10- Vitesse de la machine  $W_{mec}$  (rd/s)

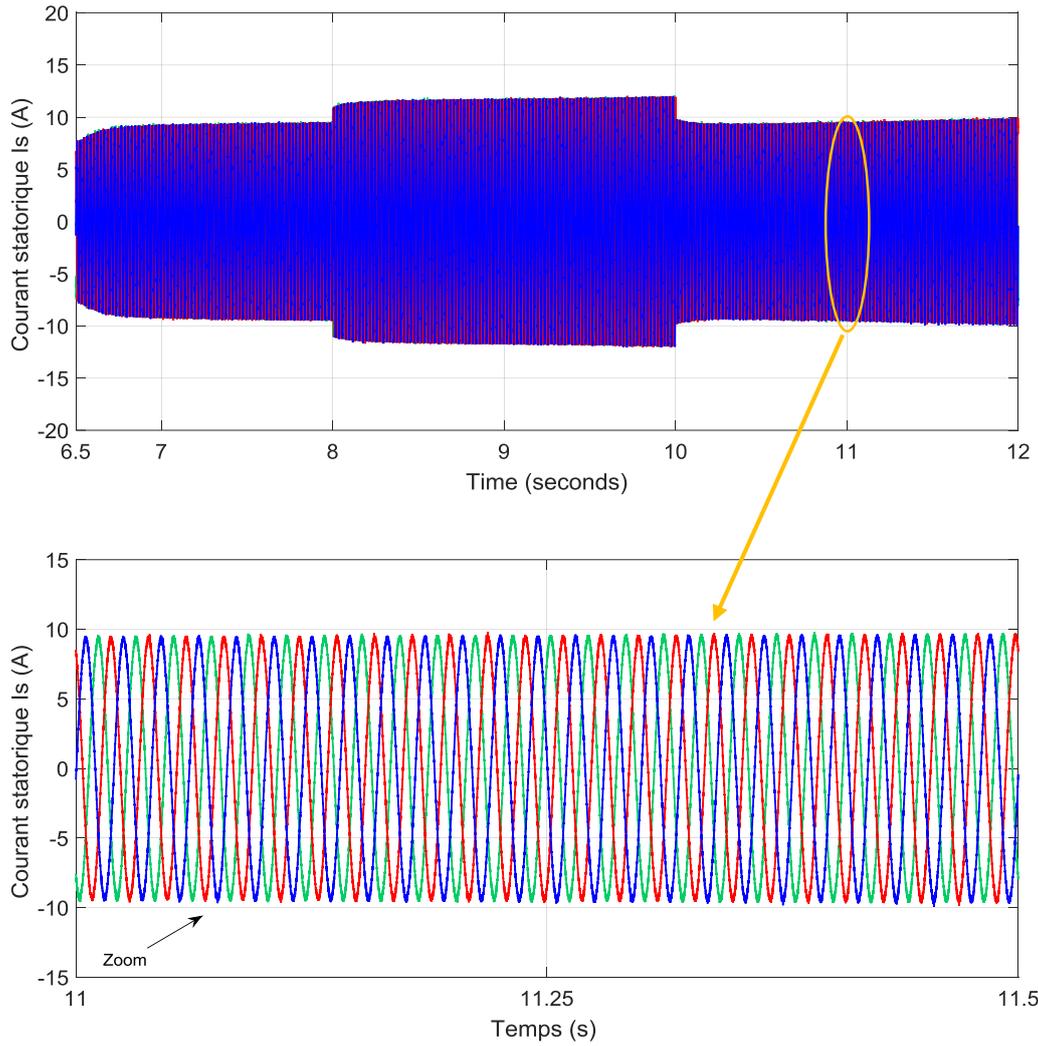


Figure IV.11 - Courant statorique  $I_s$  (A)

