



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Commande Electrique

Thème

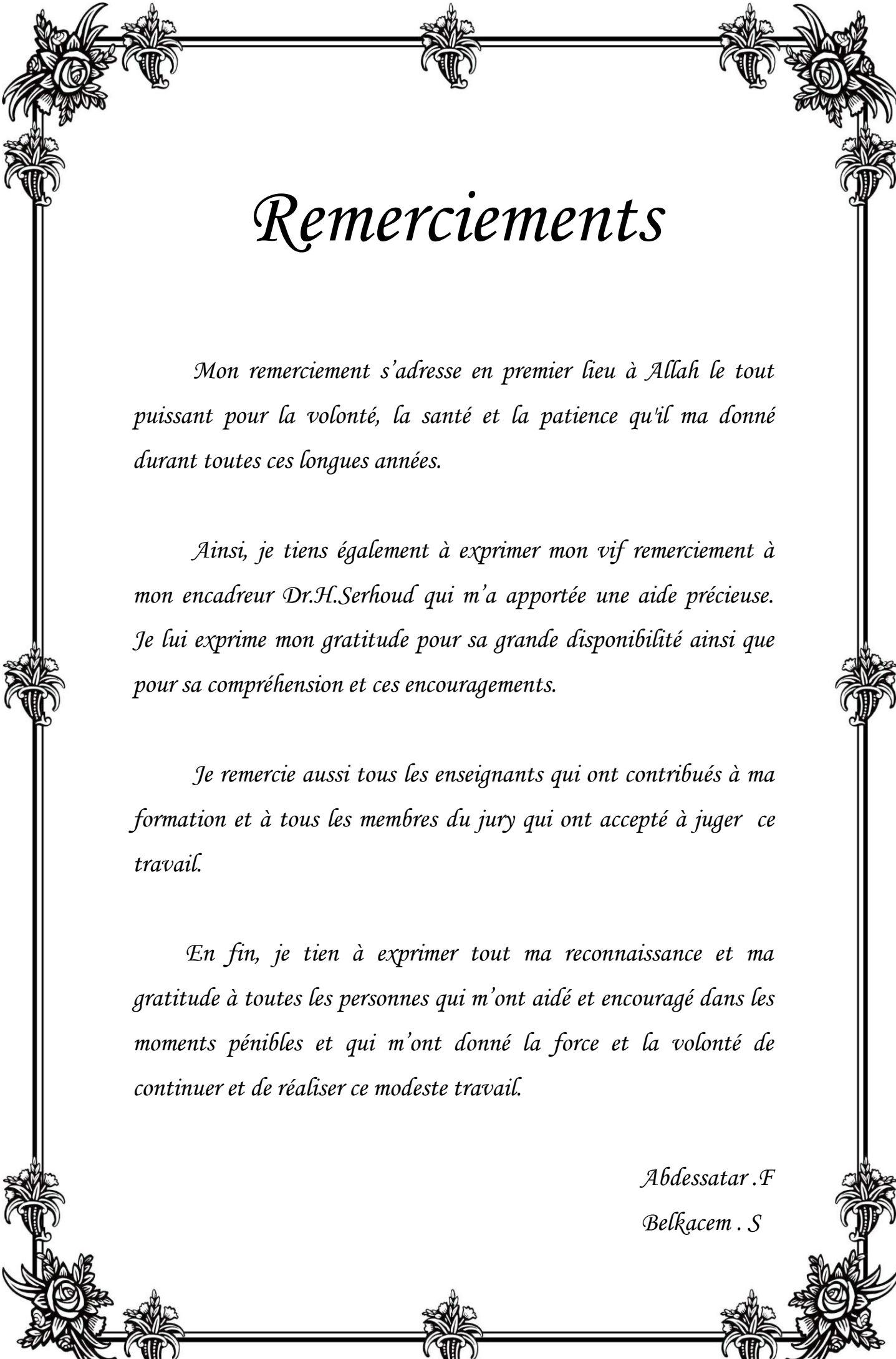
**Commande de la machine asynchrone à
double alimentation dans un site isole avec
entrainement par système a énergie
éolienne**

Réalisé par :
Fridjat Abdessatar
Salhi belkacem

Encadré par :
Serhoud Hicham

Soutenu en Mai 2017

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Remerciements

Mon remerciement s'adresse en premier lieu à Allah le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné durant toutes ces longues années.

Ainsi, je tiens également à exprimer mon vif remerciement à mon encadreur Dr.H.Serhoud qui m'a apportée une aide précieuse. Je lui exprime mon gratitude pour sa grande disponibilité ainsi que pour sa compréhension et ces encouragements.

Je remercie aussi tous les enseignants qui ont contribué à ma formation et à tous les membres du jury qui ont accepté à juger ce travail.

En fin, je tiens à exprimer tout ma reconnaissance et ma gratitude à toutes les personnes qui m'ont aidé et encouragé dans les moments pénibles et qui m'ont donné la force et la volonté de continuer et de réaliser ce modeste travail.

Abdessatar .F

Belkacem . S

Résumé

L'objet de ce travail concerne la production de l'énergie éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA), fonctionne comme générateur autonome. La DFIG peut être alimentée et commandée à partir du rotor avec un convertisseur de puissance et le stator connecté aux charges isolées. La commande vectorielle utilisée pour le contrôle des variations des tensions et de la fréquence lors des impacts de charge isolé, enfin les performances et la robustesse sont analysées par simulation à base du logiciel Matlab/Simulink.

Mots clés :

Machine Asynchrone à Double Alimentation, éolienne, commande vectorielle , onduleur de tension , charge isolé.

ملخص

يقدم هذا العمل دراسة طرق التحكم في المولد الحثي ثنائي التغذية (الماكنة اللاتزامنية ثنائية التغذية) المستعمل في تحويل الطاقة الهوائية لإنتاج الكهرباء ، باعتباره يعمل كمولد مستقل. و الماكنة اللاتزامنية ثنائية التغذية يمكن أن تعمل بطاقة الرياح والسيطرة عليها من الدوار مع محول الكهرباء والجزء الدوار متصلا بحمالة (بطارية) معزولة . و تغذية العضو الدوار كانت عن التحكم الشعاعي للسيطرة على التغيرات في الجهد والتردد في تأثير الحمل المعزول على الشبكة . اختتمت هذه الدراسة بمحاكاة المنضومة ,و استخلصنا من ذلك أن الماكنة اللاتزامنية ثنائية التغذية لها قدرة جيدة على العمل في الأماكن المعزولة على الشبكة.

الكلمات المفتاحية :

الماكنة اللاتزامنية ثنائية التغذية ، توربينات الرياح ، تحكم شعاعي ، موج الجهد ، حمولة معزولة .

LISTE DES SYMBOLES

V_1	La vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur.
V_2	La vitesse du vent en aval de l'aérogénérateur.
V_n	La vitesse du vent nominale de l'aérogénérateur.
V	La vitesse de l'air traversant l'aérogénérateur.
S_1	La section amont du tube d'air.
S_2	La section aval du tube d'air.
S	Surface balayée par le rotor de l'éolienne
F	Force exercée sur les pales d'une éolienne à incidence variable.
P	Masse volumique de l'air $1,225 \text{ kg.m}^{-3}$
R	Rayon de la surface balayée par la turbine.
P_{aero}	La puissance absorbée par l'aérogénérateur.
P_{mt}	La puissance disponible.
E_c	L'énergie cinétique de la masse d'air qui traverse l'aérogénérateur.
C_p	Le coefficient de puissance.
B	L'angle de calage des pales.
C_{p_max}	Le coefficient de puissance maximal de la turbine.
A	La vitesse relative de l'éolienne.
λ_{opt}	La vitesse relative optimale de l'éolienne.
$\Omega_{turbine}$	Vitesse de rotation de la turbine.
Ω_{mec}	Vitesse de rotation de l'arbre du générateur.
Ω_{opt}	Vitesse de rotation optimale de l'arbre du générateur.
G	Gain du multiplicateur.
C_{mec}	Couple résistant issue du multiplicateur.
$C_{aéro}$	Couple aérodynamique de la turbine.
f_{ro}	Fréquence rotoriques.
G	Glissement.
C_g	Couple issu du multiplicateur
J_t	l'inertie totale qui apparait sur le rotor de la génératrice
C_{vis}	le couple de frottement visqueux
C_{mes}	le couple électromagnétique produit par la génératrice

P_{mec}	Puissance mécanique disponible au niveau de l'arbre de la machine.
$[V_s]$	Vecteur tension statorique.
$[I_s]$	Vecteur courant statorique.
$[I_r]$	Vecteur courant rotorique.
$[\Phi_s]$	Vecteur flux statorique.
$[\Phi_r]$	Vecteur flux rotorique.
$[R_s]$	Matrice résistance statorique.
$[R_r]$	Matrice résistance rotorique.
$[L_{ss}]$	Matrice inductance statorique.
$[L_{rr}]$	Matrice inductance rotorique.
$[M_{sr}]$	Matrice inductance mutuelle stator-rotor.
M_0	Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor (leurs axes magnétiques sont, alors, alignés).
$P[\theta_s]$	Matrice de PARK correspondant à l'enroulement statorique.
$P[\theta_r]$	Matrice de PARK correspondant au rotor.
P	Nombre de paires de pôles.
s, r	Indice relatif au stator et rotor respectivement.
D	Indice de l'axe direct.
Q	Indice de l'axe en quadrature.
θ_s	L'angle électrique entre l'axe a_s et l'axe d.
θ_r	L'angle électrique entre l'axe a_r et l'axe d.
θ	La position angulaire du rotor par rapport au stator.
ω_s	Pulsation électrique statorique.
ω_r	Pulsation de glissement ($\omega_s - \omega$).
Ω	Vitesse angulaire de rotation.
Ω	Vitesse de rotation mécanique.
C_{em}	Couple électromagnétique.
C_{vis}	Couple des frottements visqueux.
R_s	Résistance statorique.
R_r	Résistance rotorique
l_s	Inductance propre d'une phase statorique.
l_r	Inductance propre d'une phase rotorique.
M_s	Inductance mutuelle entre deux phases statorique.

M_r	Inductance mutuelle entre deux phases rotorique.
M_{sr}	Inductance mutuelle maximale lorsque l'axe as coïncide avec l'axe ar.
L_s	Inductance cyclique statorique.
L_r	Inductance cyclique rotorique.
L_m	Inductance cyclique mutuelle entre le stator et le rotor.
P_s	Puissance active statorique.
Q_s	Puissance réactive statorique.
f_{mm}	Force magnéto motrice.
K_{ond}	Gain statique de l'onduleur.
V_{ref}	Tension de référence.
S	L'opérateur de LAPLACE.
J	Moment d'inertie totale.
PI	Proportionnel Intégral.
Σ	Coefficient de dispersion.
T_s	Constante du temps statorique
T_r	Constante du temps rotorique
Z	Coefficient d'amortissement.
ω_0	Pulsation propre.
K_p, K_i	Gains du régulateur PI (proportionnelle - intégrale).
τ_i	Constante de temps du régulateur.
F	Coefficient de frottement.
J_{mach}	Moment d'inertie de la machine.
$J_{turbine}$	Moment d'inertie de la turbine.
MADA	Machine asynchrone a double alimentation.
CCM	convertisseur coté MADA
CCR	convertisseur coté réseau
MPPT	la commande d'extraction du maximum de puissance du vent par un contrôle dit
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor (FR. Transistor à gachet isolé).
PLL	Boucle à verrouillage de phase
VOC	Commande (controle) à tension orientée
GTO	Gate Turn Off (FR. Gachet bloqué).
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion.

C_r	Couple résistant
N	Indice du point neutre.
M	Indice de modulation.
R	Taux de modulation.
THD	Taux d'harmonique.
f_m	Fréquences de porteuse ou de modulation.
f_r	Fréquence du fondamentale.
A_r	Valeur crête de la tension de référence.
A_m	Valeur crête de la tension de commande.
F	Fréquence du réseau.
$\overline{u_s}$	La tension complexe statorique
$\overline{i_s}$	L'intensité du courant complexe du stator
$\overline{E_s}$	La force électromotrice complexe
NPC	Onduleur multi niveaux
GADA	Générateur Asynchrone à Double Alimentation
$\tilde{e}$	Tension instantanée de phase du réseau estimée
$\bar{e}$	Vecteur de la tension de ligne
h_d et h_d	La largeur de la bande hystérésis pour les puissances active et réactive.
i_{ch}	Courant de la charge non-l inéaire
i_{dc}	Courant actif nécessaire pour charger le bus continu
i_{dqr}	Composantes du courant rotorique dans le repère (d, q)
i_{dqs}	Composantes du courant statorique dans le repère (d, q)
i_{abcs}	Courants instantanés des phases statoriques
i_{abcr}	Courants instantanés des phases rotoriques
P_v	Puissance portée par le vent
$[P(\theta)]^{-1}$	Transformation de Park inverse
$[P(\theta)]$	Transformation de Park directe

LISTE DES FIGURES

Figure I.1	Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	3
Figure I.2	Les deux types d'éolienne.....	5
Figure I.3	Schéma de principe du rotor de Darius.....	6
Figure I.4	Schéma de principe du rotor de Savonius.....	6
Figure I.5	Eolienne à axe horizontal.....	7
Figure I.6	Schéma d'ensemble d'une éolienne.....	9
Figure I.7	Eléments d'une nacelle.....	10
Figure I.8	Tube de courant d'air autour d'une éolienne.....	11
Figure I.9	Coefficient de puissance.....	13
Figure I.10	Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.....	13
Figure I.11	Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la Vitesse du vent.....	14
Figure I.12	Flux d'air sur un profil de pale " stall ".....	15
Figure I.13	Variation de l'angle de calage d'une pale.....	16
Figure I.14	Influence de l'angle de calage sur le coefficient de puissance.....	16
Figure I.15	Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage.....	17
Figure I.16	Système éolien basé sur la machine synchrone.....	17
Figure I.17	modes de fonctionnement de la MADA.....	19
Figure I.18	MADA à double stator.....	20
Figure I.19	MADA Brushless.....	20
Figure I.20	Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur.....	21
Figure I.21	Structure de Scherbius avec MLI.....	22
Figure I.22	MADA, structure de Kramer.....	22
Figure I.23	Puissance produite par la turbine.....	23
Figure I.24	Puissance produite par la MADA en fonction de la vitesse du vent.....	24
Figure II.1	Schéma de la turbine éolienne.....	26
Figure II.2	Coefficient de puissance en fonction du ratio de vitesse de la turbine λ	27
Figure II.3	Schéma bloc du modèle de la turbine.....	29
Figure II.4	Modèle de PARK de la MADA.....	33
Figure II.5	Principe de la commande vectorielle.....	38
Figure II.6	Analogie entre la commande vectorielle d'une MADA et la commande d'une MCC.....	39

Figure II.7	Orientation du flux statorique.....	40
Figure II.8	Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.....	44
Figure II.9	Schéma de principe de la commande directe.....	45
Figure II.10	Schéma de la commande indirecte en boucle ouverte.....	46
Figure II.11	Schéma de la commande indirecte en boucle fermée.....	47
Figure II.12	Schéma bloc d'un système régulé par un PI.....	47
Figure II.13	Schéma bloc d'un système régulé par un PI.....	48
Figure II.14	Schéma électrique de la liaison de rotor via un convertisseur MLI.....	50
Figure II.15	Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.....	50
Figure II.16	Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulo-sinusoïdale à une porteuse.....	53
Figure II.17	Résultat de simulation d'une commande vectorielle de la MADA.....	54
Figure III.1	Architecture de commande du système éolien.....	56
Figure III.2	Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable.....	57
Figure III.3	Diagramme de conversion de puissance.....	59
Figure III.4	Stratégies de commande de la turbine étudiée.....	59
Figure III.5	Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse.....	61
Figure III.6	Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.....	63
Figure III.7	Principe de la commande du CCM.....	64
Figure III.8	Structure classique d'une PLL triphasée.....	67
Figure III.9	Schéma fonctionnel de la commande à tension orientée (VOC).....	68
Figure III.10	Schéma fonctionnel pour le réglage du courant.....	70
Figure III.11	Schéma synoptique de la commande du bus continu.....	71
Figure III.12	Contrôle de Bus continu.....	73

Figure III.13	structure de la chaîne globale.....	74
Figure III.14	Résultat de simulation de vitesse d'un aérogénérateur de la MADA.....	76
Figure IV.1	Éolienne isolée à base de la GADA.....	80
Figure IV.2	Schéma de principe du système éolien en mode isolée à vide.....	82
Figure IV.3	Résultat de simulation de vitesse d'un aérogénérateur de la GADA à vide.....	83
Figure IV.4	Schéma de principe du système éolien en mode isolée en charge.....	85
Figure IV.5	Résultat de simulation de vitesse d'un aérogénérateur de la GADA en charge..	87
Figure IV.6	Schéma de Système de génération GADA autonome	88
Figure IV.7	Résultat de simulation de vitesse d'un aérogénérateur de GADA autonome.....	91

SOMMAIRE

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	01
----------------------------	----

CHAPITRE I:

Les énergie éolienne à vitesse variable

I.1. INTRODUCTION.....	03
I.2. Descriptif et qualités de l'énergie éolienne.....	03
I.2.1. Définition de l'énergie éolienne.....	03
I.2.2. Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	03
I.3. Les différents types des turbines éoliennes.....	04
I.3.1. Les éoliennes à axe vertical.....	05
I.3.1.1. Le rotor de Darrieus.....	05
I.3.1.2. Le rotor de Savonius.....	06
I.3.2. Les éoliennes à axe horizontal.....	06
1.4. Les différentes technologies d'éoliennes.....	07
1.4.1 Les éoliennes à vitesse fixe.....	08
1.4.1.1 Les avantages d'éoliennes à vitesse fixe.....	08
1.4.1.2 Les inconvénients d'éoliennes à vitesse fixe.....	08
1.4.2 Les éoliennes à vitesse variable	08
1.4.2.1 Les avantages d'éoliennes à vitesse variable.....	08
1.4.2.2 Les inconvénients d'éoliennes à vitesse variable.....	08
I.5. Les principaux composants d'une éolienne.....	09
1.6. Conversion de l'énergie éolienne.....	11
1.6.1. Loi de BETZ.....	11
1.6.2. Production d'énergie mécanique.....	14
1.6.3. Utilité de la vitesse variable.....	14
1.6.4. Modes de régulation et protection.....	15

1.6.4.1 Système à décrochage aérodynamique « <i>stall</i> ».....	15
1.6.4.2. Système d'orientation des pales « <i>Pitch</i> ».....	15
1.7. Conversion électromécanique.....	16
1.7.1. Systèmes de génération d'électricité.....	16
1.7.1.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone.....	16
1.7.1.2. Systèmes utilisant la machine synchrone.....	17
1.7.1.3. Systèmes utilisant des machines spéciales.....	17
1.7.2. Utilisation de MADA dans la conversion électromécanique	17
1.7.2.1. Principe de fonctionnement.....	18
1.7.2.1.1. Moteur en hypo synchronisme.....	18
1.7.2.1.2. Moteur en hyper synchronisme.....	18
1.7.2.1.3. Génératrice en hypo synchronisme.....	18
1.7.2.1.4. Génératrice en hyper synchronisme.....	19
1.7.2.2. Différentes topologies de la MADA.....	19
1.7.2.2.1. Machine asynchrone à double alimentation type « Brushless ».....	20
1.7.2.2.2. Machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné.....	21
1.7.2.2.2.1. Machine asynchrone à double alimentation –Structure Scherbius avec cyclo-convertisseur.....	21
1.7.2.2.2.2. Machine asynchrone à double alimentation –Structure Scherbius avec convertisseur MLI.....	21
1.7.2.2.2.3. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer.....	22
1.7.3. Application de la MADA dans le domaine éolien.....	23
1.8. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	24
1.8.1. Avantages.....	24
1.8.2. Inconvénients.....	25
1.9.CONCLUSION.....	25

CHAPITRE II:

Modélisation et commande vectorielle de la MADA

II.1. Introduction :	26
II.2. Modélisation de la turbine :	26

II.2.1. La puissance d'une éolienne :	26
II.2.2. Modèle de multiplicateur:.....	28
II.2.3. Equation dynamique de l'arbre :	28
II.3. Modélisation de la MADA :	29
II.3.1. Hypothèses simplificatrices :.....	30
II.3.2. Modèle mathématique de la MADA :	30
II.3.2.1. Equations électriques de la machine :.....	31
II.3.2.2. Equations mécaniques de la MADA :	32
II.3.3. Transformation de Park :	32
II.3.4. Le choix du référentiel :.....	33
II.3.4.1. Référentiel lié au stator :.....	34
II.3.4.2. Référentiel lié au rotor :.....	34
II.3.4.3. Référentiel lié au champ tournant :.....	34
II.3.5. Equations électriques :.....	34
II.3.5.1. Equations électriques sous forme matricielle :.....	35
II.3.6. Equations magnétiques :.....	36
II.3.7. Expression de la puissance active et réactive :.....	36
II.3.8. Expression du couple électromagnétique	36
II.4. Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation.....	37
II.4.1. Généralités sur la commande vectorielle	37
II.4.1.1. Principe de la commande vectorielle.....	37
II.4.1.2. Variantes de la commande vectorielle	38
II.4.2. Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation	38
II.4.2.1. Différents repères de référence	39
II.4.2.2. Lois de la commande vectorielle appliquée à la MADA	40
II.4.2.3. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique.....	41
II.4.2.4. Relation entre tensions rotoriques et courants rotoriques	42

II.4.2.5. Types de commande vectorielle.....	44
II.4.2.5.1. Commande vectorielle directe	44
II.4.2.5.2. Commande indirecte	45
II.4.2.5.2.1. Commande indirecte en boucle ouverte	45
II.4.2.5.2.2. Commande indirecte en boucle fermée	46
II.4.2.6. Mise en place d'un régulateur Proportionnel-Intégral	47
II.4.2.6.1. Calculs des régulateurs	48
II.4.2.6.2. Synthèse du régulateur PI pour le contrôle de la puissance.....	48
II.5. Commande vectorielle de la MADA avec onduleur a deux niveaux	49
II.5.1. Onduleur a deux niveaux	50
II.5.2. Stratégie de commande MLI	51
II.5.3. Algorithme de commande	52
II.6. Simulation de la commande de la MADA.....	53
II.6.1. Résultats de simulations.....	53
II.6.2. Interprétations des Résultats.....	55
II.7. Conclusion	55

CHAPITRE III:

Commande du système éolien a vitesse variable basé sur une MADA

III.1. Introduction.....	56
III.2. Architecture du dispositif de commande.....	56
III.3. Extraction du maximum de la puissance du vent.....	57
III.4. Stratégie de maximisation de puissance "MPPT".....	58
III.4.1. Bilan de puissance	58
III.4.2. Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique	60

III.4.2.1. Conception du correcteur de vitesse	61
III.4.3. Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique	61
III.5. Commande du convertisseur côté MADA –CCM [29].....	64
III.6. Commande du convertisseur côté réseau CCR.....	65
III.6.1. Redresseur de tension	65
III.6.1.1. Modélisation du redresseur	65
III.6.1.2. Commande du redresseur	65
III.7. Principe de fonctionnement d'un redresseur MLI et avantage	65
III.8. Filtre (côté réseau)	66
III.8.1. Modélisation du filtre passif (côté réseau).....	66
III.9. Méthode de synchronisation	66
III.9.1. Boucle à verrouillage de phase PLL	66
III.9.2. Contrôle vectoriel du redresseur MLI.....	67
III.9.2.1. Schéma fonctionnel de contrôle à tension orientée (VOC).....	68
III.9.2.1.1. Etude de la boucle des courants.....	69
III.9.2.1.2. Boucle de régulation de tension du bus continu.....	70
III.9.2.1.2.1. Modélisation du bus continu	71
III.10. Système de la chaîne globale	74
III.11. Simulation du système éolien basé sur une MADA.....	74
III.11.1. Résultats de simulation	75
III.11.2. Interprétations des Résultats.....	77
III.12. Conclusion.....	77

CHAPITRE IV:**Commande de la GADA fonctionnement autonome intégré dans un système éolienne**

IV.1.Introduction.....	79
IV.2 Chaîne de conversion de l'énergie éolienne à base de la MADA en mode isolé....	79
IV.3 Les éoliennes en fonctionnement isolé et autonome	80
IV.4. Modèle mathématique de la GADA à vide.....	81
IV.4.1.Résultats de simulation	82
IV.4.2.Interprétations des Résultats.....	84
IV.5. Modèle mathématique de la GADA en charge	84
IV.5.1.Résultats de simulation	86
IV.5.2.Interprétations des Résultats.....	87
IV.6. Système de génération GADA autonome.....	88
IV.6.1.Résultats de simulation de GADA autonome.....	89
IV.6.2.Interprétations des Résultats.....	91
IV.7.conclusion.....	91
CONCLUSION GENERALE	92
Annexe.....	94
Bibliographiques.....	95

Introduction générale

Introduction générale

Aujourd'hui plus de 80% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles comme le pétrole, le charbon et le gaz naturel.

Alors, on a besoin de chercher d'autres solutions alternatives aux énergies fossiles pour produire l'électricité avec des sources renouvelables non polluantes et économiques en exploitant bien les éléments de la nature comme l'eau, le soleil et le vent.

L'énergie éolienne est l'une des plus importantes et les plus prometteuses des sources d'énergie renouvelable à travers le monde en termes de développement.

Dans ce contexte général, cette présente étude s'intéresse à la filière éolienne. La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en électricité à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de ce type de source et la qualité de l'énergie fournie.

Dans le domaine de la production de l'énergie électrique à vitesse variable, on leur préfère plutôt des machines à rotor bobiné doublement alimentées qui offrent d'excellents compromis performances / coût.

Les machines asynchrones sont les plus utilisées dans les secteurs industriels en raison de leur fiabilité et leur construction simple.

De nos jours, plusieurs travaux ont été orientés vers l'étude de la machine asynchrone à double alimentation. Cette dernière et grâce au développement des équipements de l'électronique de puissance et l'apparition des techniques de commande modernes présente une solution idéale pour les entraînements à haute puissance et à vitesse variable. L'intérêt de telles machines est qu'elles assurent un fonctionnement à très basse vitesse. L'application potentielle de la MADA a été un sujet de recherche au long de la dernière décennie. L'association des machines asynchrones à double alimentation à des convertisseurs statiques permet de donner différentes stratégies de commande et présente un autre avantage d'utilisation de ces machines.

Afin d'obtenir une machine asynchrone à double alimentation dont les performances sont semblables à une machine à courant continu, il est nécessaire d'assurer le découplage entre le flux et le couple électromagnétique. C'est l'idée de l'apparition de la technique de la commande vectorielle, ou la commande par orientation du flux. Cette technique est proposée en 1973 par Blaschke et Hasse.

Nos travaux étant centrés sur l'utilisation de la conversion de l'énergie éolienne pour des sites isolés donc, ce travail est structuré en quatre chapitres, ces derniers sont énoncés de la manière suivante :

- Le premier chapitre est représentée Les énergie éolienne à vitesse variable (le généralité sur les systèmes éoliens).
- Le deuxième chapitre est représenté la Modélisation et commande vectorielle de la MADA
- Dans le troisième chapitre Commande du système éolien à vitesse variable basé sur MADA
- Le quatrième chapitre est représenté Commande de la GADA fonctionnement autonome intégré dans un système éolien
- Enfin, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale suivie de quelques perspectives envisagées dans notre travail futur.

Chapitre I
Les énergie éolienne
à vitesse variable

I.1. INTRODUCTION :

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

I.2. Descriptif et qualités de l'énergie éolienne :

I.2.1. Définition de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [1].