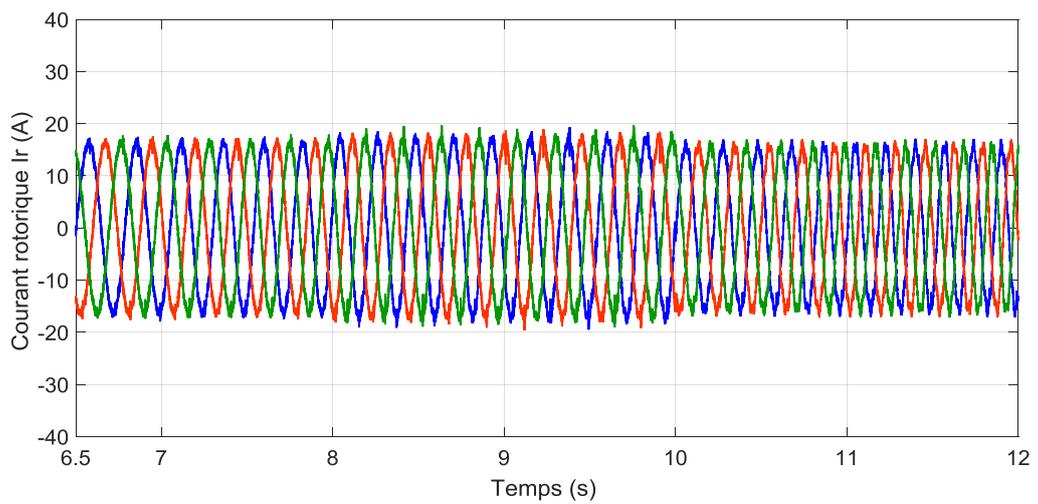


Figure IV.12 - Courant rotorique  $I_r$  (A)

- **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 (Voir figure II.16). 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 (Figure IV.7 et IV.8) ;
- Le courant statorique  $I_s$  et le courant rotorique  $I_r$  générés par la MADA ont une allure sinusoïdale (Figure IV.11 et IV.12) avec un faible taux d'harmoniques et moins d'ondulations grâce à la fréquence de commutation fixée par la SVM ;
- La figure (IV.9) illustre le couple électromagnétique de la MADA où les oscillations sont minimisées vu que le couple est l'image de la puissance active statorique. La vitesse de rotation de la machine varie simultanément en fonction de la vitesse du vent (Figure IV.10.).

## Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation de la technique de commande DPC-SVM appliquée sur le convertisseur « CCM » qui alimente le rotor de la MADA. Ces derniers démontrent que la méthode appliquée constitue une amélioration par rapport à la méthode DPC-C.

En effet, cette technique se résume par les étapes suivantes :

- Estimer les puissances active et réactive ( $P_s$  et  $Q_s$ ) et les comparer avec les valeurs de référence ;
- Tirer les expressions des courants rotoriques en fonction des puissances statoriques puis les introduire dans une boucle de régulation qui utilise deux régulateurs PI afin de déterminer les tensions de référence  $V_{dr}^*$  et  $V_{qr}^*$  ;
- Ces tensions de référence constituent l'entrée du bloc SVM qui va générer des séries d'impulsions à appliquer sur l'onduleur à deux niveaux en suivant les étapes suivantes :
  - Détermination du vecteur de tension de contrôle (vecteur de référence) ;
  - Détermination du secteur ;
  - Calcul des temps de commutation ;
  - Génération des séries d'impulsions  $S_a$ ,  $S_b$ ,  $S_c$ .

Ainsi, l'utilisation de la modulation vectorielle et de l'asservissement des courants rotoriques nous a permis d'obtenir une fréquence de commutation fixe et de minimiser les pulsations des puissances et les harmoniques des courants.

## Conclusion générale

Le présent projet a eu comme ambition la modélisation et la commande d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) intégrée dans un système d'énergie éolienne. Cette commande est appliquée sur le convertisseur côté machine (CCM) qui alimente le rotor de la MADA.

Dans un premier temps, l'état de l'art nous a permis de décrire les énergies renouvelables en général puis l'énergie éolienne, son développement, ses avantages ainsi que ses inconvénients. Par la suite, nous avons abordé l'aérogénérateur, ses composantes, ses types et les différentes machines utilisées comme génératrices.

A l'issue de ce premier chapitre, nous avons opté pour le choix de la chaîne de conversion éolienne basée sur la MADA.

Dans le second 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 troisième chapitre, nous avons présenté puis appliqué la technique de contrôle direct des puissances classique (DPC-C) sur le convertisseur (CCM) déjà modélisé à l'aide des comparateurs à hystérésis et une table de commutation.

Les principaux avantages de cette stratégie de commande sont la faible dépendance vis-à-vis des paramètres de la MADA et le découplage assuré entre la puissance active et réactive. Néanmoins, cette stratégie présente l'inconvénient de la fréquence de commutation variable, des fluctuations de puissance et un taux d'harmoniques élevé des courants.

A travers le dernier chapitre, nous avons présenté la méthode DPC-SVM qui nous a permis d'améliorer les résultats obtenus initialement en utilisant la DPC-C. Cette amélioration est due à la fréquence de commutation fixée par la SVM.

En effet, l'utilisation de la modulation vectorielle nous a permis d'obtenir une fréquence de commutation fixe et de minimiser les pulsations des puissances et les harmoniques des courants.

Ainsi, à l'issue du présent travail, le système obtenu permet de maximiser la puissance extraite du vent mais aussi d'améliorer la qualité de l'énergie fournie par le système éolien.

Enfin, le présent travail peut soulever d'autres problématiques qui pourront être traitées dans le futur, notamment, l'utilisation d'un onduleur à trois niveaux de structure NPC commandé par une SVM à trois niveaux. Ceci peut présenter plusieurs avantages dont la diminution des harmoniques des courants ainsi que la réduction de la charge au niveau des switches (IGBT) et permet par conséquent de diminuer les pertes par commutation.

## Bibliographie

- [1] A.Bouharchouche, "Etude et Commande d'un Système De Production Hybride Eolien-Photovoltaïque", Mémoire de Magistère, EMP Alger, Algérie, Février 2013.
- [2] El.H.Bounadja, « Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation en Régime Saturé », Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Polytechnique ENP d'Alger, Algérie, Janvier 2017.
- [3] Y. Djeriri, « Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle » ; Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université Djillali Liabès, Sidi Bel-Abbès, Algérie, Octobre 2015.
- [4] 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 » ; Thèse de Doctorat de l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, Algérie, Septembre 2011.
- [5] 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 » ; Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université Djillali Liabès, Sidi Bel-Abbès, Algérie, Février 2018.
- [6] A. Moualdia, « Stratégies de Commande DTC-SVM et DPC appliquées à une MADA utilisée pour la production d'énergie éolienne » ; Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Juin 2014.
- [7] Rodriguez, J., & Cortes, P. (2012). Predictive control of power converters and electrical drives (Vol. 40). John Wiley & Sons.
- [8] Portail Algérien des Energies Renouvelables, Centre de développement des énergies renouvelables (CDER).
- [9] EDF. [En ligne]. [Consulté le 22 juin 2019]. Disponible sur <https://www.edf.fr/>
- [10] EWEA. [En ligne]. [Consulté le 22 juin 2019]. Disponible sur <http://www.ewea.org/>
- [11] Karin OHLENFORST. GWEC. [En ligne]. [Consulté le 1 mai 2019]. Disponible sur <http://www.gwec.net/>
- [12] Journal éolien. [En ligne]. [Consulté le 22 juin 2019]. Disponible sur <https://www.journal-eolien.org/>
- [13] Planète énergie. [En ligne]. [Consulté le 22 juin 2019]. Disponible sur <https://www.planete-energies.com/fr>
- [14] WWEA. [En ligne]. [Consulté le 22 juin 2019]. Disponible sur <http://www.wwindea.org/WWEA>

## Annexes

- **Annexe A : Paramètres du système de conversion d'énergie éolienne utilisés**

**A.1. Paramètres de la MADA [1]****1. Grandeurs nominales de la MADA :**

5 kW, 220 / 380 – 50Hz, 1450 tr/min

Tension du bus continu : 400V

**2. Paramètres de la MADA:**

Résistance statorique :  $R_s = 0.435\Omega$ .

Résistance rotorique :  $R_r = 0.816\Omega$ .

Inductance cyclique statorique :  $L_s = 0.071H$ .

Inductance cyclique rotorique :  $L_r = 0.071H$ .

Inductance cyclique mutuelle :  $M = 0.069H$ .

Le nombre de paires de pôles est :  $P = 2$ .

**3. Constantes mécaniques de la MADA :**

Moment d'inertie :  $J_g = 0.089 \text{ kg.m}^2$ .

Coefficient de frottement visqueux :  $f_r = 0.001 \text{ N.m.s / rd}$ .

**A.2. Paramètres de la Turbine éolienne : [2]**

Paramètre	Valeur
Rayon ( $R$ )	3 m
Vitesse nominale de vent ( $v$ )	8 m/s
Multiplicateur ( $G$ )	5.4
Coefficient de puissance optimal ( $C_{p\_opt}$ )	0.475
Densité de l'air ( $\rho$ )	1.1225 Kg/m <sup>3</sup>
Inertie ( $J$ )	0.3125 kg.m <sup>2</sup>
Coefficient de frottement ( $f_v$ )	0.00673 N.m.s <sup>-2</sup>

- **Annexe B : La transformation de Concordia et de Clarke**

Transformation directe de Concordia	Transformation directe de Clarke
Passage du système triphasé $(a,b,c)$ vers le système biphasé $(\alpha, \beta)$	
$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \xrightarrow{C_{32}} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad c - \dot{a} - d \quad \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = C_{32} [x_{abc}]^T$	
$\text{Avec } C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$	$\text{Avec } C_{32} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$