I.2.2. Principe de fonctionnement d'une éolienne :

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-1).

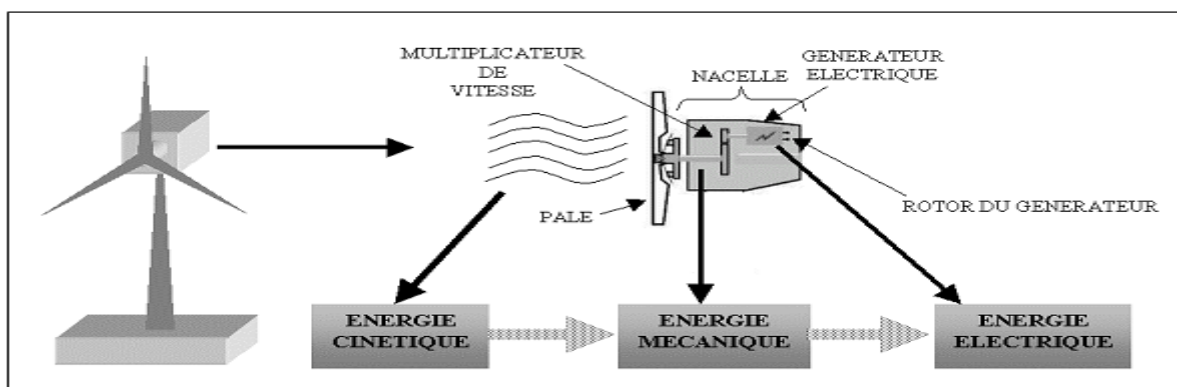


Fig. I-1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). 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. On distingue deux grands types d'éoliennes :

Les éoliennes à axe vertical : ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [2].

Les éoliennes à axe horizontal beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol [3].

Dans la plupart des cas, le bruit du vent est supérieur à celui engendré par l'éolienne. Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale :

- 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.

I.3. Les différents types des turbines éoliennes :

Selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice on classe les éoliennes en deux types ; les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal (Figure I-2). Que l'éolienne soit à axe vertical ou horizontal, il s'agit de générer un couple moteur pour entraîner la génératrice [4].



Eolienne à axe horizontal

Eolienne à axe vertical

Fig. I-2 : Les deux types d'éolienne [5]

I.3.1. Les éoliennes à axe vertical :

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité, elles présentent les avantages suivants:

- Ne pas nécessiter de système d'orientation des pales.
- Avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance donc facilement accessibles.

Mais ces éoliennes possèdent quelque inconvénient comme:

- L'éolienne ne démarre pas automatiquement, parce qu'au démarrage la génératrice fonctionne comme un moteur absorbant ainsi du courant du réseau.
- le rendement des éoliennes à axe vertical est faible par rapport aux éoliennes à axe horizontal[6].

Les deux types de structures d'éoliennes à axe vertical les plus répandues reposent sur les principes de traînée différentielle ou de la variation cyclique d'incidence [4].

I.3.1.1. Le rotor de Darius :

C'est la structure la plus répandue; le fonctionnement de son rotor est basé sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif (Figure. I-3).

Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe.

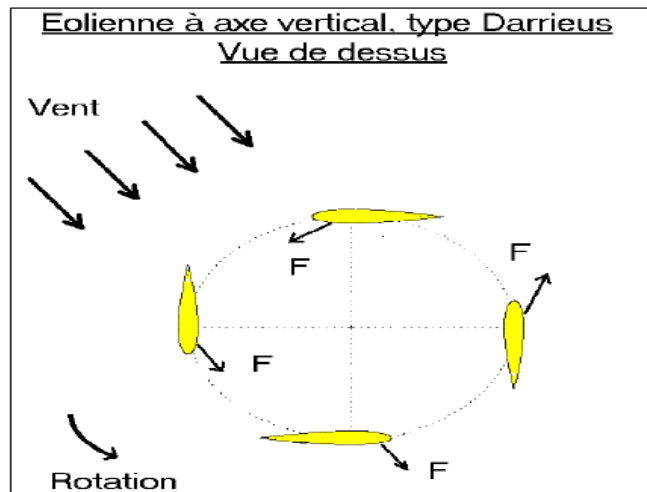


Fig. I-3 : Schéma de principe du rotor de Darius

I.3.1.2. Le rotor de Savonius :

Son fonctionnement est basé sur le principe de la traînée différentielle. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes. Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble (Figure. I-4). L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur.

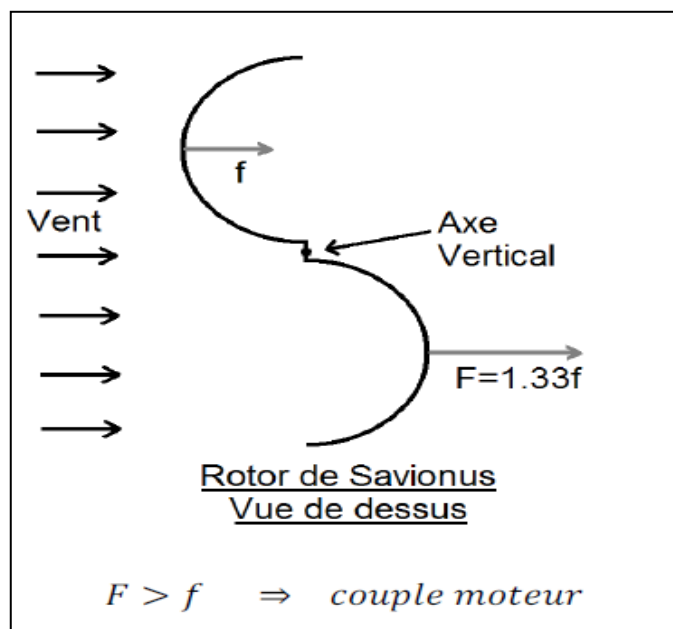


Fig. I-4 : Schéma de principe du rotor de Savonius

I.3.2. Les éoliennes à axe horizontal :

Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il a l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et d'avoir une partie mécanique

(multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance.

En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage à cause des gabarits de leur mat qui subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [13].

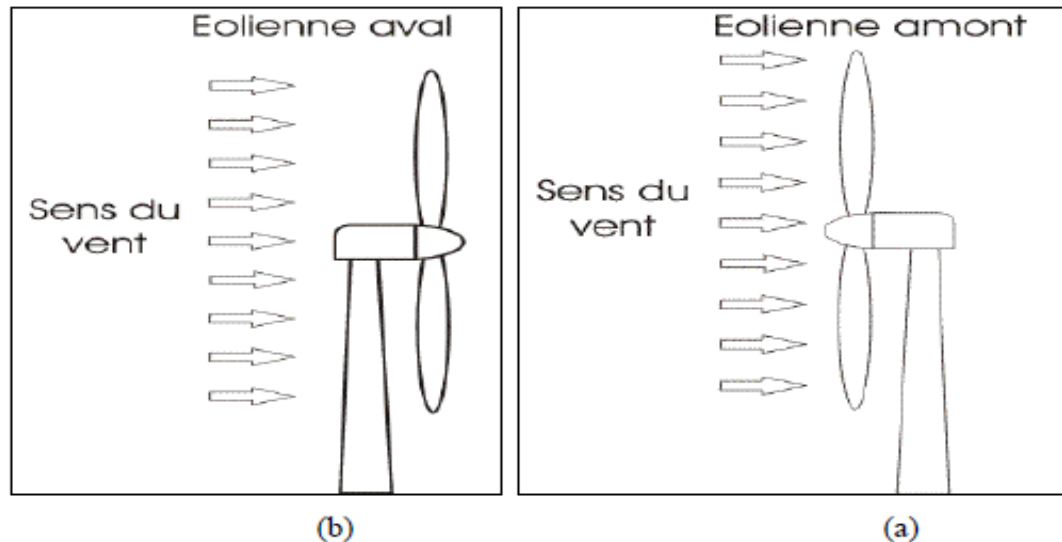


Fig. I-5 : Eolienne à axe horizontal

elles présentent les avantages suivants :

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quelque soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

Mais ces éoliennes possèdent quelque inconvénient comme :

- Elles sont moins performantes que celles à axe verticale.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

I.4. Les différentes technologies d'éoliennes [7]

Le système éolien peut être utilisé en deux applications, système reliés au réseau et système autonome, ces systèmes fonctionnent en deux technologies.

I.4.1. Les éoliennes à vitesse fixe

Dans cette technologie, la génératrice est directement couplée au réseau, sa vitesse est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice.

I.4.1.1. Les avantages d'éoliennes à vitesse fixe

- Simplicité de système électrique.
- Utilisation d'une machine standard, robuste et moins cher.
- Plus grande fiabilité.
- Pas besoin une interface d'électronique de puissance.

I.4.1.2. Les inconvénients d'éoliennes à vitesse fixe

- Pas de gestion de la puissance extraite.
- Fonctionnement à une plage de vitesse de vent très étroite, donc une production d'énergie très perturbée.

I.4.2. Les éoliennes à vitesse variable [7]

La vitesse variable permet d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent, les convertisseurs de puissance entre la machine et le réseau permet le découplage de la fréquence du réseau et la vitesse de rotation et ainsi de faire fonctionner l'aérogénérateur à vitesse variable.

I.4.2.1. Les avantages d'éoliennes à vitesse variable

- Une meilleure exploitation de l'énergie du vent .
- Augmentation du rendement énergétique.
- La réduction des oscillations du couple et des efforts mécaniques .
- Il est possible d'augmenter la vitesse de rotation du rotor lors des rafales.
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité

I.4.2.2. Les inconvénients d'éoliennes à vitesse variable

- L'inconvénient principal du raccordement indirect au réseau est son coût.
- La taille de ces convertisseurs , devient relativement importante pour les éoliennes de grande taille .
- Perte énergétique lors du processus de conversion CA-CC[7].

I.5. Les principaux composants d'une éolienne :

La production de l'énergie éolienne repose sur la structure en trois parties de l'éolienne (Figure. I-6).

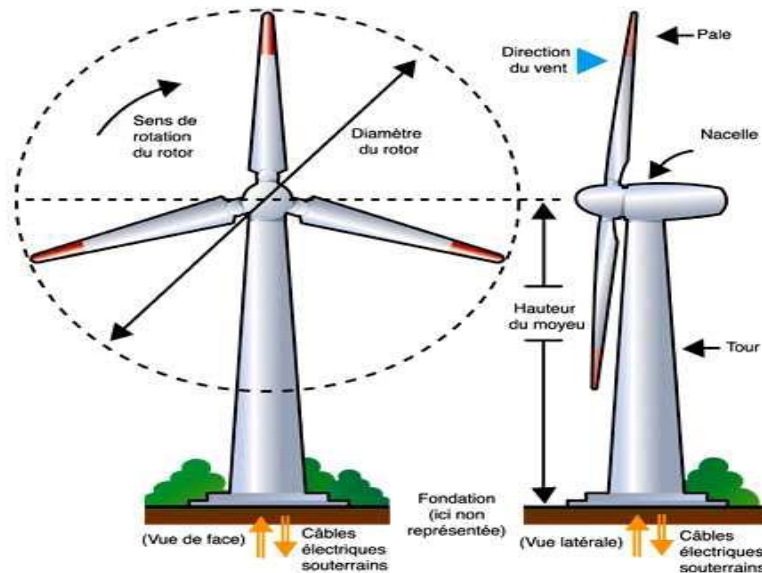


Fig. I-6 : Schéma d'ensemble d'une éolienne

- **Le mât ou la tour** : solidement implanté dans le sol, c'est un tube d'acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier d'une part du maximum de l'énergie cinétique du vent, et de l'autre part pour éviter les perturbations près du sol.
- **Le rotor** : formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.
 - Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût.
 - Les rotors à vitesse variable sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé. Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites tels la fibre de

verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique).

- **La nacelle** : située en haut du mât, elle regroupe les équipements mécaniques permettant de produire l'électricité en couplant la génératrice électrique à l'arbre du rotor, elle est représentée par la (Figure. I-7) [8].

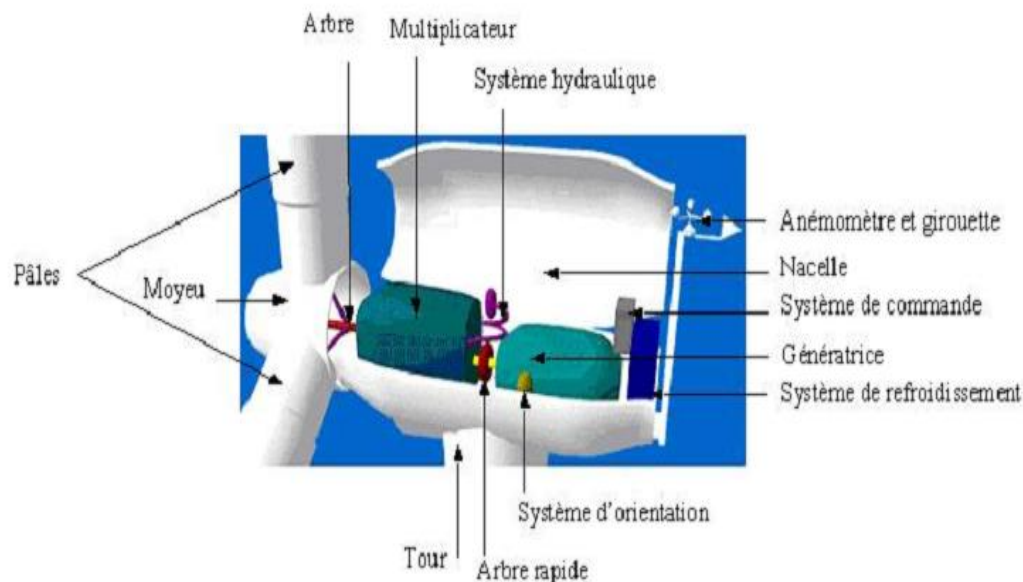


Fig. I-7 : Eléments d'une nacelle

Les équipements abrités par la nacelle sont :

- **Le multiplicateur** : Il sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne (arbre lent) à celle de la génératrice électrique (arbre rapide).
- **Le système de refroidissement** : Il se compose en général d'un ventilateur électrique pour la génératrice et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.
- **La génératrice électrique** : C'est l'élément principal qui permet la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Elle est en général une machine asynchrone à cage ou à rotor bobiné.
- **Le système de commande** : Permet de contrôler et assurer le bon fonctionnement de l'éolienne. Grâce à ce système de supervision et de contrôle, l'éolienne peut être arrêtée automatiquement et très rapidement en cas de nécessité. La sécurité de fonctionnement des éoliennes est ainsi assurée en continu.
- **Système d'orientation des pâles** : Il sert au réglage aérodynamique (régulation de puissance).

I.6. Conversion de l'énergie éolienne :

La capacité de l'aérogénérateur à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de rotation a été la déduction logique et inévitable, en d'autres termes sine qua non, de son utilisation pour la production de l'énergie électrique.

Cependant, il est à noter que pour l'emploi efficace de cette ressource il est indispensable d'étudier les caractéristiques aérodynamiques de la turbine utilisée.

I.6.1. Loi de BETZ :

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

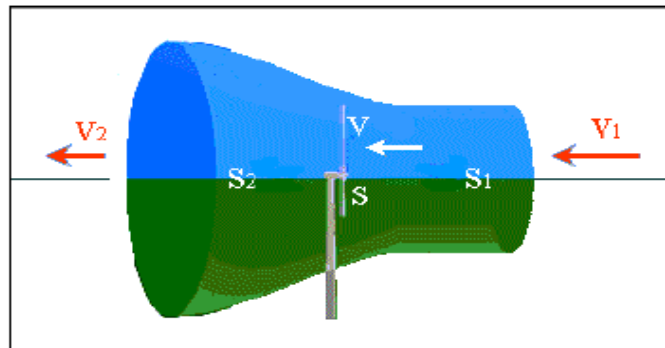


Fig. I.8 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne.

Considérant le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure I.8 sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval [6] [9].

Désignant par V_1 la vitesse de l'air traversant l'aérogénérateur, par S_1 et S_2 les sections amont et aval du tube d'air et par S la surface balayée par l'hélice. L'égalité qui traduit l'incompressibilité de l'air et la permanence de l'écoulement s'écrit :

$$S_1 V_1 = S V = S_2 V_2 \quad (I.1)$$

La force exercée par l'air sur l'aérogénérateur d'après le théorème d'EULER :

$$F = \rho \cdot S V \cdot (V_1 - V_2) \quad (I.2)$$

D'où la puissance absorbée par l'aérogénérateur:

$$P_{aero} = F.V = \rho.SV^2.(V_1 - V_2) \quad (I.3)$$

La puissance absorbée par l'aérogénérateur est aussi égale à la variation de l'énergie cinétique E_c de la masse d'air qui le traverse d'où :

$$\frac{\Delta E_c}{\Delta t} = \frac{1}{2} \cdot \rho.SV.(V_1^2 - V_2^2) = P_{aero} = \rho.SV^2.(V_1 - V_2) \quad (I.4)$$

On en déduit:

$$V = (V_1 + V_2)/2 \quad (I.5)$$

En remplaçant l'expression de V dans les relations (1.2) et (1.3) on obtient :

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho.S(V_1^2 - V_2^2) \quad (I.6)$$

$$P_{aero} = \frac{1}{4} \cdot \rho.S(V_1^2 - V_2^2).(V_1 + V_2) \quad (I.7)$$

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

$$P_{mt} = \rho.SV_1^3 / 2 \quad (I.8)$$

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

$$\frac{P_{aero}}{P_{mt}} = \frac{(1 + \frac{V_2}{V_1}).(1 - (\frac{V_2}{V_1})^2)}{2} = C_p \quad (I.9)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation (1.9), on s'aperçoit que le ratio

P_{aero}/P_{mt} appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maximum pour $\frac{V_1}{V_2} = \frac{16}{27}$ qui

égale à 0,59 (Figure 1.9). Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie expérimentalement par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

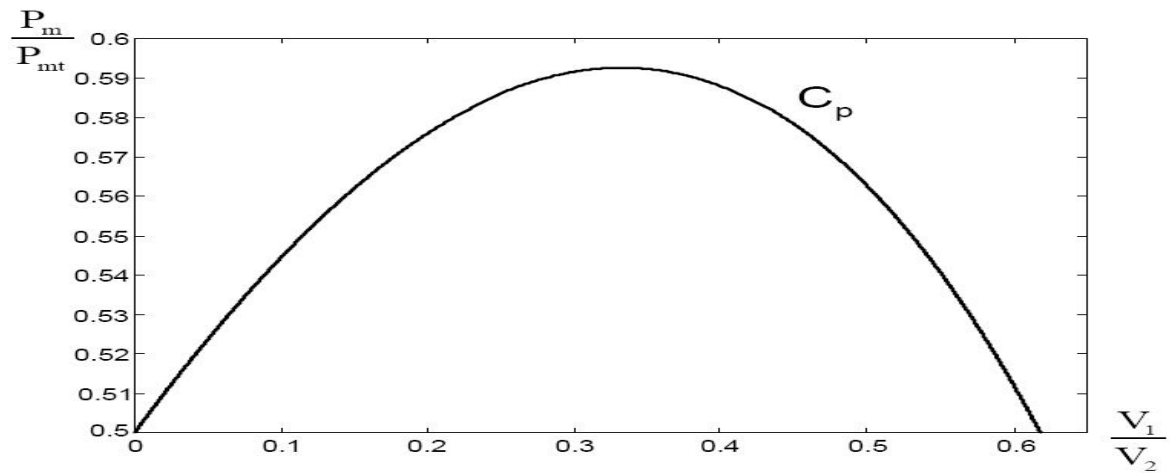


Fig. I.9 : Coefficient de puissance.

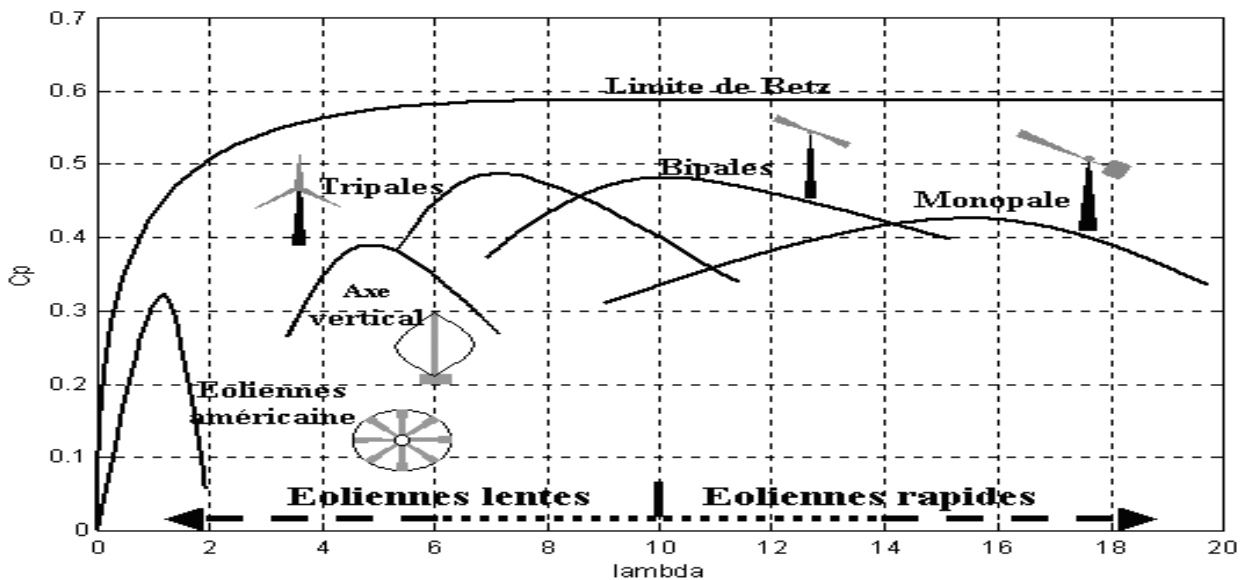


Fig. I.10 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance (Figure 1.10) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique.

Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 45 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts.

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de

puissance (Figure I.10) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente.

I.6.2. Production d'énergie mécanique :

En combinant les équations (I.8) et (I.9), la puissance mécanique P_{aero} disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_{aero} = \left(\frac{P_{aero}}{P_{mt}} \right) \cdot P_{mt} = C_p(\lambda) \cdot P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 V_1^3 \quad (I.10)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{V_1} = \frac{\Omega_{mec} \cdot R}{G V_1} \quad (I.11)$$

$\Omega_{turbine}$: Vitesse de rotation de la turbine.

Ω_{mec} : Vitesse de rotation de l'arbre du générateur.

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent [6].

I.6.3. Utilité de la vitesse variable :

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la figure (I.11)

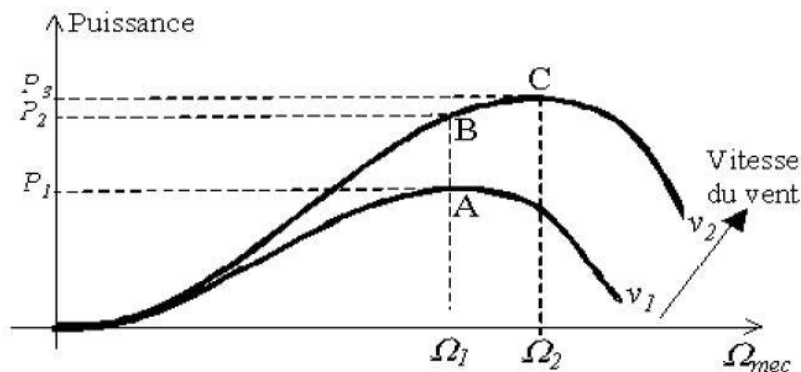


Fig. I.11 : Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse Mécanique et la vitesse du vent.

Pour la vitesse du vent V_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 , on obtient une puissance maximale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de V_1 à V_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (Vitesse fixe), une puissance P_2 est transmise (point B) alors que la puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire d'augmenter la vitesse de la génératrice à une vitesse Ω_2 . Il

faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de puissance.

I.6.4. Modes de régulation et protection :

La vitesse de rotation des pales de l'aérogénérateur ne doit pas dépasser une vitesse maximale car cela pourrait endommager le dispositif de conversion. Différentes méthodes de régulation de la vitesse existent, parmi lesquelles certaines sont basées sur le principe de l'orientation des pales, d'autres sont plus simples et utilisent le principe de décrochage aérodynamique afin de réguler la vitesse. Les méthodes précédemment citées sont expliquées dans ce qui suit :

I.6.4.1 Système à décrochage aérodynamique « *stall* » :

C'est le système le plus simple et le moins coûteux car il se base sur le principe de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est-à-dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale V_n , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale (Figure I.12) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation [8].

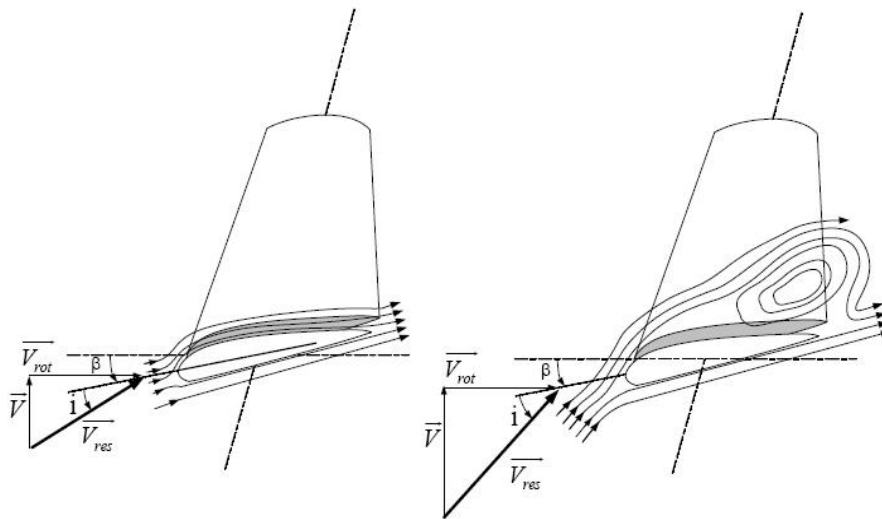


Fig. I.12 : Flux d'air sur un profil de pale " stall ".

I.6.4.2. Système d'orientation des pales « *Pitch* » :

Le système de réglage aérodynamique se base sur le principe de l'augmentation de l'angle de calage (Figure I.13) ce qui diminue la valeur du facteur de puissance (Figure I.14) d'où une

diminution du rendement de la turbine, ceci empêche l'augmentation de la vitesse de rotation de l'aérogénérateur.

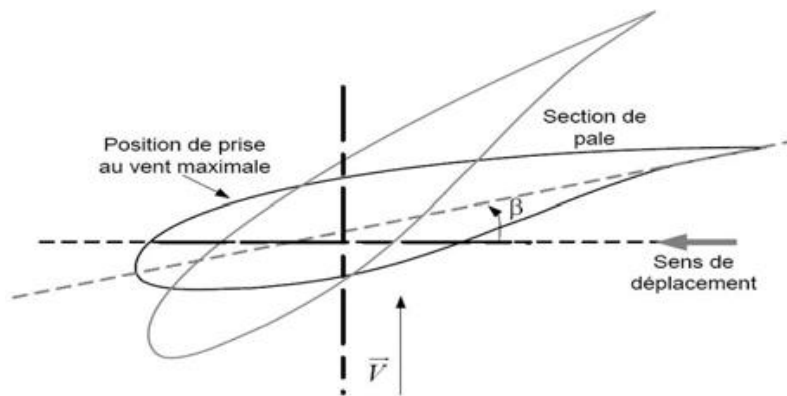


Fig. I.13 : Variation de l'angle de calage d'une pale.

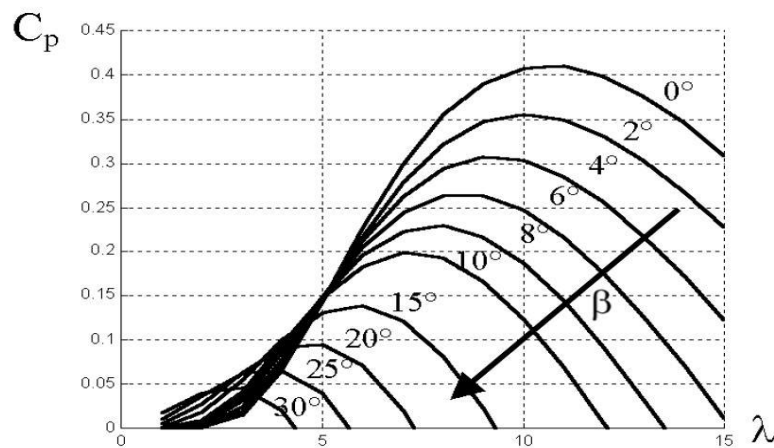


Fig. I.14 : Influence de l'angle de calage sur le coefficient de puissance.

I.7. Conversion électromécanique :

La production de l'énergie éolienne se base sur le principe de la conversion de l'énergie du vent en énergie mécanique de rotation. Cela se fait grâce à la turbine à axe horizontal décrite précédemment. La conversion de l'énergie mécanique en électrique implique une génératrice couplée à la turbine.

I.7.1. Systèmes de génération d'électricité :

A travers la littérature spécialisée nous avons rencontré plusieurs types de génératrices adaptées aux éoliennes. Nous avons pu les classer suivant trois variantes citées ci-dessous:

I.7.1.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone :

Elle représente la configuration la plus répandue dans le monde. L'écoulement du vent dans la turbine étant en constante fluctuation, ce type de machine offre la possibilité de travailler à vitesse variable tout en respectant les contraintes de fréquence et de tension (Figure I.15).

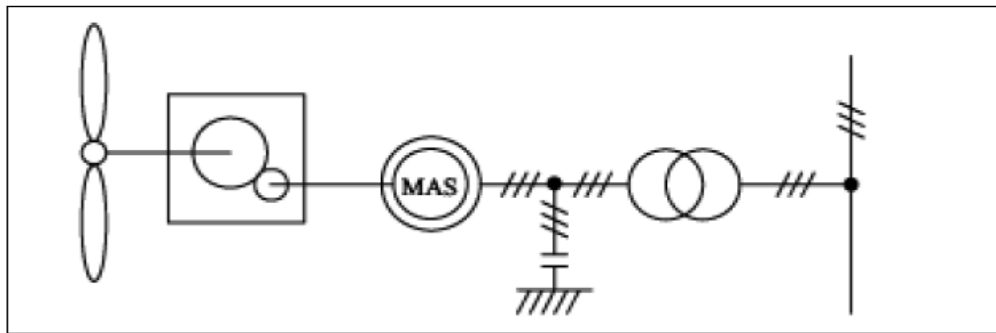


Fig. I.15 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage.

I.7.1.2. Systèmes utilisant la machine synchrone :

Le stator de cette machine est relié à une interface électronique composée d'un onduleur et d'un redresseur permettant d'assurer la circulation du flux de puissance tout en ayant deux fréquences différentes au stator et au réseau.

Dans ce système le convertisseur est dimensionné pour la totalité de la puissance nominale, impliquant des composants plus puissants et donc plus chers (Figure I.16).

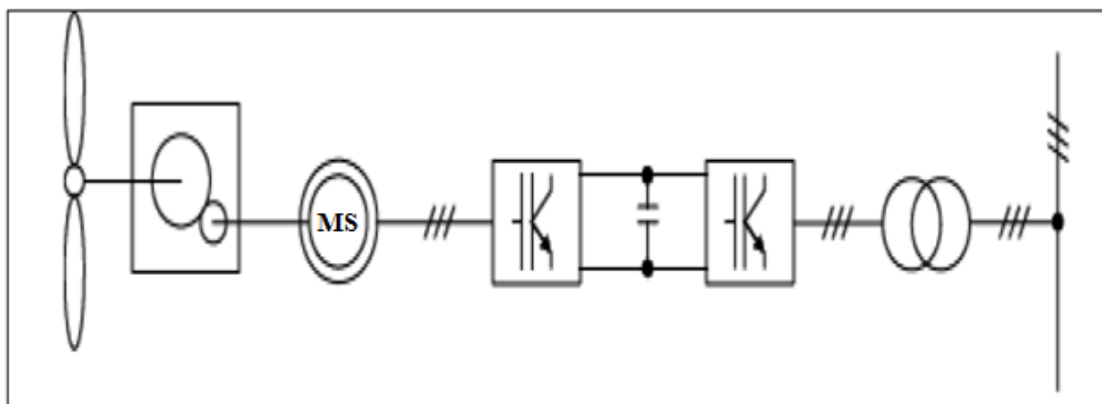


Fig. I.16 : Système éolien basé sur la machine synchrone .

I.7.1.3. Systèmes utilisant des machines spéciales :

Ce type de machines est communément appelé machines à reluctance variable. Elles peuvent être excitées par les courants triphasés au stator ou ne pas l'être. Ce type de machine reste à l'état de prototype et ne satisfait pas les critères de l'industrialisation [3].

I.7.2. Utilisation de MADA dans la conversion électromécanique :

Contrairement aux machines asynchrones à cage ou aux machines synchrones qui sont contraintes à fonctionner à la vitesse du synchronisme ou dans son voisinage, la MADA est une

machine dont la vitesse de fonctionnement est située sur une grande plage de variation. Par cette caractéristique intéressante, la MADA connaît un succès grandissant dans le domaine de la conversion électromécanique.

I.7.2.1. Principe de fonctionnement :

La MADA comme son nom l'indique est une machine doublement alimentée. Elle a le surnom de « machine généralisée » vu sa flexibilité de fonctionnement. Grâce à l'accès au rotor et via une interface électronique il est possible de contrôler la vitesse de rotation ainsi que le facteur de puissance.

Le fonctionnement de la MADA se base sur le principe du contrôle de l'écoulement de la puissance de glissement. Au lieu de dépenser en pertes Joule la puissance rotorique on peut la récupérer et l'injecter dans le réseau. La difficulté étant que la fréquence des courants rotoriques f_{ro} est égale à g fois la fréquence du réseau. Durant des années cette difficulté était surmontée grâce à un groupement de machine. Avec l'apparition des semi-conducteurs une solution plus pratique a été mise au point. Une interface électronique composée d'un redresseur et un onduleur permettrait le passage de la puissance de glissement vers le réseau.

Nous verrons dans les paragraphes suivants comment une machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné peut être transformée en génératrice à vitesse variable en contrôlant l'écoulement de puissance entre le rotor et le réseau. Suivant les sens du transfert de puissance entre le rotor et le réseau mais aussi entre celui-ci et le stator, la MADA devient ainsi génératrice ou moteur. De plus, grâce à ce mécanisme, sa vitesse de rotation peut être contrôlée. Les différents modes de fonctionnement de la MADA sont décrits ci-dessous (Figure 1.17):

I.7.2.1.1. Moteur en hypo synchronisme :

L'énergie absorbée du réseau est transformée partiellement en énergie mécanique. L'autre partie est injectée au réseau à travers les contacts glissants du rotor. Pour les moteurs à cage, l'énergie de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor.

I.7.2.1.2. Moteur en hyper synchronisme :

La puissance statorique est fournie par le réseau ainsi que la puissance de glissement. Les machines à cage ne peuvent avoir ce type de fonctionnement car celui-ci ne peut être obtenu qu'à l'aide d'un accès au rotor via un circuit électronique.

I.7.2.1.3. Génératrice en hypo synchronisme :

L'énergie mécanique est transmise à l'arbre de la machine, celui-ci la fournit au stator, lequel la transmet au réseau. Afin de permettre un fonctionnement hypo synchrone, l'énergie de glissement, provenant du réseau, se doit d'être transmise au rotor. Ainsi pour le fonctionnement

générateur hypo synchrone, 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.

I.7.2.1.4. Génératrice en hyper synchronisme :

La totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à $g.P_{mec}$ est transmise par l'intermédiaire du rotor.

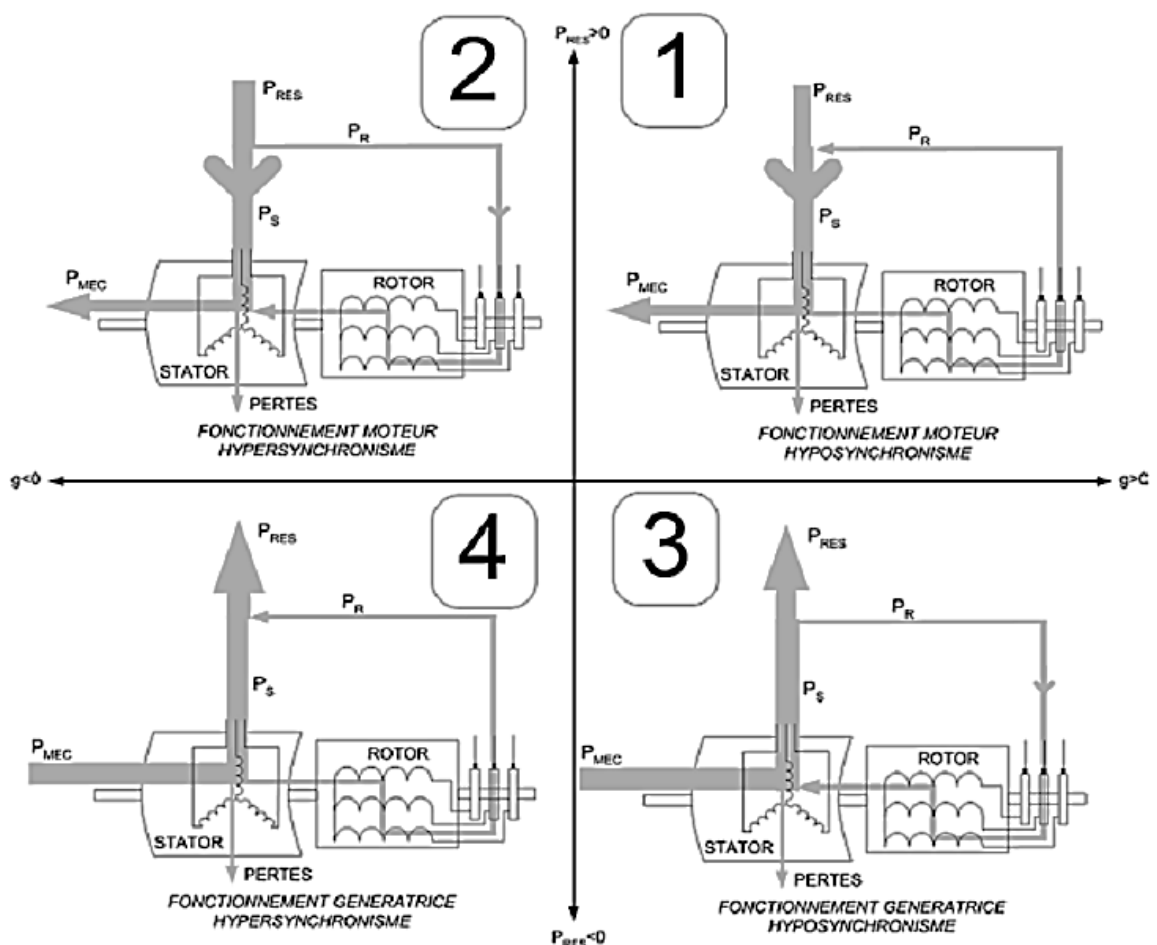


Fig.I.17: Modes de fonctionnement de la MADA [4].

I.7.2.2. Différentes topologies de la MADA :

A travers nos lectures, nous avons distingué deux types de dispositifs utilisant la machine asynchrone pour la production de l'énergie éolienne : Un dispositif tournant à vitesse fixe et utilisant un moteur à cage et un autre dispositif tournant à vitesse variable. Ce dernier est appelé communément machine asynchrone à double alimentation (MADA). Toutefois il est à noter que

dans le cadre de notre étude nous avons besoin d'une machine qui offre la plage de variation de la vitesse la plus grande possible afin de maximiser le rendement. Pour cela notre recherche s'est restreinte aux topologies utilisant des convertisseurs bidirectionnels. Nous avons ainsi, pu distinguer plusieurs variantes se basant sur des architectures différentes utilisant toutes une MADA pour la conversion électromécanique.

I.7.2.2.1. Machine asynchrone à double alimentation type « Brushless » :

Cette machine est à double stator (Figure I.18). Un bobinage transite la puissance il a une grande section et est directement connecté au réseau. L'autre bobinage est de section moins importante. Il est connecté à un onduleur pour contrôler les flux d'excitation. Le rotor dans cette machine est à cage d'écureuil, cependant il a une structure différente de celle classique en boucles concentriques.

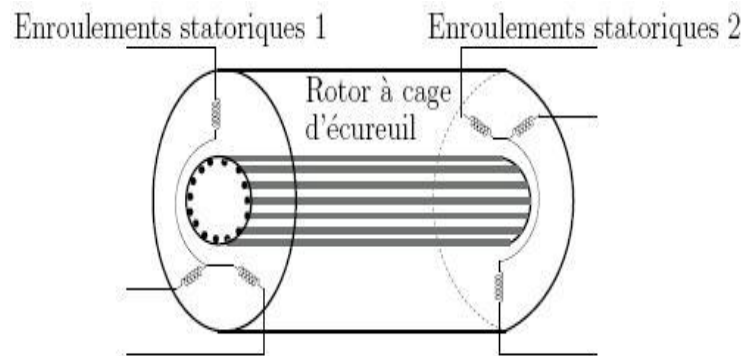


Fig. I.18 : MADA à double stator.

Cette machine présente l'intérêt de fonctionner à vitesse variable. Le convertisseur est connecté au bobinage de faible puissance donc moins coûteux. Cependant la machine a un stator plus volumineux et plus complexe à réaliser (Figure I.19).

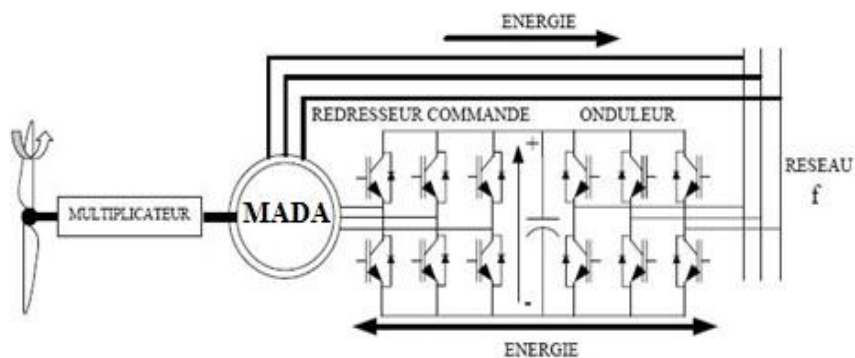


Fig. I.19 : MADA Brushless.

Le convertisseur permet de contrôler le facteur de puissance ainsi que le courant rotorique d'où l'optimisation du rendement. La taille du convertisseur est proportionnelle au glissement maximum. Cependant si le glissement dépasse une valeur de 30%, le système devient peu attractif à cause de la diminution de rendement et l'augmentation du coût du convertisseur [3] [5].

I.7.2.2.2. Machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné :

La MADA à rotor bobiné est une machine qui a un stator identique aux machines asynchrones classiques. Son rotor est bobiné en étoile dont l'accès se fait grâce à un contact glissant. Le contrôle du fonctionnement de la machine se fait grâce à une fraction de la puissance nominale circulant dans le rotor. Cela implique un convertisseur réduit et donc moins coûteux. Il existe différents systèmes décrits ci-dessous :

I.7.2.2.2.1. Machine asynchrone à double alimentation –Structure Scherbius avec cyclo-convertisseur :

Afin de permettre un flux d'énergie bidirectionnel entre le réseau et le rotor on utilise un cyclo-convertisseur (Figure I.20). L'ensemble est appelé structure Scherbius. Grâce à la bidirectionnalité du convertisseur, la plage de variation de la vitesse est doublée (de 70 à 130 % de la vitesse de synchronisme).

L'utilisation des thyristors dans ce montage implique une présence de fortes composantes harmoniques nuisant ainsi à la qualité du facteur de puissance.

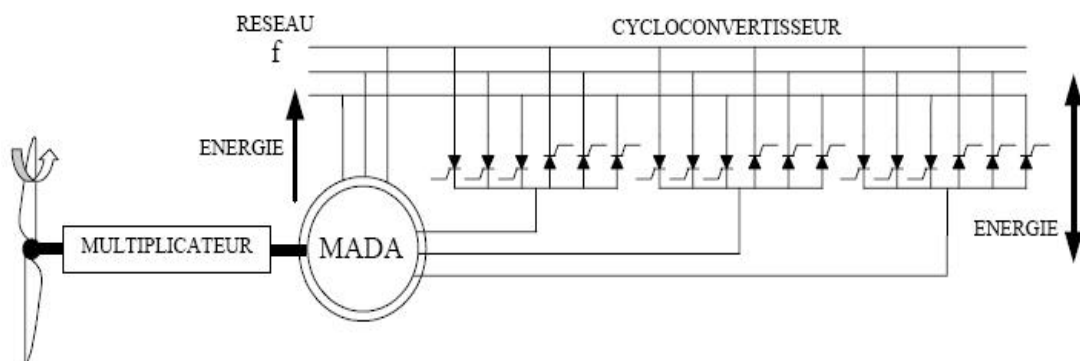


Fig. I.20 : Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur.

I.7.2.2.2.2. Machine asynchrone à double alimentation –Structure Scherbius avec convertisseur MLI :

Cette structure (Figure I.21) repose sur le même principe que la précédente. À la place du cyclo-convertisseur on utilise un montage Redresseur / Onduleur. Les transistors IGBT utilisés

dans ce montage sont commandés à l'ouverture et à la fermeture, ceci implique la possibilité d'utiliser la MLI. Avec une commande appropriée, il est possible d'atténuer les harmoniques non nulles et d'améliorer le facteur de puissance.

Tout en ayant la même philosophie de fonctionnement que la structure « Bruchless » le dispositif « Scherbius » offre une simplicité de fonctionnement (présence d'un seul bobinage au rotor et au stator et donc un faible coût de fabrication et de maintenance).

Le glissement est compris entre $[-30, +30]$ %, le convertisseur et donc dimensionné pour 30% de la puissance nominale. La puissance produite n'est pas limitée à la puissance nominale car le rotor au fonctionnement hyper synchrone produit de l'énergie et la fournit au réseau. Cependant la commande MLI entraîne des gradients de tension importants d'où la présence de courants rotoriques de fréquences élevée responsable de pertes fer plus importantes. Plusieurs études récentes confirmées par des réalisations industrielles montrent la viabilité de ce dispositif dans un système éolien.

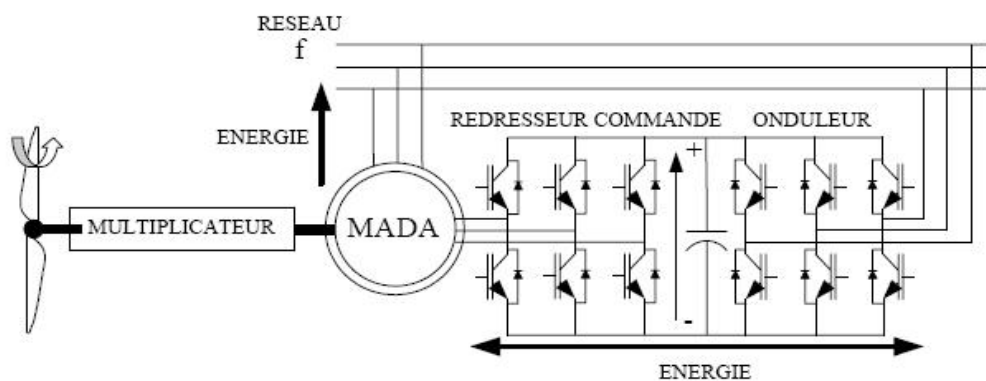


Fig. I.21 : Structure de Scherbius avec MLI.

1.7.2.2.3. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer :

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau (structure de Kramer, Figure. I-22) [11].

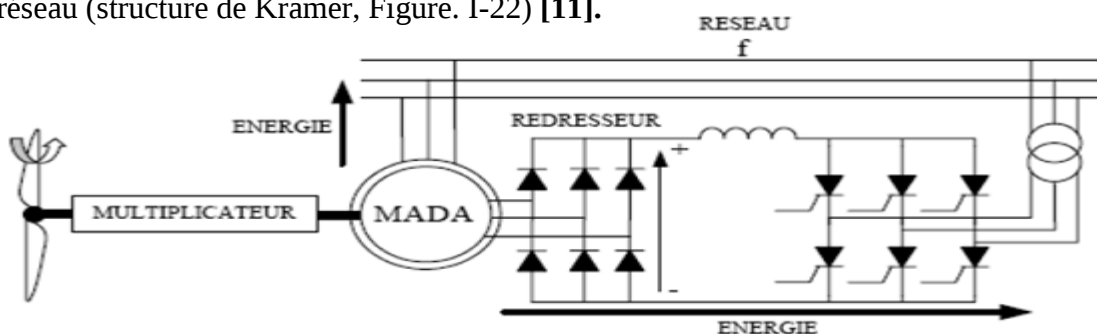


Fig. I.22 : MADA, structure de Kramer.

L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Ce système est avantageux s'il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%. L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance ; de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau) donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de Scherbius avec convertisseurs à IGBT.

I.7.3. Application de la MADA dans le domaine éolien :

Tel qu'il a été illustré dans la partie portant sur la conversion de l'énergie éolienne, il a été montré que la puissance produite par la turbine dépend de sa vitesse de rotation et de la vitesse du vent. Sachant que la cette dernière n'est guère constante dans la nature, une utilisation à vitesse variable est imposée pour positionner le fonctionnement sur le point optimale de production de la puissance (Figure I.23).

La MADA devient la solution adaptée à ce genre d'application vu sa capacité à fonctionner dans une large gamme de vitesse. Elle est d'autant plus intéressante dans le cas ou la puissance produite n'est pas écrêtée en atteignant la puissance nominale de la machine. (Figure. I.24) [3]

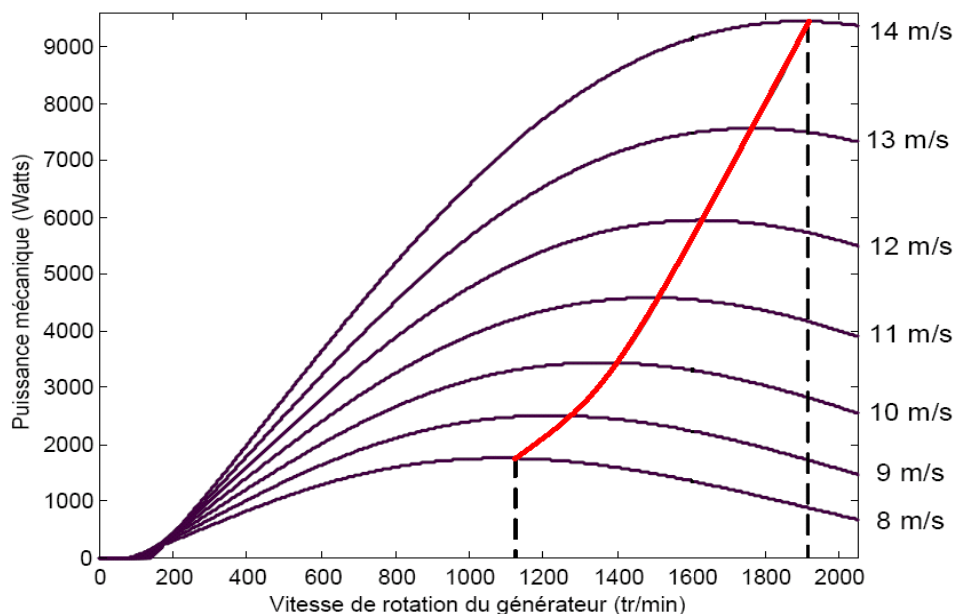


Fig. I.23 : Puissance produite par la turbine

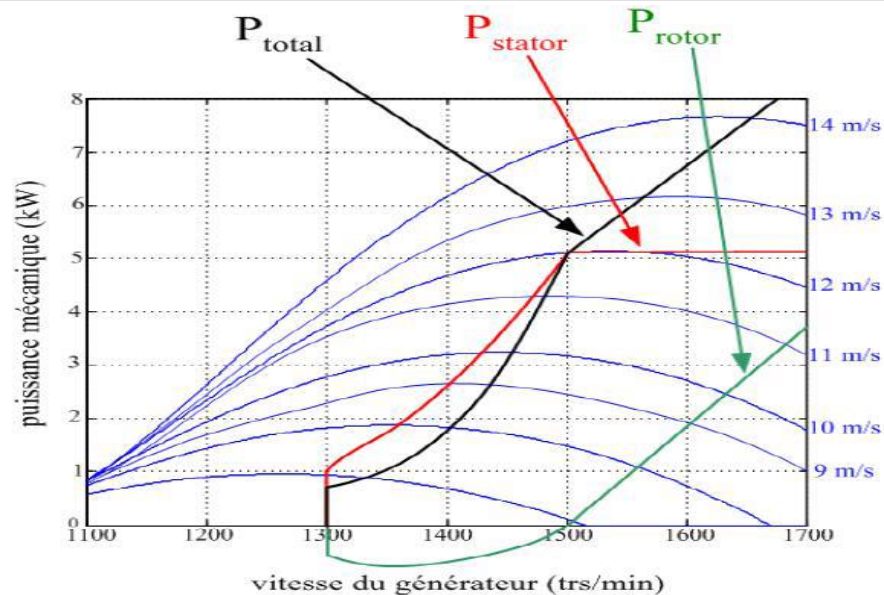


Fig. I.24 : Puissance produite par la MADA en fonction de la vitesse du vent.

I.8. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

Le développement et la croissance d'utilisation de l'énergie éolienne sont liés aux avantages que présente ce type d'énergie. Cependant, cette source d'énergie présente également de désavantages qu'il faut étudier pour améliorer son exploitation.

I.8.1. Avantages :

- 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, chaque mégawatt-heure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO_2 rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique.
- Elle ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs, la propriété des aérogénérateurs par des particuliers et la communauté permet aux gens de participer directement à la conservation de notre environnement.
- Selon EDF, l'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple.
- L'énergie éolienne est une énergie économique. L'éolienne permet de capter l'énergie sur le lieu même de son utilisation, ce qui économise ainsi tous les circuits de distribution.
- une éolienne est en grande partie recyclable car construite 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.