La transformation de Concordia et de Clarke. [3]

- **Annexe C : Paramètres des régulateurs PI et les bandes d'hystérésis**

### C.1. Paramètres des Régulateurs PI des courants (voir figure IV.5)

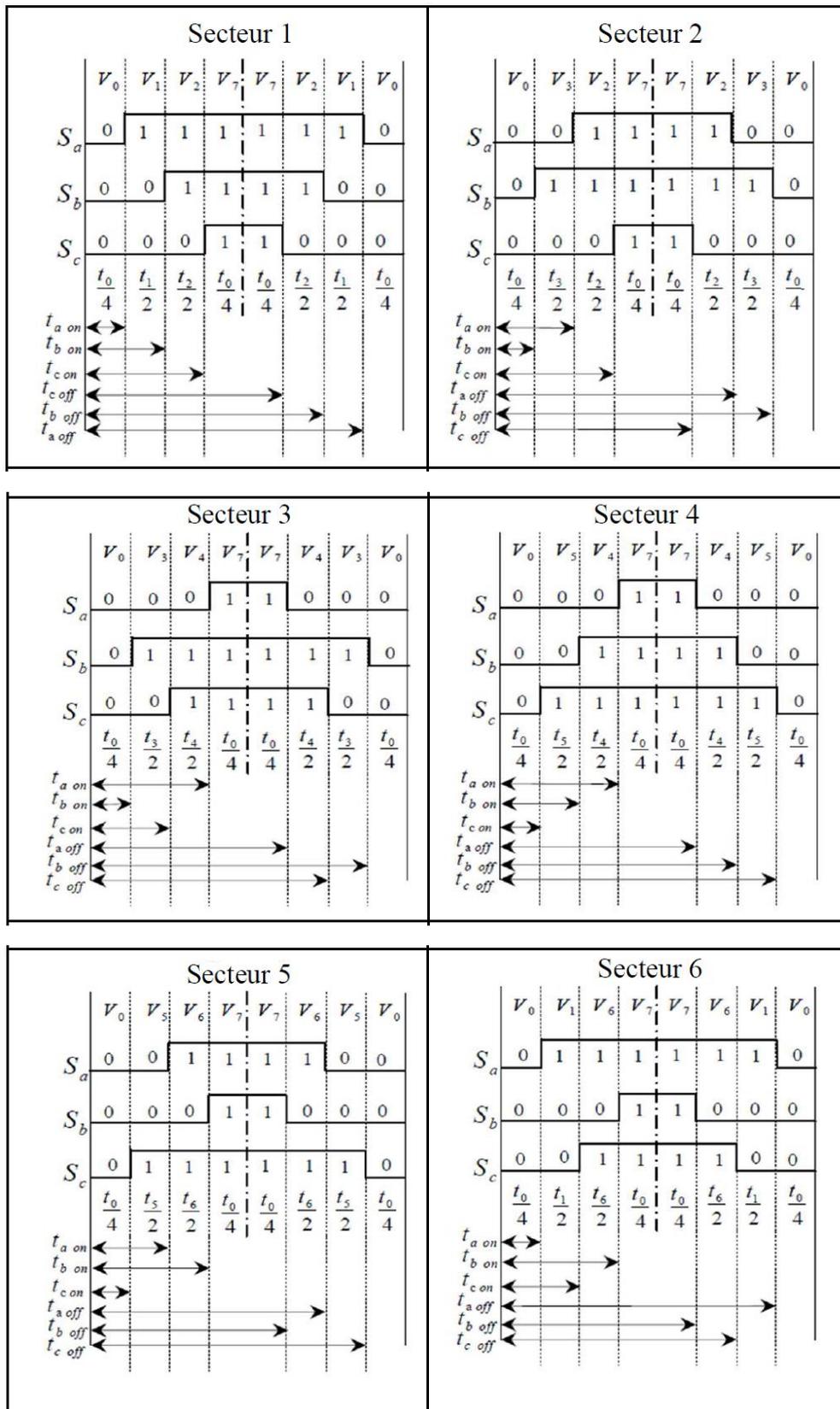
Facteur d'amortissement :  $\xi = 0.9$

Fréquence de coupure :  $\omega_n = 10 \text{ rd/s}$

### C.2. Largeurs des bandes d'hystérésis pour la DPC-C

Les bandes d'hystérésis représentent 5% de la puissance nominale.

- Annexe D Détermination des séquences de commutation par l'algorithme SVM :



Description des séquences de conduction des interrupteurs [3]