I.8.2. Inconvénients :

- Le caractère imprévisible du vent. Pour cette raison, les compagnies d'électricité éprouvent beaucoup de difficulté à accepter cette source d'énergie. Dans la plupart des cas, une turbine éolienne est installée avec une génératrice diesel.
- Dans certaines communautés, l'apparence de la turbine est très importante. Les turbines sont souvent de taille monumentale et de ce fait, il est difficile de faire accepter un tel appareil au sein de la population.
- Le bruit mécanique qui est créé par les différents organes en mouvement comme les engrenages.
- Le bruit aérodynamique. Le freinage du vent et son passage autour des pales engendrent un son caractéristique, comme un souffle [12].

I.9. CONCLUSION :

A travers la synthèse bibliographique relative à la machine asynchrone à double alimentation nous avons pu noter le rôle de celle-ci et ses avantages par rapport aux autres convertisseurs conventionnels.

La MADA se distingue au plan économique par l'utilisation de convertisseurs de plus faible puissance. Elle a l'avantage d'être flexible d'où le nom de machine généralisée. Le fonctionnement sur les quatre cadrans dans une large gamme de vitesse est l'argument majeur de sa supériorité. Grâce à une commande spécifique cette machine peut être dédiée à l'optimisation des échanges d'énergie d'où son application dans la génération d'énergie éolienne.

La MADA devient une alternative à la machine synchrone ainsi qu'aux autres dispositifs de productions d'énergie électrique dans les réseaux isolés mais aussi en tant que génératrice d'appoint lors des pics de consommations. Car dans le cas des groupes électrogènes le fonctionnement à vitesse variable permettent de réduire la consommation du carburant.

Etant donné que la structure Scherbius avec convertisseur MLI offre une simplicité de fonctionnement et un faible coût de fabrication et de maintenance, nous nous baserons sur cette dernière dans la suite de notre travail.

Chapitre II
Modélisation et commande
vectorielle de la MADA

II.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on va présenter le modèle de la turbine ensuite la modélisation de machine asynchrone à double alimentation, cette modélisation était basée sur l'élaboration de schémas équivalents dérivés de la théorie du champ tournant. La simplicité de conception et d'entretien de cette machine à la faveur des industries, s'accompagne toutefois d'une grande complexité physique, ainsi que la commande vectorielle.

En suite les modèles aérodynamique et mécanique de la turbine ont été développés. Puis, dans le but d'établir les différentes commandes des deux convertisseurs, nous avons développés les modèles de la MADA .

II.2. Modélisation de la turbine :

La turbine qui sera modélisé comporte trois pales de longueur R , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse $\Omega_{turbine}$, qui entraînera une génératrice (MADA) à travers un multiplicateur de vitesse de gain G . La figure (II.1) montre le schéma d'une turbine éolienne.[14]

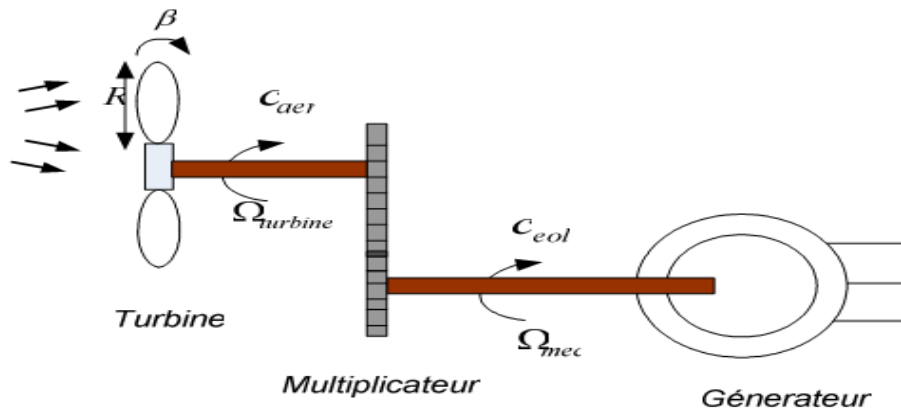


Fig. II.1 : Schéma de la turbine éolienne.

II.2.1. La puissance d'une éolienne :

La puissance cinétique du vent à travers un disque éolien de rayon R , est donnée par la relation suivante [14].

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v_{vent}^3 = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v_{vent}^3 \quad (II.1)$$

ρ : Masse volumique de l'air (celle-ci est de $1,22 \text{ Kg/m}^3$ en atmosphère normale) ;

S : c'est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.

R : correspond pratiquement à la longueur de la pale ;

v_{vent} : est la vitesse du vent (en m/s).

Nous remarquons que la puissance est directement proportionnelle à la surface balayée par le rotor, mais surtout au cube de la vitesse du vent. [22]

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors :

$$P_{aer} = C_p \cdot P_v = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (II.2)$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. La figure (II.2) représente la variation de ce coefficient en fonction du ratio de vitesse λ et de l'angle de l'orientation de la pale β . Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent.

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{v} \quad (II.3)$$

Où : $\Omega_{turbine}$ Est la vitesse de la turbine.

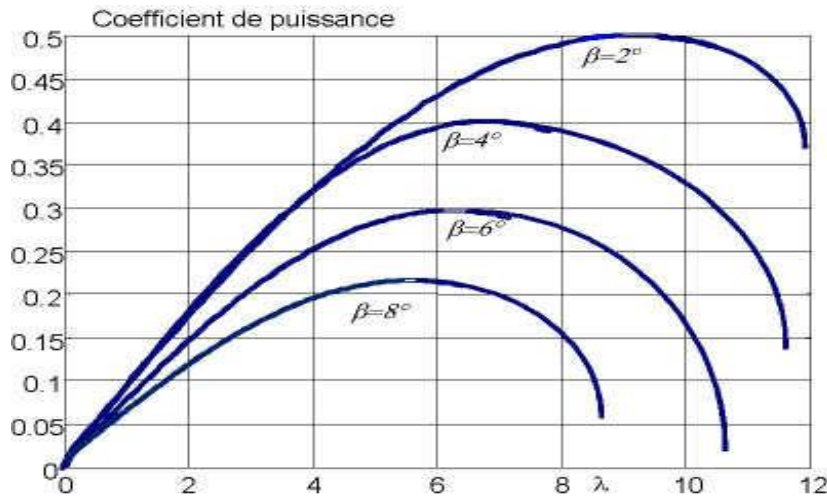


Fig. II.2 : Coefficient de puissance en fonction du ratio de vitesse de la turbine λ .

A partir de relevés réalisés sur une éolienne de 1.5 MW l'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour ce type de turbine, par l'équation suivante[16].

$$C_p = (0.5 - 0.167) \cdot (\beta - 2) \sin \left[\frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)} \right] - 0.00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (II.4)$$

II.2.2. Modèle de multiplicateur:

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice figure (II.1), elle est modélisée mathématiquement par les équations suivantes [22] :

$$C_g = \frac{C_{aéro}}{G} \quad (II.5)$$

C_g : Couple issu du multiplicateur ;

$C_{aér}$: Couple aérodynamique ;

G : Gain du multiplicateur.

Pour la vitesse, on aura :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.6)$$

II.2.3. Equation dynamique de l'arbre :

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie J_{tur} 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.

$$J = \frac{J_{tur}}{G^2} + J_g \quad (II.7)$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total (C_{mec}) appliqué au rotor :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (II.8)$$

Où J est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} et le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II.9)$$

Le couple résistant du aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f [16] :

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (II.10)$$

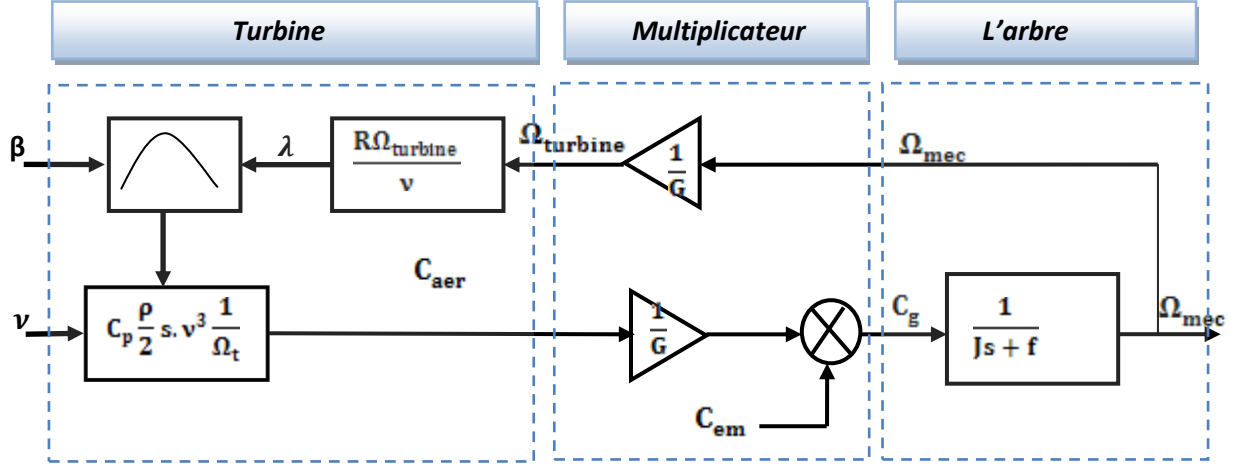


Fig. II.3 : Schéma bloc du modèle de la turbine.

II.3. Modélisation de la MADA :

Une machine asynchrone à double alimentation est une machine à courant alternatif dont la vitesse varie en fonction de la charge. Comme la machine asynchrone, elle se compose d'un primaire dit stator qui est fixe, et d'un secondaire qui est le rotor de forme cylindrique qui est mobile.

Le stator est alimenté par un système triphasé de tension. Il en résulte la création d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer de la machine, où sa vitesse est :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (\text{II.11})$$

ω_s : La pulsation du réseau d'alimentation triphasé,

p : Le nombre de paire des pôles du champ magnétique qui apparaît au niveau du stator.

Le rotor qui est exécuté comme le stator, tourne à la vitesse $\frac{d\theta}{dt}$ par rapport u stator, avec θ est l'angle entre le repère statorique et le repère rotorique. La représentation schématique de la machine asynchrone à double alimentation est montrée sur la figure (I.11) [33]. Pendant la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des f.é.m. dans le bobinage du rotor. Le rapport entre les f.é.m. créées au rotor et au stator est [25] :

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} \cdot \frac{\omega_s - \omega_{mec}}{\omega_s} \quad (\text{II.12})$$

Où :

N_s et N_r sont respectivement le nombre de spires des bobinages statoriques et rotoriques
 ω_s et ω_{mec} sont respectivement les pulsations de synchronisme et mécanique de la machine. En définissent le glissement par

$$g = \frac{\omega_s - \omega_{mec}}{\omega_s} \quad (\text{II.13})$$

Donc l'équation (II.13) devient :

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} \cdot g \quad (\text{II.14})$$

Les courants au stator et au rotor sont définis comme dans le cas d'un transformateur parfait :

$$\frac{i_r}{i_s} = \frac{N_s}{N_r} \quad (\text{II.15})$$

Donc, le rapport entre la puissance S_r au rotor et la puissance S_s au stator devient :

$$\frac{S_r}{S_s} = \frac{i_r}{i_s} \cdot \frac{E_r}{E_s} = g \quad (\text{II.16})$$

Dans ce qui suit on va présenter la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.

II.3.1. Hypothèses simplificatrices :

La machine asynchrone comprend une répartition des enroulements et une géométrie très complexe. Par conséquent, pour une analyse tenant compte de sa configuration exacte il est nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices qui sont[24] :

- La machine est de constitution symétrique.
- On suppose les circuits magnétiques non saturés. Les relations entre les flux et les courants sont d'ordre linéaire.
- Les paramètres de la machine sont considérés indépendants de la température.
- Les pertes (par hystérésis et courant de Foucault) sont négligées.
- la f.m.m est distribuée sinusoïdalement le long de la périphérie des deux armatures d'où résulte du fait que l'entrefer est constant.
- l'effet d'encoche est négligé et les inductances propres sont constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes rotoriques et statoriques.
- On suppose que le circuit magnétique est parfaitement feuilleté au stator et au rotor donc seuls les enroulements sont parcourus par des courants.

II.3.2. Modèle mathématique de la MADA :

Les équations générales de la machine asynchrone à double alimentation dans un repère triphasé (abc) sont données comme suit :

II.3.2.1. Equations électriques de la machine :

Sous les hypothèses précédentes et en utilisant La loi de Faraday et la loi d'Ohm, Les équations des tensions statoriques, peuvent être exprimées, en utilisant la notation matricielle par :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\varphi_s]}{dt} \quad (\text{II.17})$$

Et les équations des tensions rotoriques, peuvent être exprimées par :

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d[\varphi_r]}{dt} \quad (\text{II.18})$$

Les flux statoriques et rotoriques instantanés par phase, sont donnés par équations magnétique suivante :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\varphi_r] = [M_{rs}][I_s] + [L_{rr}][I_r] \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

En appliquant la transformée de Laplace, et en remplaçant (II.19) dans (II.17) et (II.18), on obtient:

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + P([L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r]) \\ [V_r] = [R_r][I_r] + P([L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s]) \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

P : opérateur de Laplace.

Avec:

$$[I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} ; [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} ; [V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} ; [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} ; [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} ;$$

$$[\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix}$$

Les matrices des résistances statorique et rotorique de la MADA sont données par :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} ; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} ;$$

Les quatre matrices d'inductance s'écrivent :

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

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta \end{bmatrix}$$

II.3.2.2. Equations mécaniques de la MADA :

Le couple électromagnétique est donné par l'expression générale suivante :

$$C_{em} = \frac{1}{2} p [I]^T \frac{d[L]}{dt} [I] \quad (\text{II.21})$$

Avec :

$$[I] = \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} : \text{Matrice de courant total ;}$$

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} : \text{Matrice inductance totale ;}$$

p : Le nombre de paire de pôle.

Compte tenu que tous les termes des sous matrices $[L_{ss}]$ et $[L_{rr}]$ sont à coefficients constants, on aura :

$$C_{em} = \frac{1}{2} p [I_s]^T \frac{d[M_{sr}]}{dt} [I_r] \quad (\text{II.22})$$

Donc l'équation mécanique de la machine s'écrit :

$$J \frac{d}{dt} \Omega = C_{em} - C_r - f_r \Omega \quad (\text{II.23})$$

La résolution analytique dans ce repère est très difficile car le système d'équations est à coefficients variables en fonction de θ (angle de rotation de la machine).

II.3.3. Transformation de Park :

La transformation de R.H.Park appelée souvent transformation des deux axes, fait correspondre aux variables réelles leurs composantes homopolaires indice o, d'axe directe (indice d), d'axe quadrature (indice q)[6].

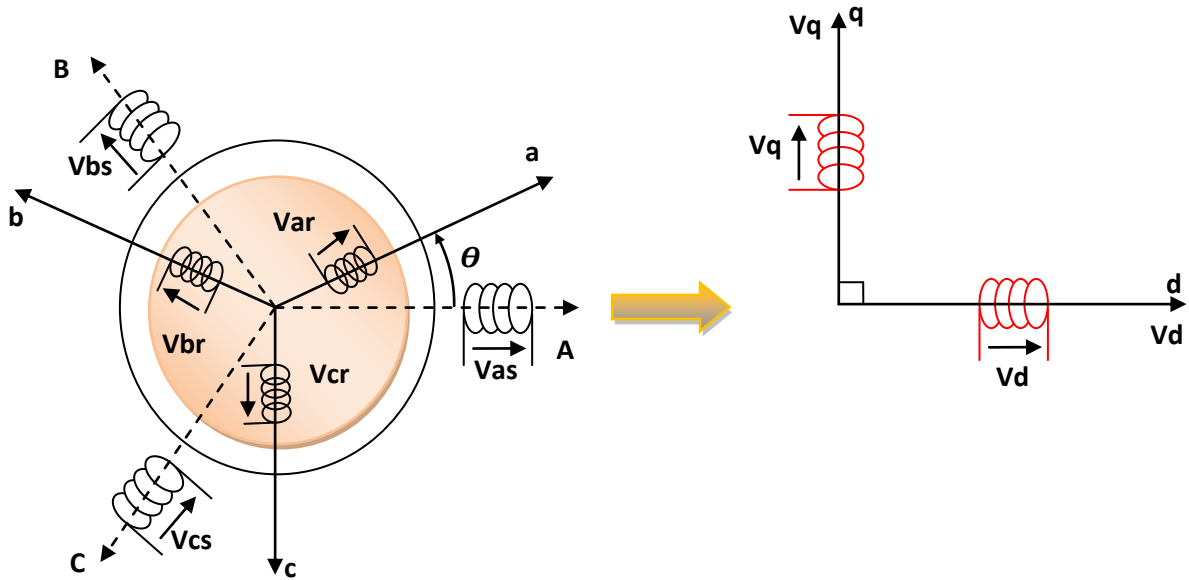


Fig. II.4 :Modèle de PARK de la MADA.

La transformation de Park est un outil mathématique qui permet de passer d'un système triphasé à un système diphasé exprimé dans le repère (dq) où les éléments sont continus, ce qui simplifie la résolution des équations [23].

La transformation de Park définie par la matrice de rotation $[P(\theta)]$ qui est donnée sous la forme suivante :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

II.3.4. Le choix du référentiel :

Les équations de la machine asynchrone triphasée peuvent être exprimées dans différents référentiels, le choix d'un référentiel se fait selon le problème étudié [4]

Il existe trois choix importants on peut fixer le référentiel (dq) :

- Au stator .
- Au rotor .
- Au champ tournant .

II.3.4.1. Référentiel lié au stator :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega \quad (\text{II.26})$$

Ce référentiel est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées. Il est utilisé en vue d'étudier les variations importantes de la vitesse de rotation.

II.3.4.2. Référentiel lié au rotor :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_s}{dt} = \omega \quad (\text{II.27})$$

Ce référentiel est intéressant pour les problèmes des régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée comme constante.

II.3.4.3. Référentiel lié au champ tournant :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega = g \cdot \omega_s = \omega_r \quad (\text{II.28})$$

Ce type de référentiel est souvent utilisé dans l'étude de l'alimentation des moteurs à fréquence variable. Son modèle permet d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent d'où la facilité de régulation. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors d'une étude de la commande des machines [4].

II.3.5. Equations électriques :

En multipliant les systèmes des équations (II.20) par la matrice de Park, on obtient :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

Sous forme vectorielle cela donne

$$\begin{cases} \bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + \frac{d\varphi_s}{dt} + J \omega_s \bar{\varphi}_s \\ \bar{V}_r = R_r \bar{I}_r + \frac{d\varphi_r}{dt} + J(\omega_s - \omega) \bar{\varphi}_r \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Avec :

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

J : appelée matrice de rotation.

II.3.5.1. Equations électriques sous forme matricielle :

Les deux systèmes des équations (II.29) et (II.20)s'écrivent :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + L_s \frac{dI_{sd}}{dt} + M \frac{dI_{rd}}{dt} - \omega_s L_s I_{sq} - \omega_s M I_{rq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + L_s \frac{dI_{sq}}{dt} + M \frac{dI_{rq}}{dt} + \omega_s L_s I_{sd} + \omega_s M I_{rd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + L_r \frac{dI_{rd}}{dt} + M \frac{dI_{sd}}{dt} - \omega_s L_r I_{rq} - \omega_s M I_{sq} + \omega L_r I_{rq} + \omega M I_{sq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + L_r \frac{dI_{rq}}{dt} + M \frac{dI_{sq}}{dt} + \omega_s L_r I_{rd} + \omega_s M I_{sd} - \omega L_r I_{rd} - \omega M I_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

Ce système d'équation (II.10) se traduit sous la forme matricielle comme suit :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \\ &+ \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -L_s & 0 & -M \\ L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -M & 0 & -L_r \\ M & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$[V] = [A][I] + [B] \frac{d}{dt} [I] + \omega_s [C][I] + \omega [D][I] \quad (\text{II.33})$$

$$[\varphi] = [B][I]$$

Dont :

$$[V] = \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} ; [I] = \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} ; [\varphi] = \begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix}$$

$$[A] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} ; [B] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} ; [C] = \begin{bmatrix} 0 & -L_s & 0 & -M \\ L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -M & 0 & -L_r \\ M & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix} ;$$

$$[D] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix}$$

II.3.6. Equations magnétiques :

En multipliant les systèmes des équations (II.19) par la matrice de Park, on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases}$$

II.3.7. Expression de la puissance active et réactive :

La puissance active et réactive au stator est définie comme:

On a:

$$\begin{cases} V_s = V_{sd} + jV_{sq} \\ V_r = V_{rd} + jV_{rq} \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} P_s = \text{Re} ([V_s][I_s]) \\ Q_s = \text{Im} ([V_s][I_s]) \end{cases}$$

Avec la multiplication et tout les calculs il en résulta :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

Le même pour les puissances active et réactive rotorique

$$\begin{cases} P_r = V_{rd} I_{rd} + V_{rq} I_{rq} \\ Q_r = V_{rq} I_{rd} - V_{rd} I_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

II.3.8. Expression du couple électromagnétique :

Nous avons exprimé les équations de la machine, mais il reste également le couple électromagnétique. Ce dernier peut être obtenu à l'aide d'un bilan de puissance. La puissance électrique instantanée fournie aux enroulements statoriques et rotoriques en fonction des grandeurs d'axes (dq) est donnée par l'expression suivante :

$$P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq}$$

$$P_s = \left(R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \right) I_{sd} + \left(R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \right) I_{sq}$$

$$P_s = R_s(I_{sd}^2 + I_{sq}^2) + \left(\frac{d\varphi_{sd}}{dt} I_{sd} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} I_{sq} \right) + \omega_s(\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd})$$

Elle se décompose en trois termes :

- 1) Puissance dissipée en pertes joules

$$R_s(I_{sd}^2 + I_{sq}^2)$$

- 2) Puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétique avec la source

$$\frac{d\varphi_{sd}}{dt} I_{sd} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} I_{sq}$$

- 3) Puissance mécanique

$$\omega_s(\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd})$$

Et d'autre part on a :

$$C_{em} = \frac{P_m}{\Omega_s} ; \quad \Omega_s = \frac{\omega_s}{p} ; \quad C_{em} = p \frac{P_m}{\omega_s}$$

$$C_{em} = p(\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}) \quad (\text{II.36})$$

II.4. Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation

II.4.1. Généralités sur la commande vectorielle :

La commande vectorielle est l'une des méthodes de commande appliquée aux machines électriques. Elle nous permet d'établir un mode de fonctionnement découplé en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. En effet, elle nous permet d'assimiler le comportement d'une machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu, où le couple électromagnétique est proportionnel au courant d'induit [7].

II.4.1.1. Principe de la commande vectorielle:

La commande vectorielle des machines électriques à courants alternatif est une technique qui vise à retrouver le découplage qui caractérise la machine à courant continu à excitation séparée pour la quelle le courant inducteur contrôle le flux et celui de l'induit contrôle le couple.

De la même manière, l'application de la commande vectorielle à la MADA consiste à réaliser un découplage entre les grandeurs générant le couple et le flux de telle sorte que le flux soit régulé par la composante directe du courant statorique ou rotorique (selon l'orientation choisie) et le couple par la composante en quadrature. Ainsi, la commande

de la MADA sera ramenée à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée (figure II.5) [23].

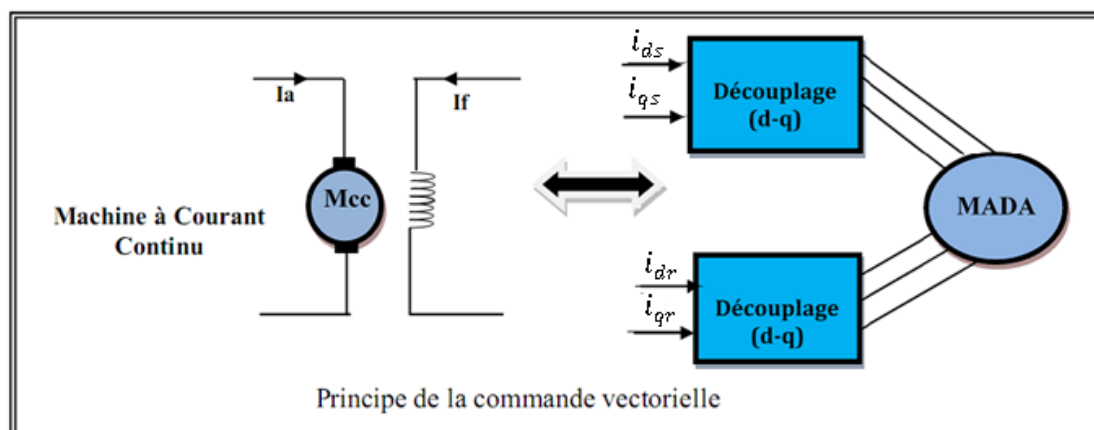


Fig. II.5 : Principe de la commande vectorielle.

II.4.1.2. Variantes de la commande vectorielle :

La commande à flux orienté appliquée aux moteurs électriques est utilisée pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. De nombreuses variantes de ce principe de commande ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer :

- Suivant la source d'énergie :
 - Commande en tension (Voltage Source Inverter).
 - Commande en courant (Current Controlled Inverter).
- Suivant les opérations désirées pour le flux :
 - Commande vectorielle de flux rotorique.
 - Commande vectorielle de flux statorique.
 - Commande vectorielle de flux d'entrefer (ou de flux magnétisant).
- Suivant la détermination de la position du flux :
 - Directe par mesure ou observation du vecteur de flux (module, phase).
 - Indirecte par contrôle de la fréquence de glissement [26].

II.4.2. Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation :

L'expression du couple électromagnétique de la MADA permet de considérer de point de vue conversion, la machine asynchrone comme l'association mécanique de deux machines à courant continu, ce qui permet de mieux interpréter le problème de couplage

entre les grandeurs des deux axes, direct et en quadrature. En effet, l'expression du couple électromagnétique d'une machine à courant continu compensée à excitation séparée, en absence de la saturation est donnée par.

$$C_{em} = K_a \varphi(I_f) I_a \quad (II.37)$$

$\varphi(I_f)$: Est le flux imposé par le courant d'excitation I_f .

I_a : Est le courant d'induit.

Selon l'expression (II.37), le flux dépend du courant d'excitation. Alors, si le flux est constant

Le contrôle du couple se fait uniquement par le courant I . Donc la production du couple et la création du flux sont indépendantes.

L'application de la commande vectorielle à la MADA consiste à réaliser un découplage entre les grandeurs générant le couple et le flux. Pour cela, on peut régler le flux par une composante du courant statorique ou rotorique (i_{ds} ou i_{dr}), et le couple par l'autre composante (i_{qs} ou i_{qr}). Ainsi, la dynamique de la MADA sera ramenée à celle d'une machine à courant continu. On peut schématiser cette méthode comme suit [26] :

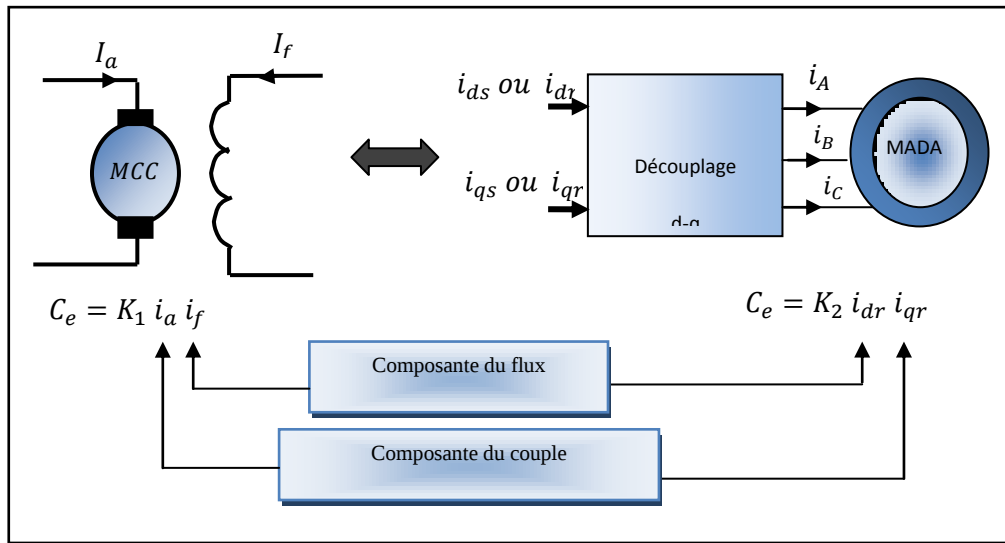


Fig. II.6 : Analogie entre la commande vectorielle d'une MADA et la commande d'une MCC.

II.4.2.1. Différents repères de référence :

La commande vectorielle est basée sur le choix d'un repère de référence. On peut à priori choisir les axes de référence selon l'un des flux de la machine, à savoir le flux statorique, le flux rotorique ou le flux d'entrefer [36].

Pour orienter le flux statorique, il faut choisir un référentiel (d, q) de telle manière que le flux statorique soit aligné avec l'axe (od) . Cela permet d'obtenir une expression du couple dans laquelle les deux composantes de courant statorique ou rotorique interviennent, la première produit le flux et l'autre produit le couple. L'orientation du flux statorique exige que [26] :

$$\varphi_{ds} = \varphi_s \text{ et } \varphi_{qs} = 0 \quad (\text{II.38})$$

Le principe de ce type d'orientation de flux est illustré par la figure (II.7) :

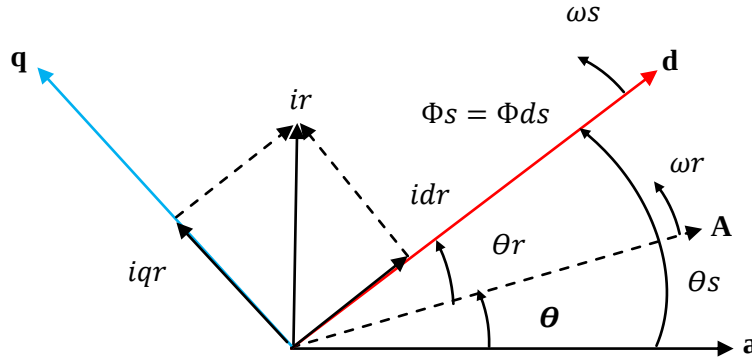


Fig. II.7 : Orientation du flux statorique.

Rappelons l'expression du couple électromagnétique :

$$C_{em} = p(\varphi_{ds}i_{qs} - \varphi_{qs}i_{ds}) \quad (\text{II.39})$$

D'autre part, et de la même manière, on peut orienter le flux rotorique suivant l'axe (od) de Park. Dans ce cas, le flux φ_r est aligné avec φ_{dr} . Alors, on aura :

$$\varphi_{dr} = \varphi_r \text{ et } \varphi_{qr} = 0 \quad (\text{II.40})$$

Donc l'expression du couple devient :

$$C_{em} = \frac{PM}{L_s} \varphi_r i_{qs} \quad (\text{II.41})$$

II.4.2.2. Lois de la commande vectorielle appliquée à la MADA :

Dans cette étude, l'alimentation de la machine asynchrone à double alimentation et à flux statorique orienté, est assuré par deux onduleurs de tension l'un au niveau du stator, et l'autre au niveau du rotor. Dans le repère triphasé a, b, c , la tension aux bornes de la phase a du stator s'exprime par la relation générale suivante :

$$V_{as} = R_s i_{as} + \frac{d\varphi_s}{dt} \quad (\text{II.42})$$

Si l'on néglige la résistance du bobinage statorique R_s , ce qui est une hypothèse assez réaliste pour les machines de moyenne et forte puissance et pour des conditions de fonctionnement à vitesse proche de la vitesse nominale, la relation (II.42) devient [26] :

$$V_{as} \simeq \frac{d\varphi_s}{dt} \quad (\text{II.43})$$

Selon les hypothèses de l'orientation du flux statorique, on peut écrire :

$$\begin{aligned} V_{ds} &= 0 \text{ et } V_{qs} = V_s = \omega_s \varphi_s \\ \Rightarrow \varphi_s &= \frac{V_s}{\omega_s} \end{aligned} \quad (\text{II.44})$$

II.4.2.3. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique :

Dans ce travail, on choisit l'orientation du flux statorique suivant l'axe d référentiel diphasé (d,q) lié au champ tournant.

On a donc:

$$\varphi_{sd} = \varphi_s \quad \& \quad \varphi_{sq} = 0 \quad (\text{II.45})$$

Alors l'équation de la MADA s'écrit comme suit :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

Et d'autre par l'équation du flux sont :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} = \varphi_s \\ \varphi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} = 0 \\ \varphi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.47})$$

A partir de l'équation du flux statorique et suivant la condition d'orientation du flux, les courants statoriques s'expriment par :

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{(\varphi_{ds} - M i_{dr})}{L_s} \\ i_{qs} = \frac{-M i_{qr}}{L_s} \end{cases} \quad (\text{II.48})$$

En remplaçant les deux composantes du courant statorique dans l'équation du couple électromagnétique (II.41), on obtient l'expression suivante :

$$C_{em} = \frac{-PM}{L_s} \varphi_s i_{qr} \quad (\text{II.49})$$

D'après cette équation et pour φ_s constant, le couple électromagnétique peut être contrôlé par le courant i_{qr} . Alors, le couple la MADA peut prendre une forme similaire à celle de la machine à courant continu.

Donc l'expression du couple par orienter le flux rotorique devient :

$$C_{em} = \frac{PM}{L_s} \varphi_r i_{qs} \quad (II.50)$$

Si l'on néglige la résistance du stator ' R_s ', les tensions statoriques V_{sd} , V_{sq} sont:

$$\begin{cases} V_{sd} = \frac{d\varphi_{sd}}{dt} = 0 \\ V_{sq} = \omega_s \varphi_{sd} = V_s \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{sd} = 0 \\ \varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \end{cases} \quad (II.51)$$

Ainsi dans ce repère, en prenant en considération les hypothèses émises, les puissances active et réactive deviennent alors :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq} \\ Q_s = V_{sq} i_{sd} - V_{sd} i_{sq} \end{cases} \quad (II.52)$$

D'après les conditions de l'orientation à flux statorique on peut écrire la relation de puissance active et réactive sous la forme suivant :

$$\begin{cases} P_s = V_{sq} i_{sq} \\ Q_s = V_{sq} i_{sd} \end{cases} \quad (II.53)$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (II.48) et la valeur de φ_s de l'équation (II.44) dans l'équation (II.53), nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive.

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s \varphi_s}{L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (II.54)$$

En approximant φ_s par $\frac{V_s}{\omega_s}$ l'expression de la puissance réactive Q_s devient alors :

$$Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{rd} \quad (II.55)$$

II.4.2.4. Relation entre tensions rotoriques et courants rotoriques :

Exprimant d'abord les flux rotoriques d'après les équations (II.47) en remplaçant les courants statoriques par leur expression dans l'équation (II.48).

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \left(L_s - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{dr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{qr} = \left(L_s - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (II.56)$$

Ces expressions des flux rotoriques d'axe d et q sont alors intégrée aux expressions des tensions diphasées de l'équation (II.46), avec $g\omega_s = (\omega_s - \omega)$. Nous obtenons alors :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt}(L_r I_{rd} + M I_{sd}) - g\omega_s (L_r I_{rq} + M I_{sq}) \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt}(L_r I_{rq} + M I_{sq}) + g\omega_s (L_r I_{rd} + M I_{sd}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{rd}}{dt} - g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{rq}}{dt} + g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + g\omega_s \frac{M\phi_s}{L_s} \end{cases} \quad (II.57)$$

Après la transformation de la place des équations (II.57) deviennent:

$$\begin{cases} V_{rd} = (R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s})s) I_{rd} - g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \\ V_{rq} = (R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s})s) I_{rq} + g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + g\omega_s \frac{M\phi_s}{L_s} \end{cases} \quad (II.58)$$

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

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + g\omega_s \frac{M\phi_s}{L_s} \end{cases}$$

On à $\phi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$ donc la dernier relation est écrire :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + g\omega_s \frac{MV_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (II.59)$$

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

En revanche, le terme $g\omega_s \frac{MV_s}{\omega_s L_s}$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraine une erreur de trainage. Le contrôle du synthèse devra donc prendre en compte cette erreur.

Les équations (II.54), (II.55) et (II.58) permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler [3].

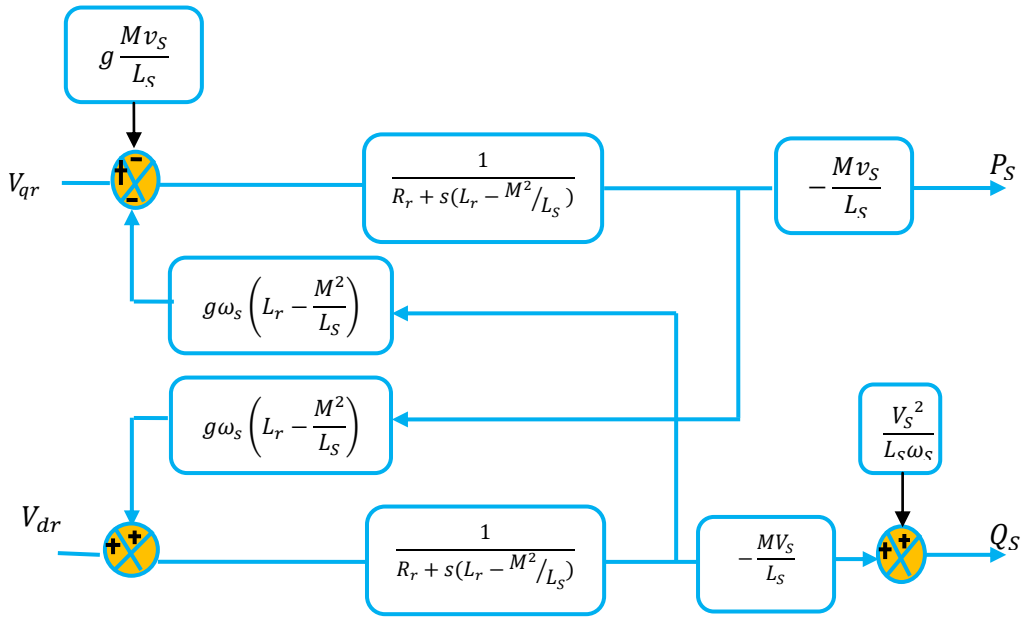


Fig.II.8 : Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.

II.4.2.5. Types de commande vectorielle :

L'utilisation de la commande vectorielle des machines asynchrones à double alimentation dans les applications dans l'énergie éolienne nécessite une haute performance dynamique concernant la commande du couple et de la vitesse. Pour cela, nous devons connaître, avec exactitude, le vecteur flux statorique (amplitude et phase).

Deux méthodes ont été développées soit :

- La commande vectorielle directe.
- La commande vectorielle indirecte [28].

II.4.2.5.1. Commande vectorielle directe :

Le flux rotorique est mesuré à partir de capteurs à effet hall placés sous les dents du stator. Ces capteurs donnent des valeurs locales du flux. Il faut ensuite traiter ces valeurs pour obtenir le flux global.

Cette méthode présente des inconvénients au niveau de la fiabilité de la mesure soit :

- Le problème de filtrage du signal mesuré.
- La mesure varie en fonction de la température.
- Le coût de production est élevé. (Capteurs, conditionneurs, filtre,...).

Cette commande n'est donc pas optimale [28].

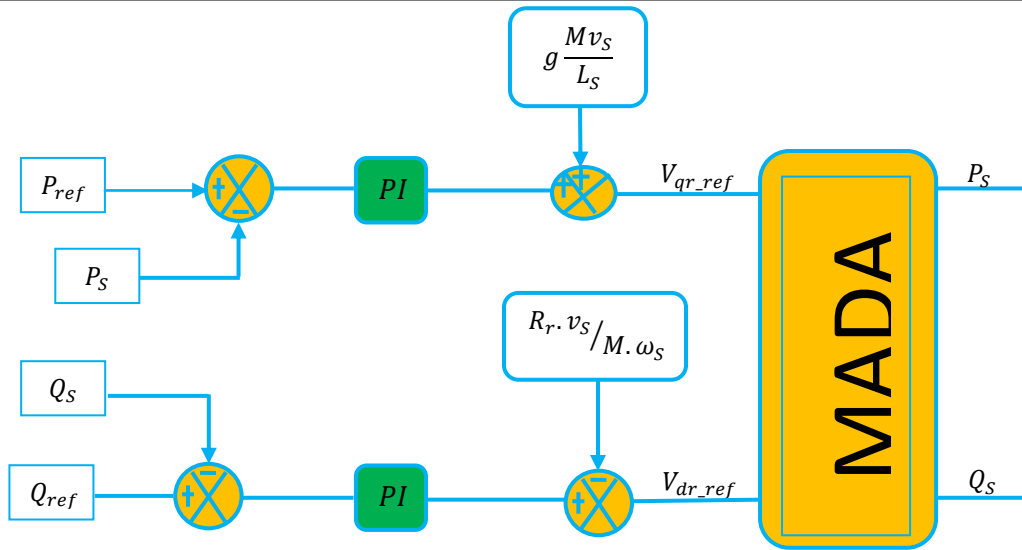


Fig. II.9 : Schéma de principe de la commande directe.

II.4.2.5.2. Commande indirecte :

La commande indirecte est basée sur le principe à ne pas mesurer (ou estimer) l'amplitude du flux mais seulement sa position. Elle consiste à estimer la position du vecteur du flux, et de régler son amplitude en boucle ouverte. Les tensions ou les courants assurant l'orientation du flux et le découplage sont évalués à partir d'un modèle de la machine en régime transitoire. Cette méthode a été favorisée par le développement des microprocesseurs, elle est très sensible aux variations paramétriques de la machine. Il est important de souligner que la méthode indirecte est la plus simple à réaliser et la plus utilisée que la méthode directe, mais le choix entre les deux méthodes varie d'une application à l'autre [17].

II.4.2.5.2.1. Commande indirecte en boucle ouverte :

Dans le souci de garantir une bonne stabilité du système nous introduisons une boucle de régulation des courants rotoriques dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine. On établit ainsi le système de régulation de la figure (II.9) [29].

Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courants rotoriques sans aucun retour au système, en imposant les tensions de références V_{rd} et V_{rq} qui convient. De ce fait, la commande par boucle interne qui contrôle le courant I_r est alors appliquée à la MADA pour des raisons de sécurité de fonctionnement. En outre, la commande indirecte sans bouclage de puissance (en boucle

ouverte) permet de contrôler séparément les courants I_{rd} et I_{rq} en boucle fermée et les puissances P_s et Q_s en boucle ouverte. Le schéma de cette commande est illustré sur la figure (II.10).

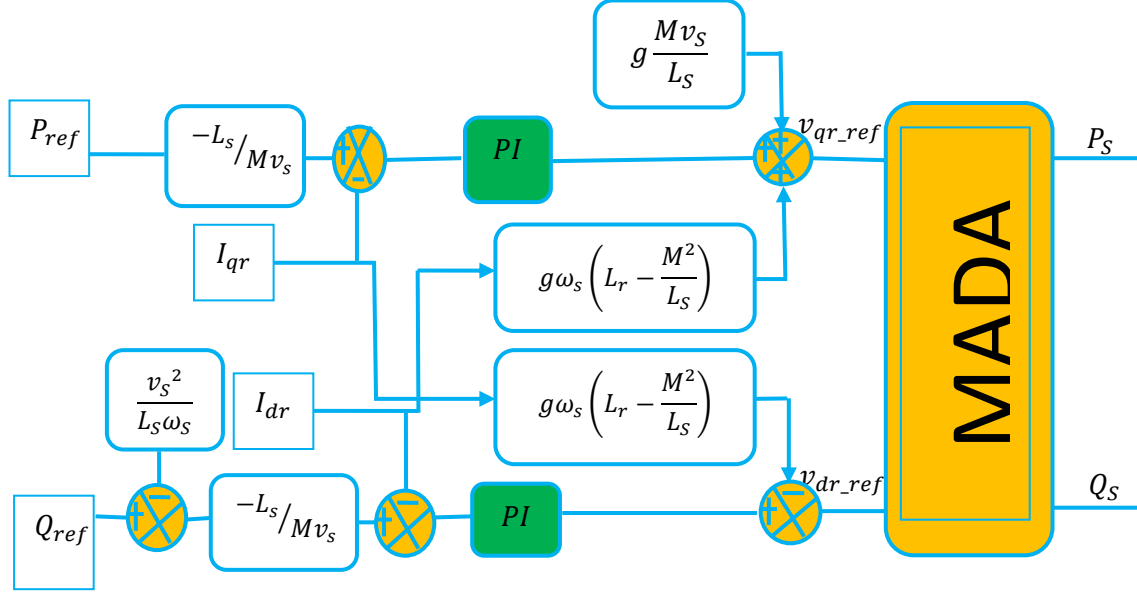


Fig.II.10 : Schéma de la commande indirecte en boucle ouverte.

II.4.2.5.2.2. Commande indirecte en boucle fermée :

Dans le but d'améliorer la commande précédente, nous allons introduire une boucle de régulation supplémentaire au niveau des puissances afin d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système. Nous aboutissons au schéma bloc présenté en figure (II.9) sur lequel on distingue bien les deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance. Ce type de régulation donne une dynamique satisfaisante et une erreur statique nulle [29].

Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courant rotorique avec un retour du système. Qui permet le réglage des puissances, on distingue donc, une commande par boucle en cascade de la puissance et du courant rotorique pour chaque axe, puisqu'elle permet de contrôler séparément les courants I_{rd} et I_{rq} et les puissances Q_s et P_s en boucle fermée. Le schéma simplifié de l'ensemble commande est illustré sur la figure (II.11).

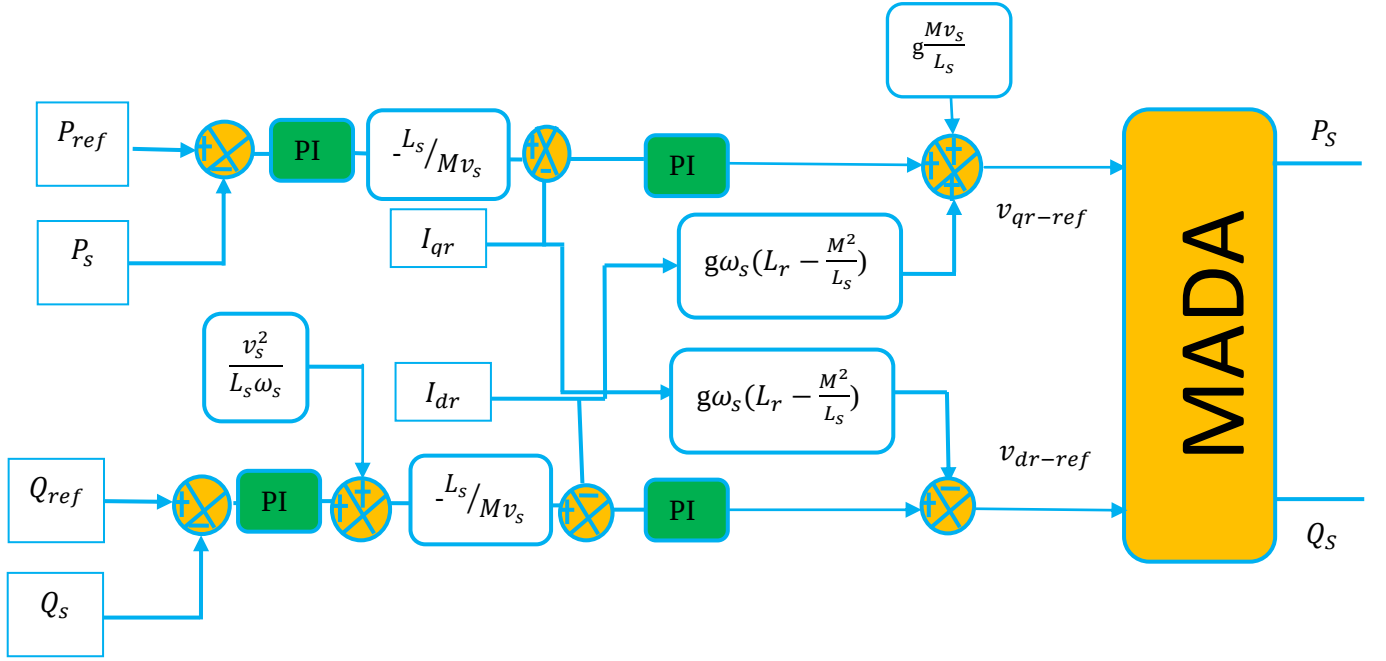


Fig.II.11 : Schéma de la commande indirecte en boucle fermée.

Les gains des correcteurs dans la commande indirecte en boucle (ouverte et fermée) sont calculés de la même manière qu'à section.

II.4.2.6. Mise en place d'un régulateur Proportionnel-Intégral :

Considérons le schéma bloc du système à réguler de figure (II.8) afin de déterminer les éléments à mettre en place dans la boucle de régulation. Pour réguler la machine, nous allons mettre en place une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant tout en compensant les termes de perturbation. Nous négligeons les termes de couplage entre les deux axes de contrôle du fait de la faible valeur du glissement. Nous obtenons alors une commande vectorielle avec un seul régulateur par axe, présentée sur la figure (II.12) [30].

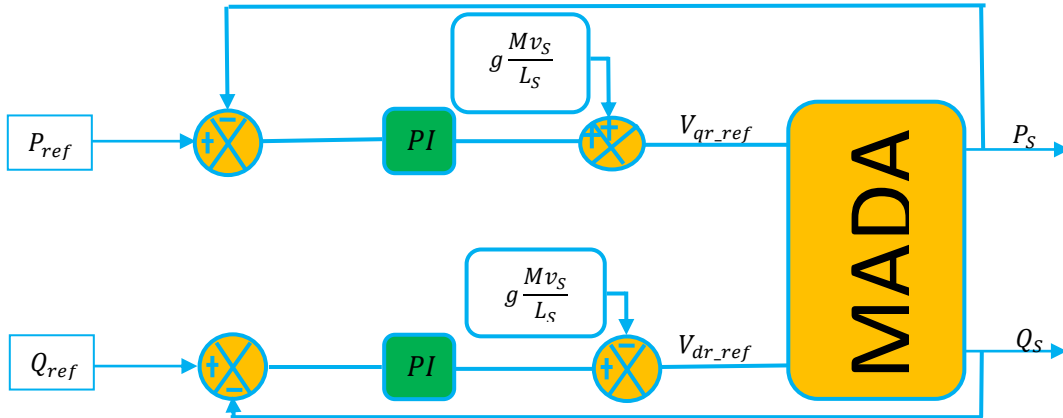


Fig.II.12 : Schéma bloc d'un système régulé par un PI.

II.4.2.6.1. Calculs des régulateurs :

Les régulateurs à action proportionnelle-intégrale PI sont très répandus dans le domaine de la commande des machines électriques, l'action du régulateur proportionnelle P assure la rapidité de la réponse dynamique, et l'action du régulateur intégral élimine l'erreur statique en régime permanent. Notons qu'une structure IP a été utilisée dans la boucle de régulation de la vitesse, elle est parfois bien meilleure que celle à régulateur PI classique [31].

II.4.2.6.2. Synthèse du régulateur PI pour le contrôle de la puissance :

C'est un régulateur simple et rapide à mettre en œuvre. La figure (II.13) montre un système en boucle fermée corrigé par un régulateur PI. Dans notre cas, la fonction de transfert est sous la forme $K_p + \frac{K_i}{p}$ comme illustré par la figure (II.13).

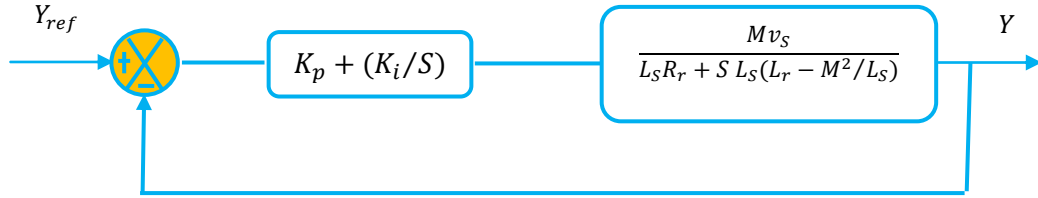


Fig. II.13 : Schéma bloc d'un système régulé par un PI.

La fonction de transfert en boucle ouverte (*FTBO*) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante [30] :

$$FTBO = \frac{s + \frac{k_i}{k_p}}{\frac{s}{k_p}} \cdot \frac{\frac{V_s M}{L_s(L_r - M^2/L_s)}}{s + \frac{R_r}{(L_r - M^2/L_s)}}$$

Nous choisissons la méthode de compensation des pôles pour la synthèse du régulateur, ce qui se traduit par l'égalité suivante :

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

Fonction de transfert en boucle ouverte devient alors:

$$FTBO = F_o(t) = \frac{\frac{V_s M}{L_s(L_r - M^2/L_s)}}{\frac{s}{k_p}}$$

Notons toutefois que la compensation de constantes de temps n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des

correcteurs dépendent directement de ces paramètres. Si tel n'est pas le cas la compensation est moins performant.

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

$$FTBF = \frac{F_o(t)}{1 + F_o(t)} = \frac{1}{1 + \tau_r s} \quad \text{avec} \quad \tau_r = \frac{1}{k_p} \frac{L_s(L_r - M^2/L_s)}{V_s M}$$

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

S'imposer une valeur plus faible n'améliorerait probablement pas les performances de l'ensemble, mais risquerait d'engendrer des perturbations lors des régimes transitoires en provoquant des dépassements et des instabilités indésirables [30,32,33].

On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

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

Nous avons utilisé la méthode de compensation des pôles pour sa rapidité, il est évident qu'elle n'est pas la seule méthode valable pour la synthèse du régulateur PI.

II.5. Commande vectorielle de la MADA avec onduleur a deux niveaux

Les onduleurs sont les convertisseurs statiques continu alternatif permettent de fabriquer une source de tension alternative à partir d'une source de tension continue.

L'onduleur de tension est constitué de trois bras de commutation à transistors ou à thyristors. Chaque bras composé de deux cellules comportant chacune une diode et un transistor ou un thyristor. Tous ces éléments sont considérés comme des interrupteurs idéaux [34]. [19].

La tension de ce dernier est contrôlée par une technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la tension de sortie de l'onduleur.

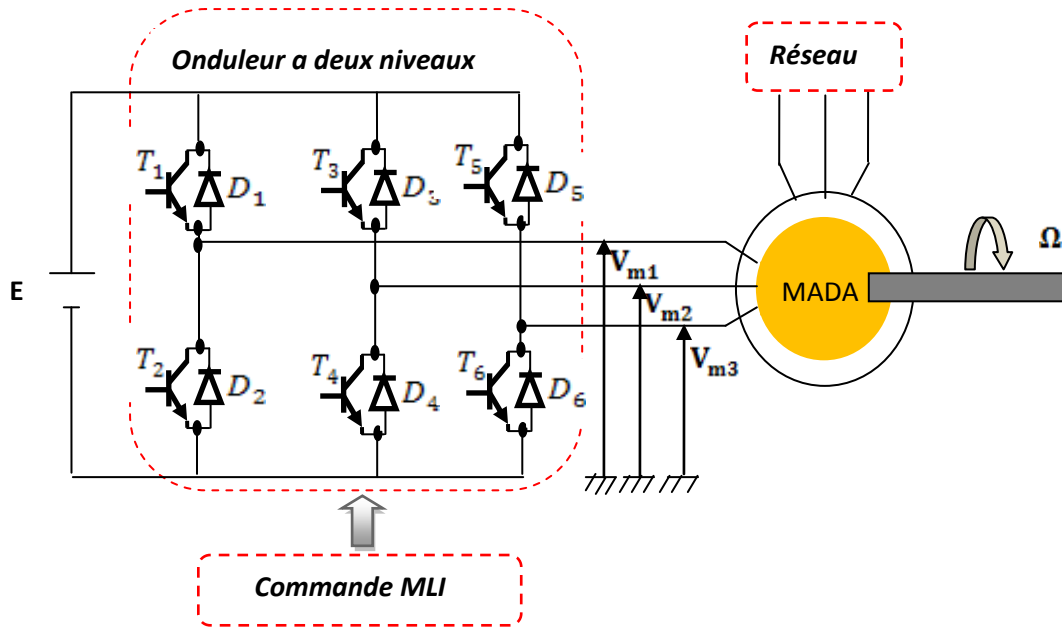


Fig. II.14 : Schéma électrique de la liaison de rotor via un convertisseur MLI.

II.5.1. Onduleur a deux niveaux :

Le rotor de la MADA est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux équipé avec des dispositifs semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. Pour faciliter la modélisation du convertisseur de puissance, on suppose que les interrupteurs semi-conducteurs sont parfaits (Figure II.14).

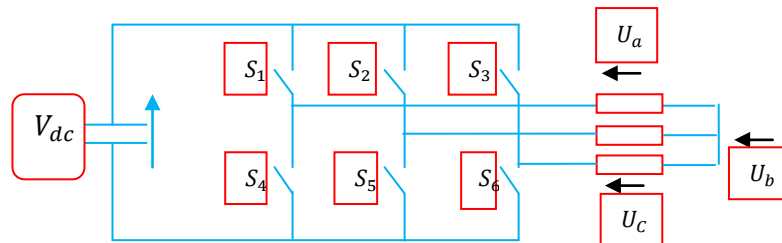


Fig. II.15 : Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.

On peut exprimer les tensions en ligne en fonction de la tension dans l'étape continue et de l'état des commutateurs. On définit pour ça les variables S_a , S_b et S_c en fonction de l'état des commutations dans les trois branches du convertisseur [35].

- Branche1 :

$S_a=0$ Si S_1 est ouvert et S_4 est fermé ;

$S_a=1$ Si S_1 est fermé et S_4 est ouvert.

- Branche2 :

$S_b = 0$ Si S2 est ouvert et S5 est fermé;

$S_b = 1$ Si S2 est fermé et S5 est ouvert.

- Branche3 :

$S_c = 0$ Si S3 est ouvert et S6 est fermé;

$S_c = 1$ Si S3 est fermé et S6 est ouvert.

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors par :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{dc}(S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{dc}(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{dc}(S_c - S_a) \end{cases}$$

Or, si on considère que les tensions sont équilibrées on peut déduire les expressions des tensions en lignes par rapport aux tensions composées :

$$\begin{cases} V_a = 1/3 (U_{ab} - U_{ca}) \\ V_b = 1/3 (U_{bc} - U_{cb}) \\ V_c = 1/3 (U_{ca} - U_{bc}) \end{cases}$$

Ainsi l'onduleur est pris en compte dans les simulations par l'intermédiaire de l'équation classique suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}$$

II.5.2. Stratégie de commande MLI :

La technique de modulation de largeur d'impulsion triangulo-sinusoïdale consiste à comparer en chaque instant un signal triangulaire ω_t de fréquence f_p que nous appellerons porteuse, à trois signaux de commande, notés V_a, V_b et V_c . Ces signaux V_i ont les images des tensions que l'on souhaite appliquer sur chaque phase. Les commutations des interrupteurs ont lieu quand on a une égalité du type :

$$V_i(t) = \omega(t)$$

Deux paramètres caractérisent cette stratégie :

- L'indice de modulation « m » qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse f_p sur la fréquence de la tension de référence f :

$$m = \frac{f_p}{f}$$

- Taux de modulation « r » qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_{ref}) et celle de la porteuse (U_p) :

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p}$$

Le choix d'un indice de modulation « m » multiple de trois nous permet d'éliminer les harmoniques d'ordre trois qui représente un handicap de cette technique. Cependant, le taux de modulation « r » varie suivant la référence imposée [35].

II.5.3. Algorithme de commande :

L'algorithme de commande de la stratégie triangulo -sinusoïdale pour un onduleur à deux niveaux pour un bras k peut être résumé en 2 étapes.

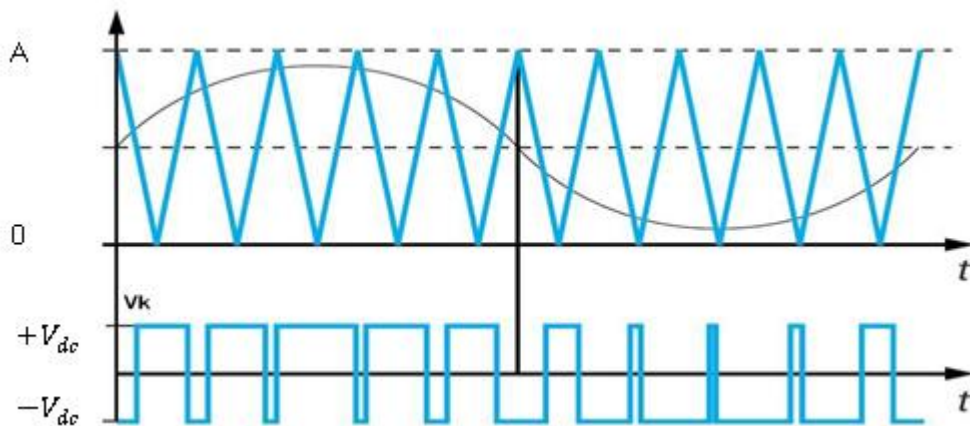
❖ Etape 1 :

$$\begin{cases} V_{ref} \geq U_p \Rightarrow V_k = V_{dc} \\ V_{ref} < U_p \Rightarrow V_k = -V_{dc} \end{cases}$$

Tel que V_{dc} est la tension du bus continue.

❖ Etape 2 :

$$\begin{cases} V_k = V_{dc} \Rightarrow S_k = 1 \\ V_k = -V_{dc} \Rightarrow S_k = 0 \end{cases}$$



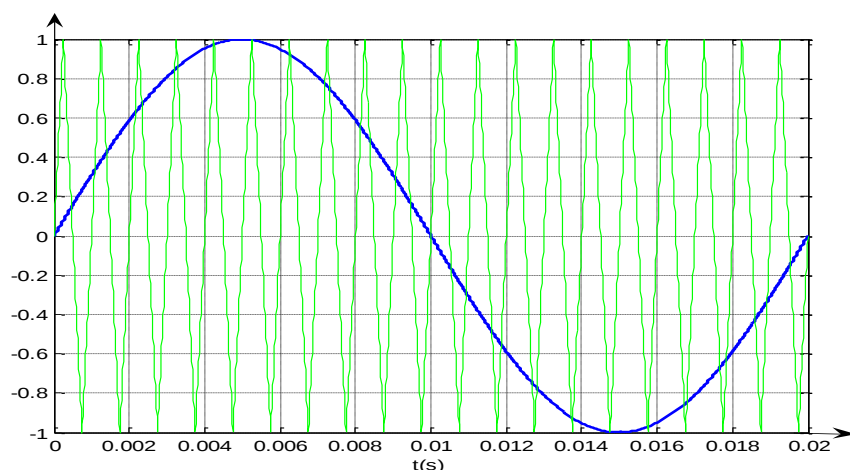


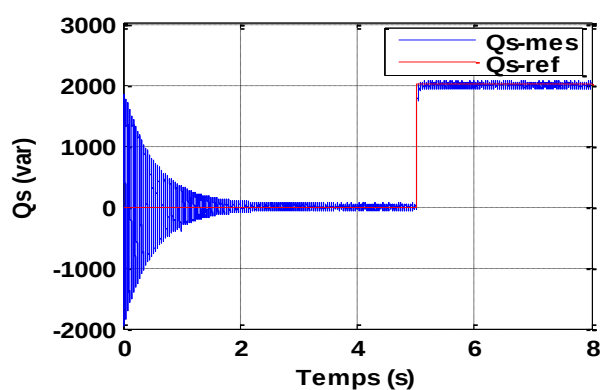
Fig. II.16 : Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulo-sinusoidale à une porteuse.

II.6. Simulation de la commande de la MADA

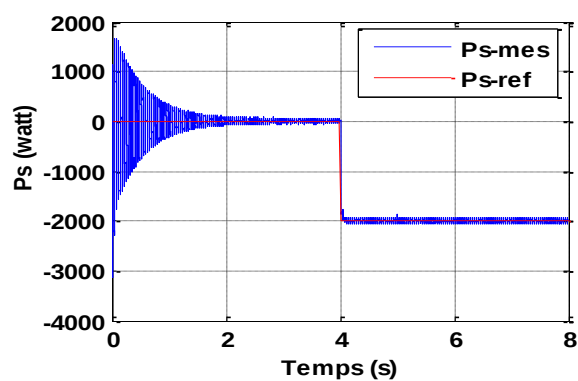
Pour réaliser la simulation de la MADA en fonctionnement génératrice, nous avons utilisé le logiciel MATLAB-Simulink, à l'aide duquel nous avons modélisé toutes les parties du système à savoir la machine, l'onduleur, la commande MLI, les régulateurs et divers composants nécessaires à la commande. Nous avons soumis le système à des échelons de référence afin d'étudier le comportement de la régulation des puissances active et réactive de la machine transmises au réseau.

II.6.1. Résultats de simulations :

Les résultats de simulation sont présentés sur les figures ci-dessous :



a- Puissance réactive statorique



b- Puissance active statorique

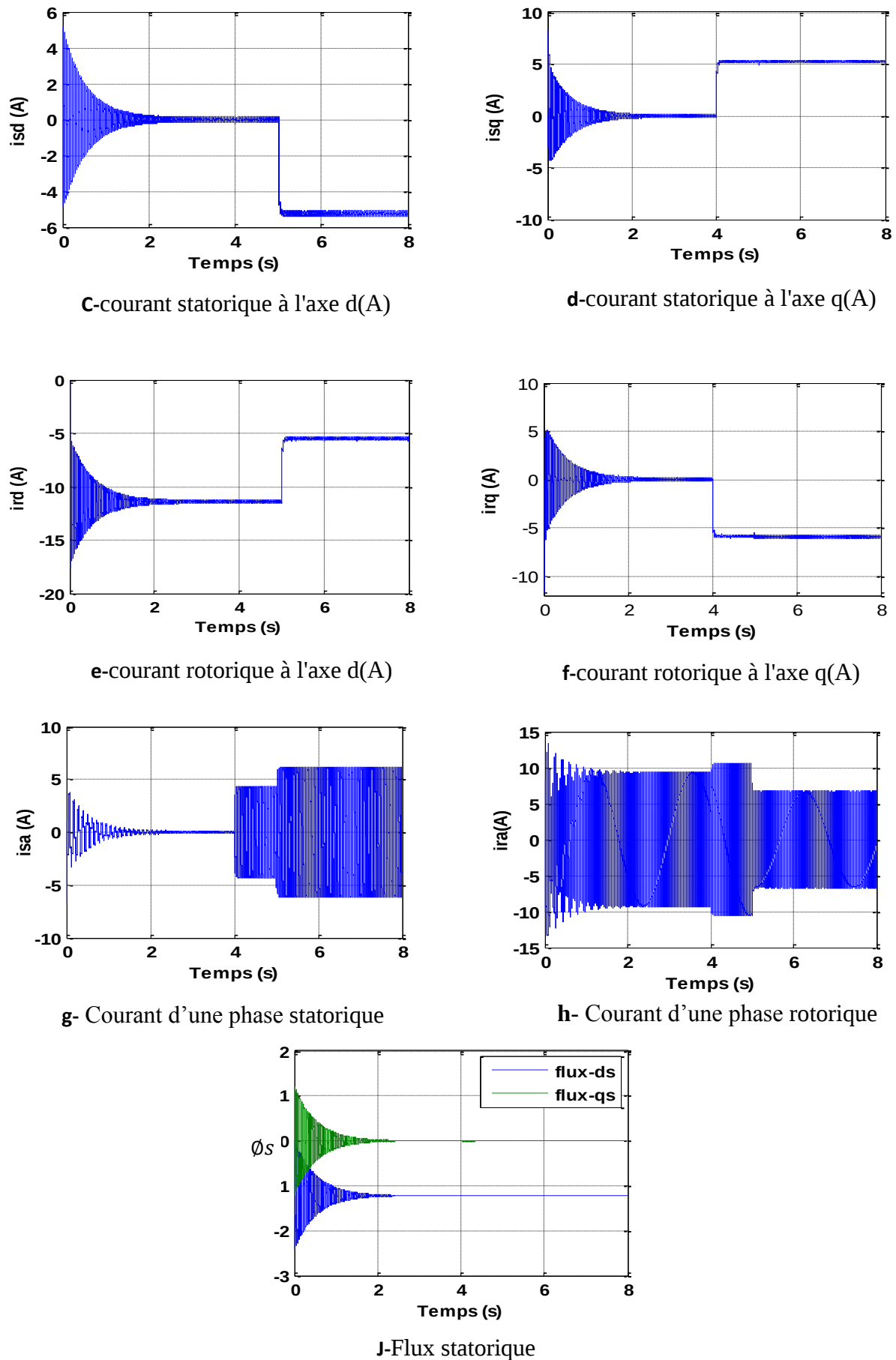


Figure II-17 Résultat de simulation d'une commande vectorielle de la MADA

II.6.2. Interprétations des Résultats

Ces résultats de simulation présentent les différentes courbes obtenus par la commande des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la MADA, cette commande permet de découpler les expressions de la puissance actives et réactives du générateur ou encoure celle du flux et du couple. La composante quadrature du courant rotorique i_{qr} contrôle le couple électromagnétique, et la composante directe i_{dr} contrôle la puissance réactive échangée entre le stator et le réseau.

- Nous pouvons constater que le flux statorique suit sa référence suivant l'axe (d) avec une composante quadrature presque nulle, ce qui signifie que le découplage de la machine est réalisé avec succès.
- La puissance active du côté statorique est négative ce qui signifie que le réseau dans ce cas est un récepteur de l'énergie fournie par la MADA.
- La puissance réactive est nulle, à l'instante $t=[0 \ 4]$ c'est une condition de fonctionnement de la MADA pour avoir un facteur de puissance unitaire.

II.7. Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, on a présenté la commande de la machine asynchrone double alimentée pilotée par le rotor à l'aide de deux convertisseurs électroniques à commande MLI. L'un de ces deux convertisseurs joue le rôle d'un redresseur à transistors à commutation forcée et l'autre convertisseur est un onduleur. Cette combinaison électrique nous a permis d'exécuter la stratégie de commande conçue à ce système éolien étudié, la structure est associée à des stratégies de commande qui règle le couple électromagnétique recherche automatique sur un rendement de puissance proche de celui du maximum théorique sans correction de la vitesse de la turbine.

Chapitre III
Commande du système
éolien a vitesse variable basé
sur une MADA

III.1.Introduction

La turbine éolienne permet la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique transmise à l'ordre de la génératrice. Les différents éléments constituant une éolienne sont conçus pour maximiser la conversion énergétique. L'objectif est d'avoir un bon compromis entre la caractéristique couple/vitesse de la turbine et de la génératrice. Pour satisfaire cela, l'éolienne doit comporter deux systèmes qui permettent de la contrôler mécaniquement et électriquement.

Dans ce chapitre nous allons traiter l'alimentation continue de l'onduleur de tension qui est supposé constante dans le chapitre précédent, ceci comprendra son maintien à la valeur désirée et limitation des harmoniques injectées dans le réseau par l'utilisation d'un redresseur commandé par la technique MLI. L'ensemble composé du redresseur, du bus continu et de l'onduleur formera la cascade qui sera la liaison entre le rotor et le réseau, par la suite, on a modélisera la turbine, son contrôle, et puis, l'asservissement de toute la chaîne de conversion éolienne.

III.2.Architecture du dispositif de commande

L'architecture du dispositif de commande est présentée à la Figure (III.1). Elle est basée sur le modèle triphasé de la chaîne de conversion électromécanique du système éolien.

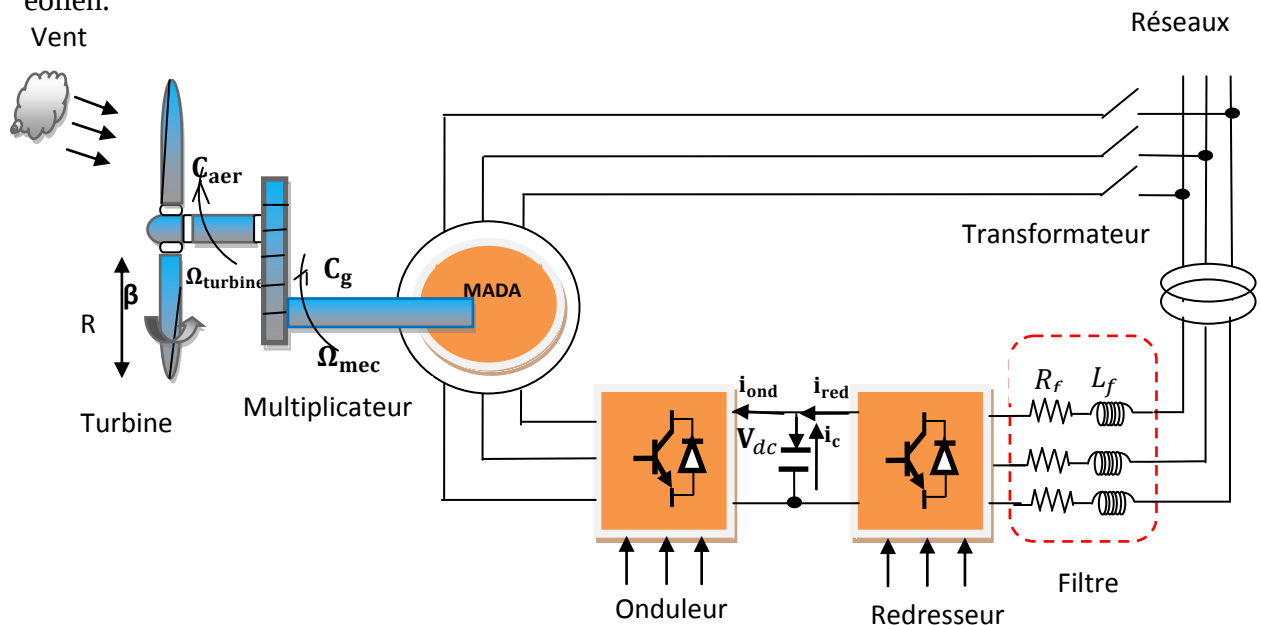


Fig. III.1 : Architecture de commande du système éolien

D'après la Figure III.1, trois commandes détaillées par la suite sont donc nécessaires pour assurer le fonctionnement de l'éolienne :

- la commande d'extraction du maximum de puissance du vent par un contrôle dit 'MPPT' (Maximum Power Point Tracking),
- la commande du CCM en contrôlant le couple électromagnétique et la puissance réactive statorique de la MADA,
- la commande du CCR en contrôlant la tension du bus continu et les puissances active et réactive échangées avec le réseau.

III.3. Extraction du maximum de la puissance du vent

Le fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable peut être défini selon trois zones, comme l'illustre la Figure III-2 [4] :

- **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 Ω_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 β). 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.

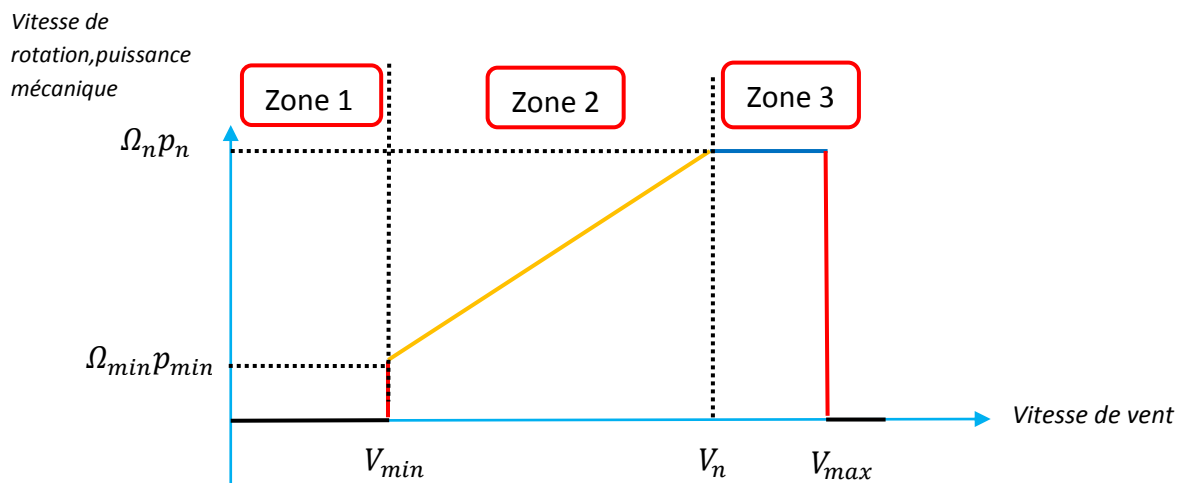


Fig .III.2 : Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable.

Dans le cadre de cette thèse, 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 β 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. Une modélisation et une commande du système d'orientation des pales seraient alors nécessaires sachant que les commandes du CCM et du CCR resteraient les mêmes pour les zones 2 et 3. Or, notre travail porte davantage sur les commandes des grandeurs électriques ainsi le système d'orientation des pales permettant de dégrader le rendement aérodynamique de l'éolienne ne sera alors pas étudié dans ce manuscrit.

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. Ce principe est connu sous la terminologie MPPT. On peut distinguer deux modes de contrôle [9] :

- le contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation.
- le contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation.

Pour l'étude de ces deux modes de contrôle, on supposera que la MADA et le CCM sont idéaux : quelle que soit la puissance mécanique transmise par la turbine, le couple électromagnétique développé par la MADA est donc à tout instant égal à sa valeur de référence imposée par la commande.

III.4. Stratégie de maximisation de puissance "MPPT":

III.4.1. Bilan de puissance [9]

L'équation (II.2) quantifie la puissance capturée par la turbine éolienne. Cette puissance peut être essentiellement maximisée en ajustant le coefficient C_p . Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la génératrice (ou encore du ratio de vitesse), l'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance électrique générée (donc le couple) en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quel que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice. En régime permanent, la puissance aérodynamique (P_{aer}) diminuée des pertes (représentées par les frottements visqueux) est convertie directement en puissance électrique. (figure III.3)

$$P_{elec} = P_{aer} - P_{ertes} \quad (III. 1)$$

La puissance mécanique stockée dans l'inertie totale J et apparaissant sur l'arbre de la génératrice (P_{mec}) est exprimée comme étant le produit entre le couple mécanique (C_{mec}) et la vitesse mécanique (Ω_{mec}) :

$$P_{mec} = C_{mec} \cdot \Omega_{mec} \quad (III. 2)$$

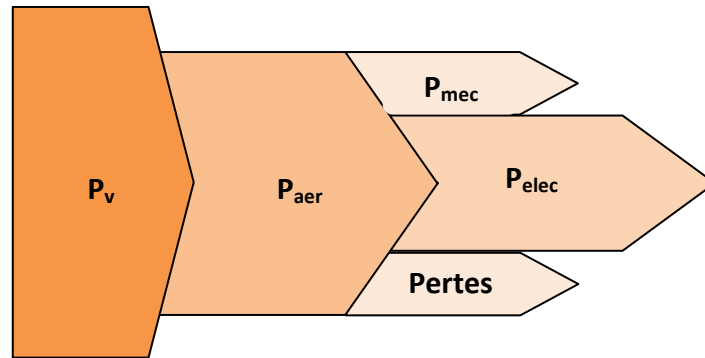


Fig. III.3 : Diagramme de conversion de puissance

maintenant, nous allons présentons les méthodes et structures de commande qui sont maintenant expliquées, qui permettant de maximiser l'extraction de la puissance éolienne.[01] (figure III.4) :

- Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique.
- Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique.

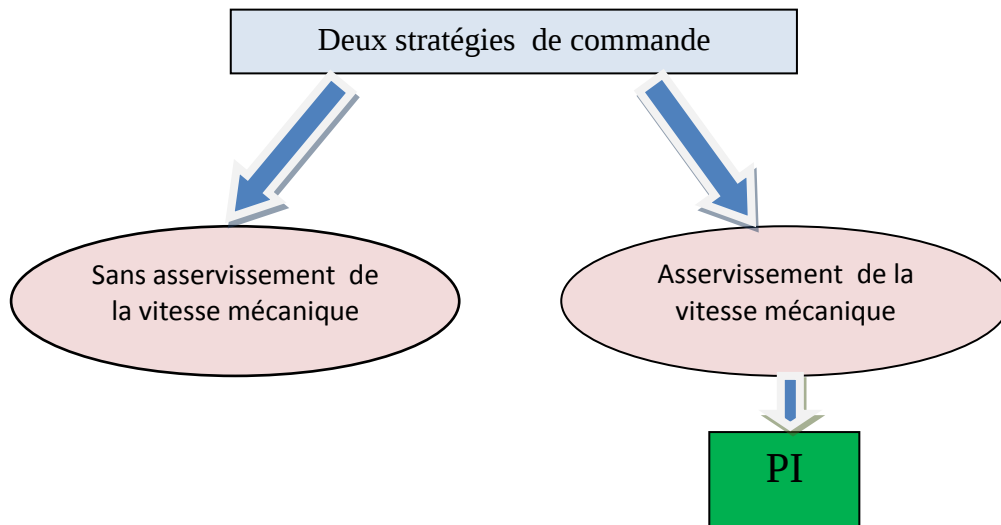


Fig. III.4 : Stratégies de commande de la turbine étudiée.

III.4.2. Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique [20]

Principe général :

Le vent est une grandeur stochastique, de nature très fluctuante. Ces fluctuations constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne et créent donc des variations de puissance.

Pour cette étude, on supposera que la machine électrique et son variateur sont idéaux et donc, que quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égal à sa valeur de référence.[20]

$$C_{em} = C_{em-ref} \quad (III.3)$$

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée.

Comme à été expliqué auparavant, la vitesse est influencée par l'application de trois couples : un couple éolien, un couple électromagnétique et un couple résistant. En regroupant l'action de ces trois couples, la vitesse mécanique n'est plus régie que par l'action de deux couples, le couple issu du multiplicateur C_g et le couple électromagnétique C_{em} :

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (C_g - f \cdot \Omega_{mec} - C_{em}) \quad (III.4)$$

La structure de commande consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence. le couple électromagnétique de référence C_{em-ref} permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la vitesse de référence Ω_{ref} est obtenu par une relation inverse indirecte :

$$C_{em-ref} = PI.(\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (III.5)$$

Ou

- PI est le régulateur de vitesse.
- Ω_{ref} est la vitesse mécanique de référence.

Cette vitesse de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer ($\Omega_{turbine-ref}$) pour maximiser la puissance extraite. En prenant en compte le gain du multiplicateur, on a donc

$$\Omega_{ref} = G. \Omega_{turbine-ref} \quad (III.6)$$

La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle correspondant à la valeur optimale du ratio de vitesse $\lambda_{C_{Pmax}}$ (à β constant et égal à 0°) permettant d'obtenir la valeur maximale du C_p

$$\Omega_{turbine-ref} = \frac{\lambda_{c_{pmax}} \cdot V}{R} \quad (III. 7)$$

III.4.2.1. Conception du correcteur de vitesse [20]

L'action du correcteur de vitesse doit accomplir deux tâches:

- Il doit asservir la vitesse mécanique à sa valeur référence
- Il doit atténuer l'action du couple éolienne qui constitue une entrée perturbatrice

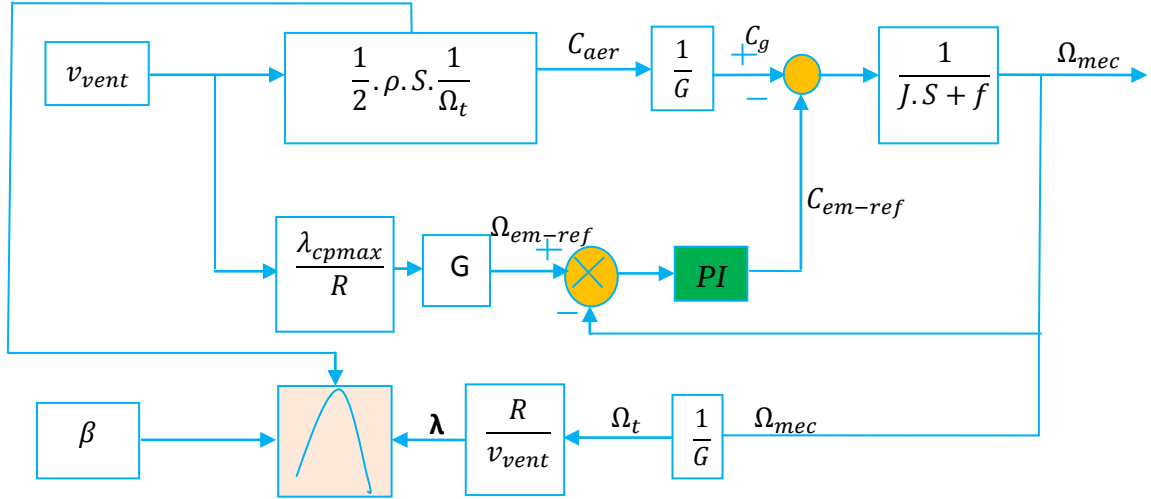


Fig. III.5 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse

III.4.3. Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique [20]

En pratique, une mesure précise de la vitesse du vent est difficile à réaliser. Ceci pour deux raisons :

- L'anémomètre est situé derrière le rotor de la turbine, ce qui erroné la lecture de la vitesse du vent.
- Ensuite, le diamètre de la surface balayée par les pales étant important (typiquement 3 m pour une éolienne de 10KW), une variation sensible du vent apparaît selon la hauteur où se trouve l'anémomètre. L'utilisation d'un seul anémomètre conduit donc à n'utiliser qu'une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est donc pas suffisamment représentative de sa valeur moyenne apparaissant sur l'ensemble des pales.

Une mesure erronée de la vitesse conduit donc forcément à une dégradation de la puissance captée selon la technique d'extraction précédente. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse [20].

Cette seconde structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (III.8)$$

Ceci revient à considérer le couple mécanique C_{mec} développé comme étant nul. Donc, en négligeant l'effet du couple des frottements visqueux ($C_{vis} \approx 0$), on obtient :

$$C_{em} = C_g \quad (III.9)$$

Le couple électromagnétique de réglage est déterminé à partir d'une estimation du couple éolien :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{aer-estimé}}{G} \quad (III.10)$$

Le couple éolien peut être déterminé à partir d'estimation de la vitesse du vent et de la mesure de la vitesse mécanique en utilisant l'équation :

$$C_{aer-estimé} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine-estimé}} \cdot V_{estimé}^3 \quad (III.11)$$

Une estimation de la vitesse de la turbine $\Omega_{turbine-estimé}$ est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique :

$$\Omega_{turbine-estimé} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (III.12)$$

La mesure de la vitesse du vent apparaissant au niveau de la turbine étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue à partir de l'équation :

$$V_{estimé} = \frac{\Omega_{turbine-estimé} \cdot R}{\lambda} \quad (III.13)$$

En regroupant ces quatre équations (III.13, III.11, III.10, III.12), on obtient une relation globale de contrôle :

$$C_{em-ref} = \frac{C_p}{\lambda^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (III.14)$$

Pour extraire le maximum de la puissance générée, il faut fixer le ratio de vitesse à la valeur λ_{cpmax} qui correspond au maximum du coefficient de puissance $C_p max$ (figure III.3). Le couple électromagnétique de référence doit alors être réglé à la valeur suivante :

$$C_{\text{em-ref}} = \frac{C_p}{\lambda_{\text{cpmax}}^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_{\text{mec}}^2}{G^3} \quad (\text{III.15})$$

L'expression du couple de référence devient alors proportionnelle au carré de la vitesse de la génératrice:

$$C_{\text{em-ref}} = A \Omega_{\text{mec}}^2 \quad (\text{III.16})$$

Avec:

$$A = \frac{C_p}{\lambda_{cpmax}^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{1}{G^3} \quad (III.17)$$

La représentation sous forme de schéma-blocs est montrée à la figure (III.6)

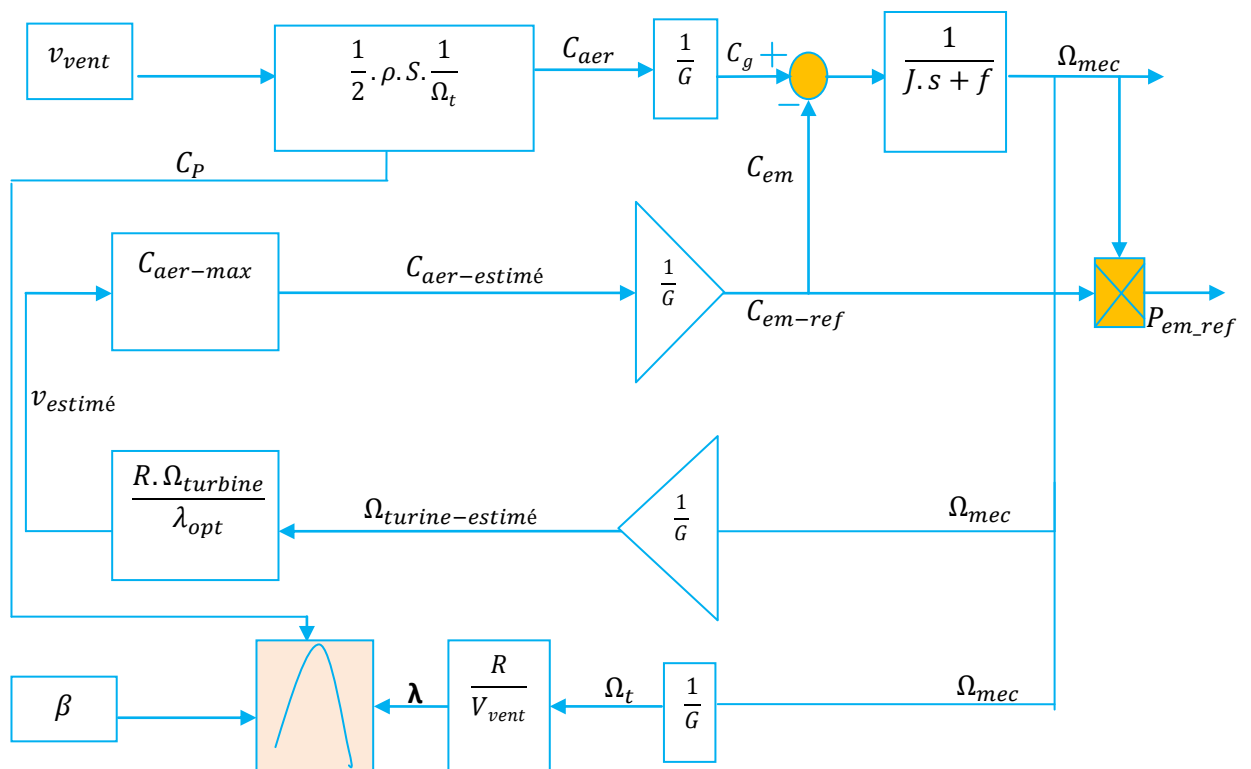


Fig. III.6 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse

III.5. Commande du convertisseur côté MADA –CCM [21]

Dans cette partie, nous nous intéressons à la commande du CCM dont le principe est illustré à la Figure (III-7)

Les contrôles du couple électromagnétique et de la puissance réactive statorique seront obtenus en contrôlant les courants rotoriques d'axes d-q de la MADA

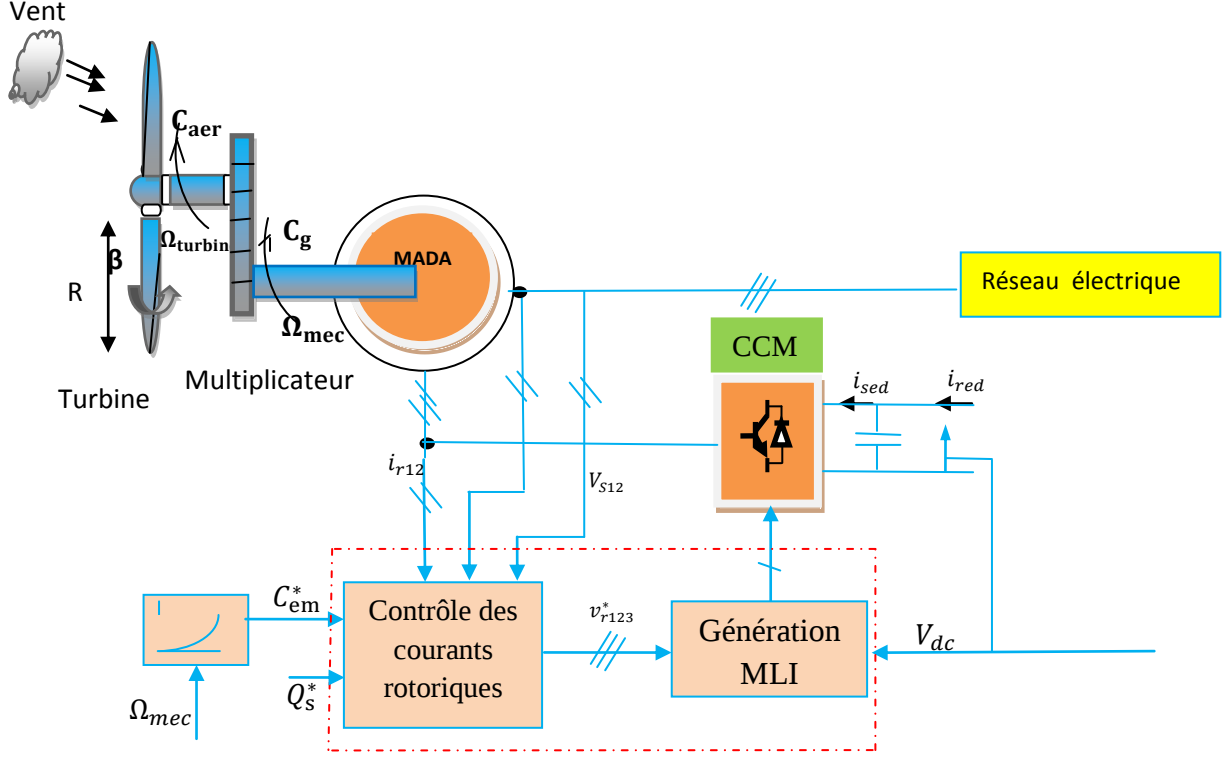


Fig .III.7 : Principe de la commande du CCM.

En considérant le choix du repère d-q lié au champ tournant statorique et en négligeant la résistance des bobinages statoriques, une simplification des équations de la MADA dans Le repère d-q peut être obtenu à partir des équations (II.29) .

Pour le couple électromagnétique, l'équation (II.36) devient :

$$C_{em} = -P \frac{M \cdot L_m}{L_s} \cdot \phi_{sd} \cdot i_{rq} \quad (III. 18)$$

Une fois le flux statorique estimé, il faut générer les courants rotoriques de référence d'axes d-q. Le couple électromagnétique étant proportionnel au courant rotorique d'axe q (d'après l'équation III.18), nous pouvons donc établir une relation entre le courant i_{rq} et le couple électromagnétique C_{em} [30].

$$i_{rq}^* = - \frac{L_s}{P \cdot M \cdot L_m \cdot \phi_{sd-est}} \cdot C_{em}^* \quad (III. 19)$$

III.6. Commande du convertisseur côté réseau CCR

III.6.1. Redresseur de tension [15] [27]

Le rôle du redresseur de tension est de fournir la tension continue à partir de la tension alternative du réseau. La commande par MLI permet le contrôle de courants injectés par ce convertisseur dans le réseau. Ainsi, il est possible de contrôler la puissance réactive permettant à ce type de redresseur de ne pas dégrader le facteur de puissance de réseau. En outre, les formes d'ondes des courants alternatifs peuvent être sinusoïdales et ainsi repousser les harmoniques vers des fréquences élevées [15].

III.6.1.1. Modélisation du redresseur [4]

Le redresseur est à deux niveau, son modèle est identique à celui de l'onduleur étudié précédemment, tel que [4]:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.20})$$

Et le courant redressé est donné par :

$$I_{red} = \begin{bmatrix} S_a & S_b & S_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.21})$$

III.6.1.2. Commande du redresseur

Ce type de commande permet de fixer un courant de référence dans les lignes du réseau électrique avec deux degrés de liberté, l'amplitude et la fréquence. Le principe de cette stratégie est basé sur la commande des interrupteurs de telle sorte que les variations du courant dans chaque phase soient limitées dans une bande encadrant les références des courants. Ce contrôle se fait par une comparaison permanente entre les courants réels et les courants de référence [17].

III.7. Principe de fonctionnement d'un redresseur MLI et avantage [18]

La structure de la cascade est celle représentée sur la figure (III-1). Les deux convertisseurs interposés entre le rotor de la MADA et le réseau sont de type MLI à deux niveaux, bidirectionnels en puissance. Le modèle du convertisseur connecté au rotor était

déjà présenté dans chapitre deuxième où les signaux de commande sont déterminés en appliquant la commande vectorielle à la MADA. Le convertisseur côté réseau aura le même modèle que l'autre, sauf que les signaux de commande seront déterminés en faisant un asservissement de la tension du bus continu.

L'avantage de la commande MLI ne s'arrête pas au contrôle de la puissance active, mais la puissance réactive également, permettant à ce type de convertisseur de corriger le facteur de puissance du réseau. Ainsi, la commande MLI nous permet d'avoir une bonne qualité de signal (formes sinusoïdales), ramenant le contenu harmonique vers des fréquences élevées et par la suite la facilité de filtrage [18].

III.8. Filtre (côté réseau)

Le rôle du filtre est d'atténuer l'amplitude des harmoniques d'ordre supérieur car celui-ci est passe bas. Durant la simulation, l'effet de filtrage du transformateur est intégré dans celui du filtre. De là, la non prise en compte du transformateur dans la simulation [28].

III.8.1. Modélisation du filtre passif (côté réseau)

En appliquant la transformation de Park et celle de Laplace, le modèle du filtre est obtenu en faisant apparaître deux fonctions de transferts identiques qui sont relatifs respectivement aux axes directs et quadrature [28].

III.9.Méthode de synchronisation [21]

Afin d'échanger une puissance contrôlée, le redresseur doit toujours être synchronisé avec le réseau. Le but du bloc de synchronisation est donc d'obtenir la phase de la tension instantanée du réseau. Plusieurs techniques sont utilisées, le choix le plus commun consiste à utiliser une boucle à verrouillage de phase (en anglais PLL, Phase Locked Loop). Cependant, quelques auteurs utilisent aussi une estimation du flux virtuel [21].

III.9.1.Boucle à verrouillage de phase PLL [21]

Dans les applications réseau électrique, la PLL sert essentiellement à estimer et filtrer la phase et l'amplitude instantanée du phaseur équivalent d'un système triphasé. La PLL réalise la suivi de phase de la composante directe de la tension du réseaux e_d , afin d'éliminer la composante en quadrature, e_q , ce qui se produit lorsque la phase estimée, γ_e ,

est égale à la phase du réseau. La Figure (III.8) montre la structure classique d'une PLL triphasée.[21]

Elle est composée d'un détecteur de phase (la transformée de coordonnées), un filtre passe bas (le correcteur) et un oscillateur (l'intégrateur).

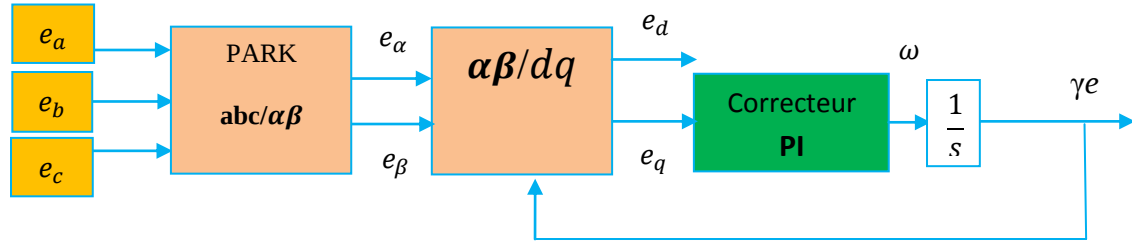


Fig .III.8 : Structure classique d'une PLL triphasée.

Souvent la tension du réseau n'est pas parfaite et présente des harmoniques. Dans ce cas-là, la vitesse et l'amplitude instantanées du phaseur équivalent de la tension du réseau ne sont pas constantes. La vitesse moyenne de rotation et l'amplitude moyenne correspondront à la vitesse et l'amplitude de la composante fondamentale, tandis que les oscillations seront dues aux harmoniques.[21]

Du fait de la nature du filtre d'une PLL, l'information de phase obtenue à sa sortie dépend de sa bande passante. Ainsi, si celle-ci est très élevée, la phase de sortie sera une image de celle correspondant au phaseur équivalent instantané de la tension, c'est-à-dire, contenant tous les harmoniques. Par contre, si la bande passante est suffisamment réduite, les harmoniques seront filtrés et la sortie sera une image de la phase du phaseur équivalent de la composante fondamentale. Cette dernière méthode est la meilleure solution pour pouvoir rejeter les harmoniques qui agissent sur la phase. Ce fait entraîne une diminution de la dynamique de la PLL. Cependant, dans cette application, il n'y a pas de compromis à faire entre la précision et la vitesse de la réponse, car le but recherché est une bande passante réduite de la PLL. [21]

Evidemment, cette dynamique limitée provoque un ralentissement du temps de synchronisation lors de la mise en route du système.

III.9.2. Contrôle vectoriel du redresseur MLI

Il y a deux méthodes de contrôle vectoriel, la première basée sur la synchronisation par le PLL, et la deuxième basée sur le flux virtuel, comme expliqué dans le paragraphe (III.9). Dans ce qui suit-on développera la techniques de commande vectoriel basée sur la synchronisation par le PLL.

III.9.2.1. Schéma fonctionnel de contrôle à tension orientée (VOC)

Le système de commande conventionnel utilise la commande en boucle fermée du courant dans le système de coordonnées tournant, commande à tension orientée (VOC) est montrée dans la figure (III.9).

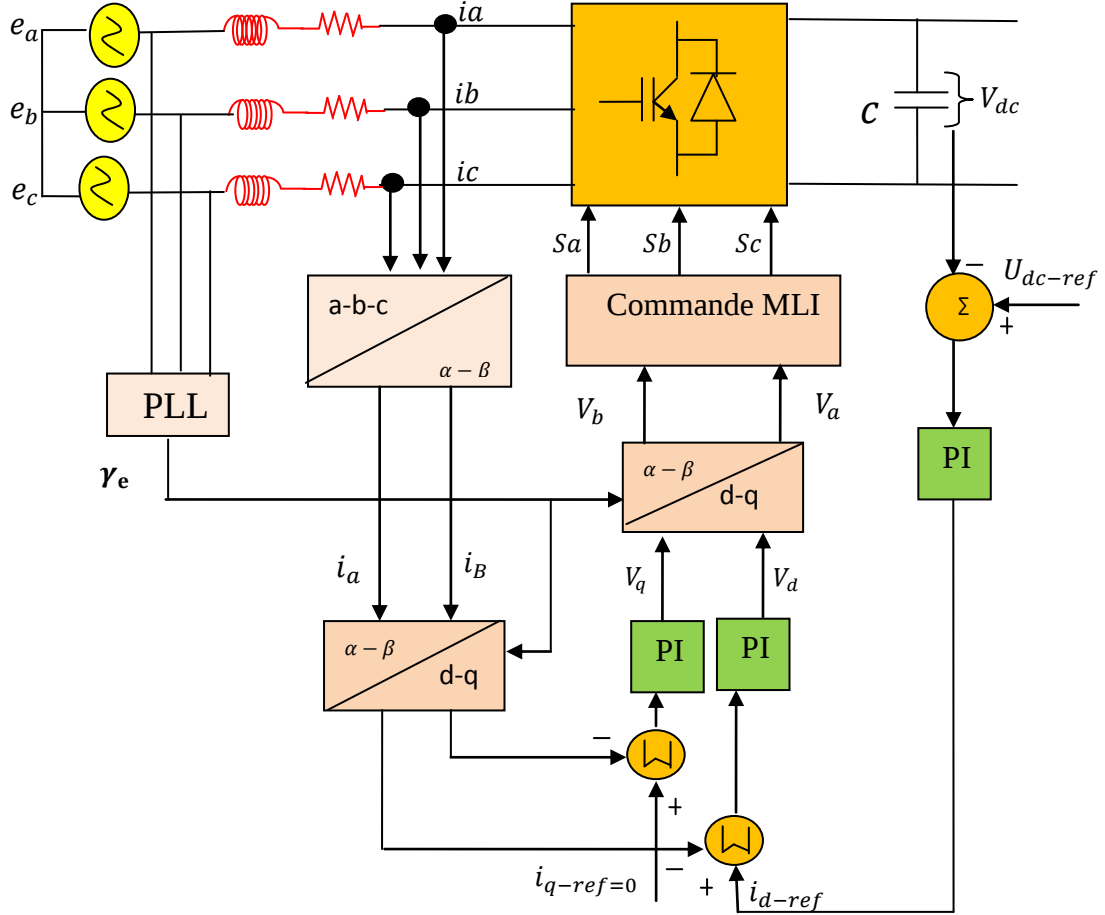


Fig .III.9 : Schéma fonctionnel de la commande à tension orientée (VOC).

La caractéristique de ce dispositif de contrôle en courant est basée sur les transformées dans deux systèmes de coordonnées. Le premier est le système de coordonnées fixe $\alpha - \beta$, et le second est le système de coordonnée tournant $d - q$. Les valeurs mesurées de trois phases sont converties en équivalent système de deux phase ($\alpha - \beta$) et alors sont transformées au système de coordonnées tournant dans le bloc $(\alpha - \beta) / (d - q)$.

$$\begin{bmatrix} K_d \\ K_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_e & \sin \gamma_e \\ -\sin \gamma_e & \cos \gamma_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_a \\ K_b \end{bmatrix} \quad (\text{III. 22})$$

Grâce à ce type de transformation, les grandeurs de commande sont des signaux continus. Une transformation inverse $(d - q) / (\alpha - \beta)$ est réalisée sur la sortie du système de commande et il donne des signaux des références du redresseur dans les coordonnées fixes

$$\begin{bmatrix} K_a \\ K_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma_e & -\sin\gamma_e \\ \sin\gamma_e & \cos\gamma_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_d \\ K_q \end{bmatrix} \quad (\text{III. 23})$$

La condition pour un facteur de puissance unitaire est obtenue quand le vecteur courant du Réseau $\bar{i}$ est aligné avec le vecteur tension du réseau $\bar{e}$. [21]

III.9.2.1.1. Etude de la boucle des courants

L'utilisation, des correcteurs PI dans un repère triphasé, présente des problèmes d'application. En effet, des composantes alternatives se retrouvent dans les erreurs à l'entrée des correcteurs PI. Ces grandeurs alternatives sont à l'origine d'erreurs statiques non compensées par les correcteurs PI. Pour résoudre ce problème, des transformées de Park dont le repère qui tourne à la fréquence des tensions du réseau sont utilisées. Ainsi les variables alternatives des courants sont transformées en composantes d'axe d et q continus dès lors que ces signaux ont la même fréquence que le réseau. Cela exige la connaissance de l'angle de référence des tensions du réseau sera nécessaire pour le calcul des transformées.

Cependant, il y a un couplage entre les axes de la transformation de Park, donc une variation sur i_q provoque une variation sur i_d et l'inverse. [21]

Les équations de tension dans le système de coordonnées tournant (d -q) sont :

$$\begin{cases} e_d = R.i_d + L \frac{di_d}{dt} + v_d + \omega.L.i_q \\ e_q = R.i_q + L \frac{di_q}{dt} + v_q + \omega.L.i_d \end{cases} \quad (\text{III. 24})$$

Le découplage entre l'axe d et q est réalisé par les variables h_d et h_q :

$$\begin{cases} h_d = e_d - v_d - \omega L i_q = L \frac{di_d}{dt} + R.i_d \\ h_q = e_q - v_q - \omega L i_d = L \frac{di_q}{dt} + R.i_q \end{cases} \quad (\text{III. 25})$$

Le système d'état découplé est présenté donc, par :

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_d \\ h_q \end{bmatrix} \quad (\text{III. 26})$$

Il est possible de commander indépendamment les composants du courant i_d et i_q par action sur h_d et h_q , ainsi, il est simple de dimensionner les régulateurs.

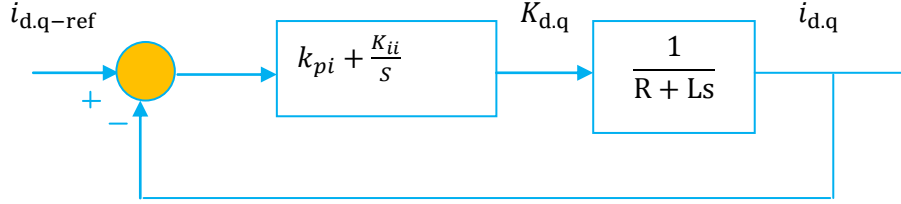


Fig .III.10 : Schéma fonctionnel pour le réglage du courant.

Dans ce cas, les contrôleurs de courants utilisés, sont de type PI. Les paramètres K_p et K_i sont calculés en fonction de temps de réponse et le coefficient d'amortissement.

$$\begin{cases} K_{pi} = 2 \cdot \xi \omega_n L - R \\ K_{ii} = L \omega_n^2 \end{cases} \quad (\text{III. 27})$$

Où $\xi = \frac{\sqrt{2}}{2}$ et ω_n dépend de temps de repense choisi. Aussi, le système en boucle fermée pour le courant direct et en quadrature est donné :

$$\frac{i_d}{i_{d_ref}} = \frac{i_q}{i_{q_ref}} \frac{K_p}{L} \frac{S + \frac{k_i}{k_p}}{s^2 + 2 \cdot \zeta \omega_n S + \omega_n^2} \quad (\text{III. 28})$$

On prend $\omega_n = \omega_c / 5$, pour obtenir une régulation interne rapide .

Où $\omega_c = 2\pi f$ la pulsation de commutation.

f_c : Fréquence de commutation.

III.9.2.1.2. Boucle de régulation de tension du bus continu

Le réglage de la tension de bus continu est réalisé par une boucle externe, la transition de puissance permet d'imposer le courant capacitif au bus continu, donc la boucle de régulation externe permet de maintenir une tension constante au niveau de bus continu et de générer la référence du courant à injecter dans le condensateur i_{c-ref} .

III.9.2.1.2.1. Modélisation du bus continu

On obtient la tension du bus continu à partir de l'intégration du courant capacitif [15] :

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} i_c \quad (III. 29)$$

Le courant du condensateur est :

$$i_c = i_{red} - i_{ond} \quad (III. 30)$$

Avec : i_{red} : courant redressé ; $i_{ons} = i_{ch}$: Courant de charge ;

La tension de bus continu est modéliser par :

$$V_{dc} = \int \frac{dV_{dc}}{dt} + V_{dc}(t_0) \quad (III. 31)$$

Ou :

$V_{dc}(t_0)$: est la valeur de la tension continue à l' instant initial.

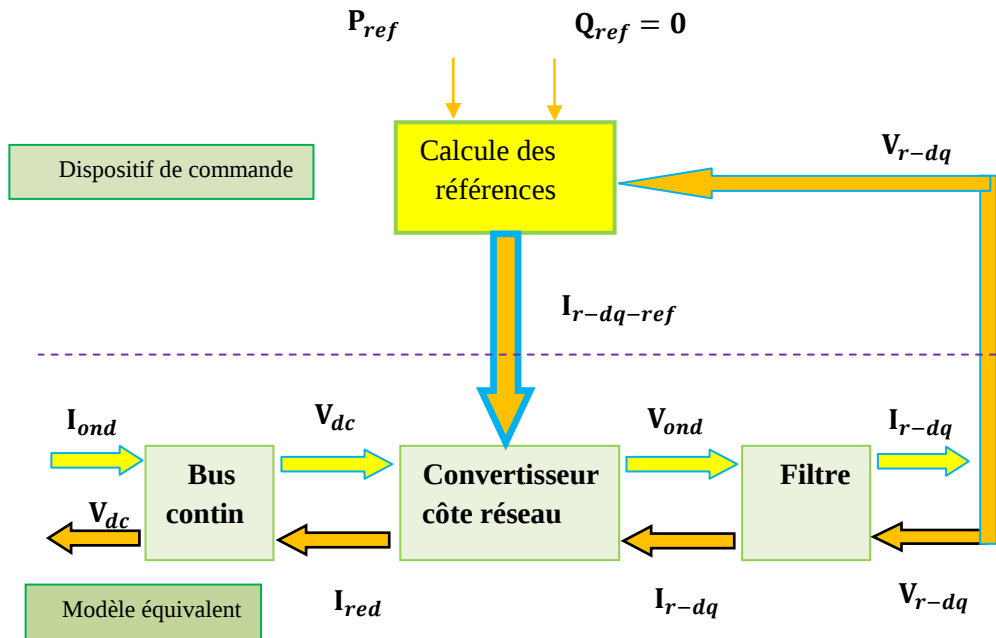


Fig. III-11 : Schéma synoptique de la commande du bus continu.

L'utilisation du redresseur a pour but d'assurer une tension continue constante quelles que soient les perturbations qui peuvent avoir lieu lors du fonctionnement. Pour cela, une boucle de régulation doit être réalisée. Celle-ci permet de générer la référence du courant à injecter dans le condensateur. Aussi, afin de déterminer les signaux de commande du redresseur, il faut prendre en compte les puissances transitées qui sont en fonction des courants du réseau alimentant le convertisseur [37] :

$$\begin{cases} P = v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr} \\ Q = v_{qr} i_{dr} - v_{dr} i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III. 32})$$

A partir de ces relations il devient aisé de réguler les courants du coté réseau en imposant des références sur les puissances actives et réactives (P_{ref} , Q_{ref}) :

$$\begin{cases} i_{dr_ref} = \frac{P_{ref} v_{dr_mes} + Q_{ref} v_{qr_mes}}{v_{dr_mes}^2 + v_{qr_mes}^2} \\ i_{qr_ref} = \frac{P_{ref} v_{qr_mes} - Q_{ref} v_{dr_mes}}{v_{dr_mes}^2 + v_{qr_mes}^2} \end{cases} \quad (\text{III. 33})$$

La composante du courant en quadrature est utilisée pour réguler la tension du bus continu, quand à la composante directe, elle est utilisée pour réguler la puissance réactive transitée [38]. La régulation des transits de puissance permet d'imposer le courant capacitif au bus continu. Il est à relever que le réglage du bus continu est réalisé par une boucle externe tandis que les courants transités seront réglés par une boucle interne intégrée dans la commande du redresseur commandé. Cette solution est la plus adaptée pour la commande des courants à la sortie d'un convertisseur statique [15].

Le redresseur sera commandé par deux grandeurs. La puissance réactive de référence sera fixée à une valeur nulle pour ne pas altérer la qualité du réseau. La puissance active sera estimée à partir de la valeur référence du bus continu. L'estimation de la valeur référence de la puissance active passe par la connaissance du bilan énergétique, donc une modélisation des transits de puissance active [38].

Pour pouvoir faire une modélisation du transit dans la liaison avec le réseau, il est impératif d'effectuer le bilan énergétique de cette dite liaison. En supposant que les pertes dans les convertisseurs et le condensateur sont nulles, la puissance transmise au redresseur s'exprime par:

$$P_{red} = P_{ond} - P_c \quad (\text{III. 34})$$

P_c Est la puissance emmagasinée dans le condensateur, elle s'exprime par :

$$P_c = V_{dc} \cdot I_c \quad (\text{III. 35})$$

La puissance fournie par l'onduleur connecté à la MADA s'exprime par :

$$P_{ond} = V_{dc} \cdot I_{ond} \quad (III. 36)$$

La puissance transitée par le redresseur vers le réseau passe par un filtre, celui-ci contient une résistance et donc une partie de la puissance transitée vers le réseau sera dissipée par effet Joule, d'où l'expression de la puissance renvoyée au réseau [38] :

$$P = P_{red} - P_{filtre} \quad (III. 37)$$

Tel que :

$$P_{filtre} = R_{filtre} \cdot (I_{d_res}^2 - I_{q_res}^2) \quad (III. 38)$$

Et donc la puissance renvoyée au réseau s'exprime par :

$$P = P_{red} - P_c - P_{filtre} \quad (III. 39)$$

A partir des relations (III.33, III.34, III.35, III.36) cette puissance peut être écrite en fonction de la tension du bus continu tel que :

$$P = (I_{red} - I_c) \cdot V_{dc} - P_{filtre} \quad (III. 40)$$

Il est possible donc d'estimer la valeur de la puissance de référence établie à partir d'une valeur référence du courant dans le condensateur tel que :

$$P_{ref} = (I_{red} - I_{c_ref}) \cdot V_{dc} - P_{filtre} \quad (III. 41)$$

La régulation des transits de puissance permet d'imposer le courant capacitif au bus continu. Le réglage du bus continu est alors réalisé au moyen d'une boucle de régulation utilisant un régulateur PI (le dimensionnement du régulateur PI est présentée dans l'annexe(B)) générant la référence du courant à injecter dans le condensateur (Figure III-12).

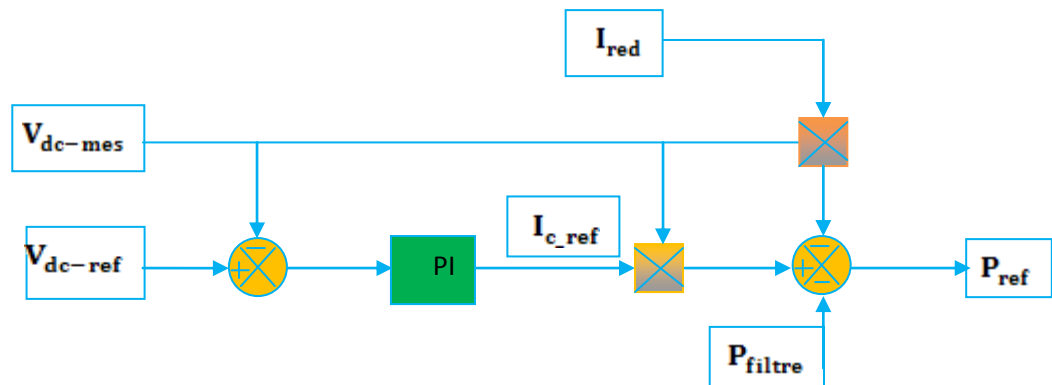
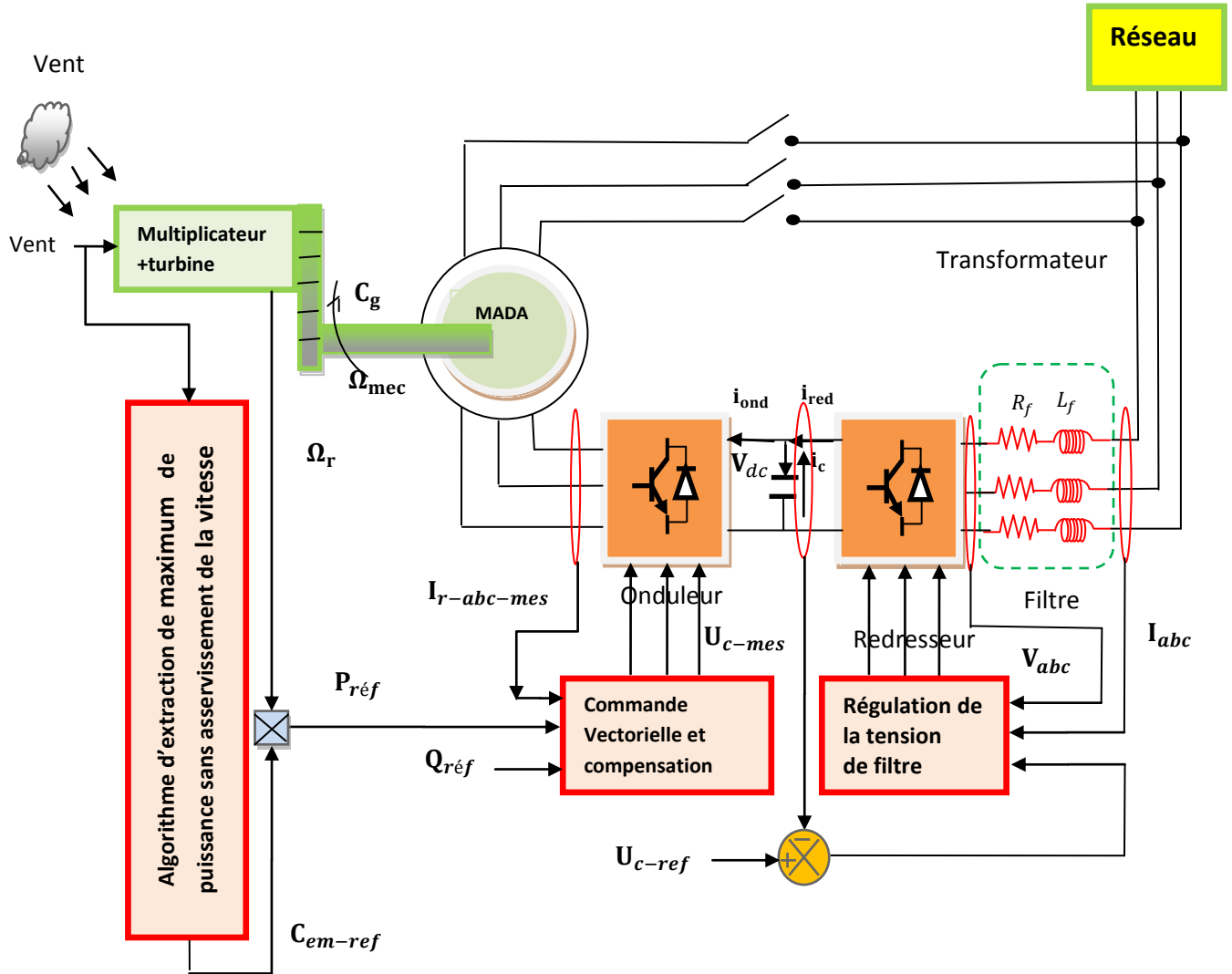


Fig. III-12 : Contrôle de Bus continu

III.10. Système de la chaîne globale [10]

La structure globale de la chaîne étudiée est constituée d'une MADA entraînée par une turbine éolienne et présenté sur la figure III.13 [10] :

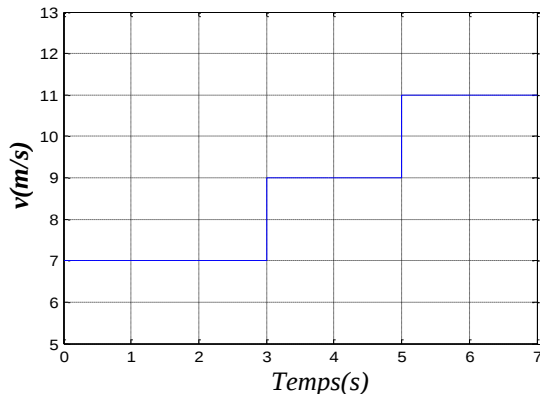


Fi.g III.13 : structure de la chaîne globale

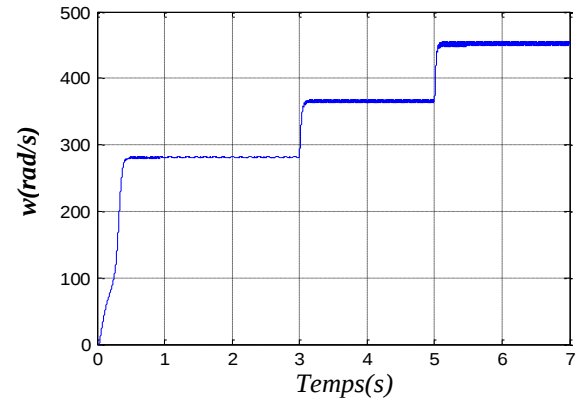
III.11. Simulation du système éolien basé sur une MADA

En utilisant l'outil MATLAB, on a établi un programme numérique permettant la simulation de l'évolution des caractéristiques du système éolien étudié dont les paramètres sont donnés dans l'annexe. Ce système est couplé électriquement à un réseau triphasé puissant considéré stable et en équilibre.

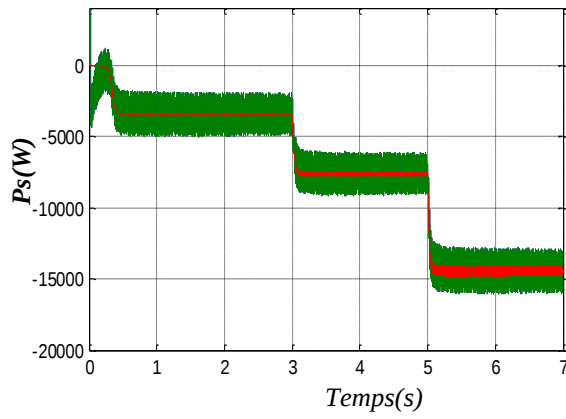
III.11.1. Résultats de simulation



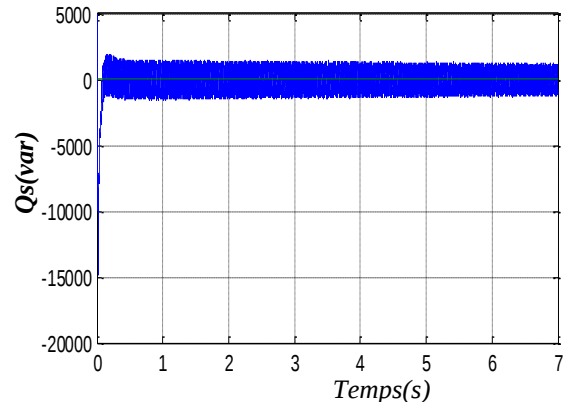
a. Vitesse du vent



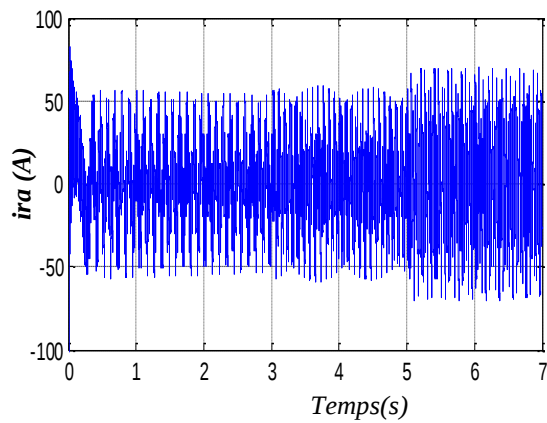
b. Vitesse de rotation



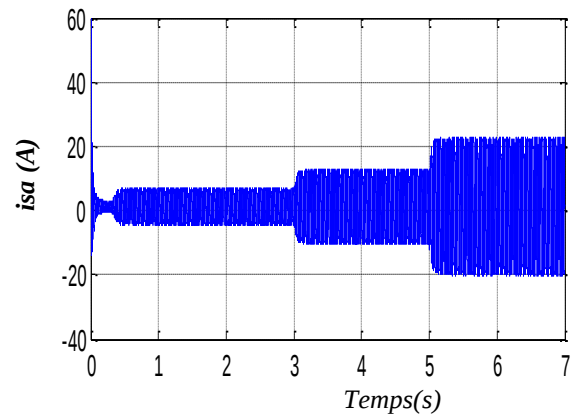
d. Puissance active statorique et sa référence



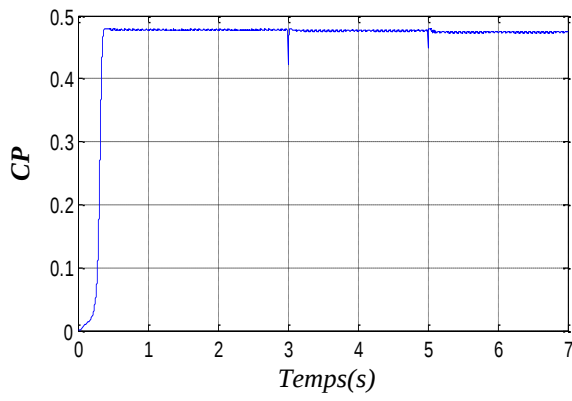
d. Puissance réactive statorique et sa référence



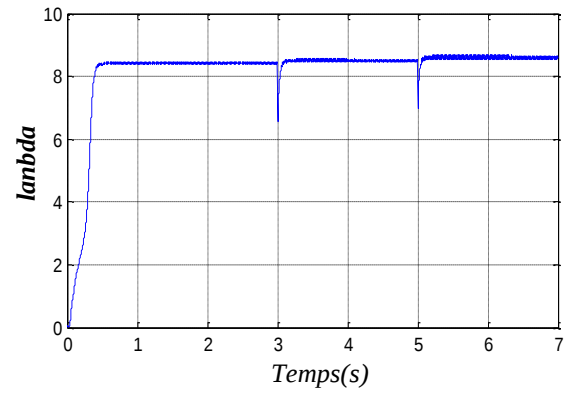
e. Courant rotorique d'une phase



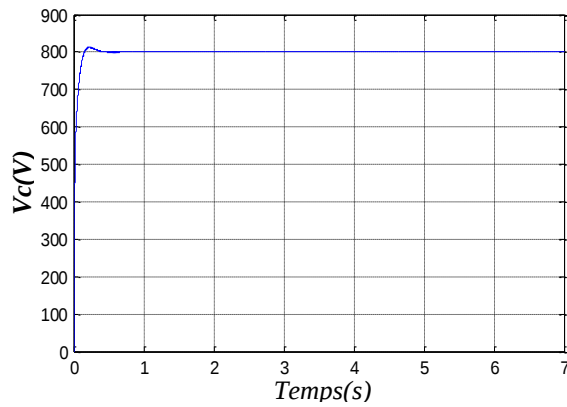
f. Courant statorique d'une phase



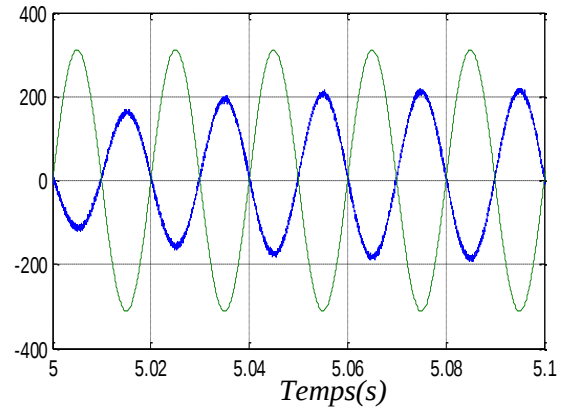
g. Coefficient de puissance de la turbine



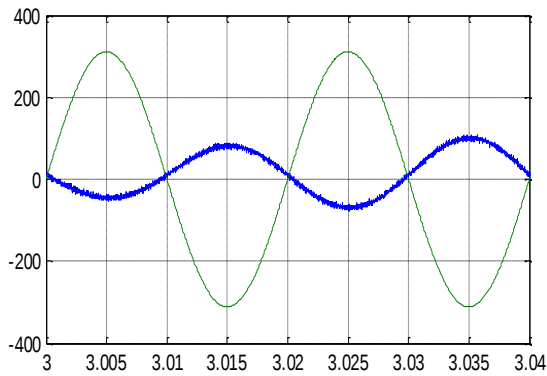
h. Vitesse relative de l'éolienne



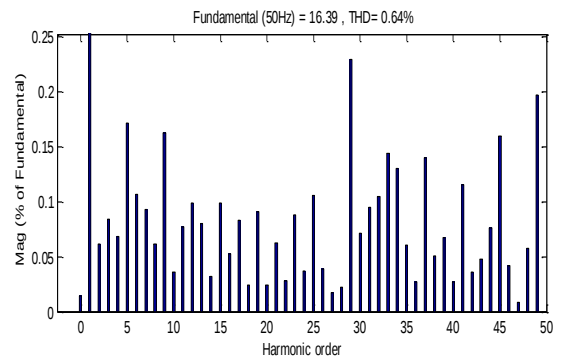
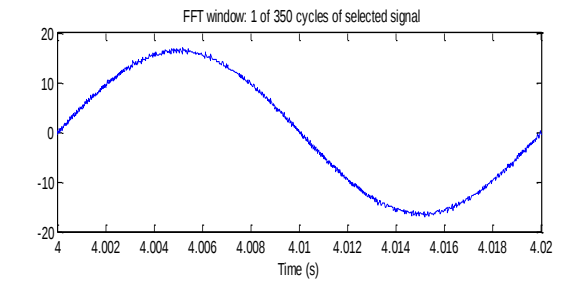
i. tension bus continue



j. courant statorique et la tension réseau



k. zoom de courant statorique et la tension réseau



l. Spectre harmonique du courant de ligne

Fig. III-14 : Résultat de simulation de vitesse d'un aérogénérateur de la MADA

III.11.2. Interprétations des Résultats

Les figures ci-dessus représentent les résultats obtenus de cascade basée sur deux convertisseurs à deux niveaux commandés par la stratégie triangle – sinusoïdale, et une machine asynchrone à double alimentation. La tension du bus continu suit bien sa référence qui est 800V.

Les courants délivrés par le convertisseur côté réseau ont une forme quasi-sinusoïdale. Le spectre harmonique de i_g présente des harmoniques pairs et impairs d'amplitude pratiquement négligeables devant celle du fondamental. Les courants statoriques et les courants du côté rotor sont stables et similaires à ceux trouvés avec une alimentation continue parfaite. Un bon suivi de consigne pour les puissances réactive statoriques.

la vitesse spécifique et le coefficient de puissance ne changent pas beaucoup de valeurs en régime permanent, ils restent pratiquement égaux à leurs valeurs de références optimales 8.1 et 0.49 successivement, avec la puissance éolienne capturée suit sa référence optimale.

Le courant statorique fourni par la GADA est en opposition de phase par rapport à la tension du réseau, puisque la GADA n'injecte que la puissance active dans le réseau ($Q_{p_ref} = 0$).

Nous constatons que durant le régime de fonctionnement le courant du filtre est en phase avec la tension du réseau, cela signifie que la GADA absorbe une puissance active du réseau.

On remarque que la tension de bus continu stabilise sur sa valeur de référence imposée par la commande.

La tension continue en sortie du redresseur est bien contrôlée et quasi insensible aux variations de la vitesse.

L'analyse spectrale du courant montre bien que les harmoniques des rangs faibles sont rejetés vers les hautes fréquences avec tout en diminuant le taux de distorsion harmonique.

III.12. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la commande du système éolienne à vitesse variable basée sur une MADA nous avons donné en premier lieu le modèle de la chaîne étudiée, est on a traité l'alimentation de rotor qui est fournie par deux convertisseur MLI à deux niveaux (onduleur à deux niveaux et redresseur à deux niveaux). La modélisation et l'application du redresseur à MLI, nous a permis la régulation de la tension du bus continu

qui est utilisée pour alimenter l'onduleur connecté au rotor de la MADA. Et par la suite, on a modélisé la turbine éolienne, où on a défini aussi les quatre zones de fonctionnement d'une éolienne en général. En dernier lieu, nous avons associés les différentes parties étudiées (Turbine, MADA, et les deux convertisseurs de puissance) qui présente un système éolien global.

Chapitre IIII
Commande de la GADA
fonctionnement autonome
intégré dans un système
éolienne

IV.1.Introduction

Dans cette partie, nous présenterons les éoliennes autonomes (isolé). ce principe est connu sous la terminologie c'est un système électrique complètement indépendant d'autre source d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas un système autonome exigera des batteries pour stocker l'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé [41], sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau .

IV.2 Chaîne de conversion de l'énergie éolienne à base de la GADA isolé

L'utilisation des GADA, suscite l'attention croissante pour la génération par énergie éolienne. Parmi les avantages de ces générateurs, l'utilisation d'un seul convertisseur de puissance réduite au rotor associé à une commande vectorielle simple où l'on peut contrôler le facteur de puissance et le flux d'énergie.

La capacité de produire de l'électricité avec des facteurs de puissance proche de l'unité réduirait les coûts que présente l'utilisation des condensateurs, et serait particulièrement avantageuse pour les distributeurs d'énergie électrique [11-13].

En ce qui concerne la génération, il est nécessaire de concevoir un système qui produit l'énergie électrique à fréquence constante et qui s'adapte au caractère variable du vent. Ceci peut être réalisé à l'aide des générateurs synchrones à condition qu'un convertisseur de fréquence statique soit utilisé pour connecter la machine au réseau.

à induction à Une autre solution aussi efficace consiste en l'utilisation d'un générateur double alimentation, alimenté du côté du rotor par une source à tension et à fréquence variables Ce qui permettra de configurer une relation de cause à effet capable dégager un simple contrôle vectorielle de la tension du stator pour une éventuelle utilisation dans un site isolé , Cela fera l'objet du présent chapitre [39].

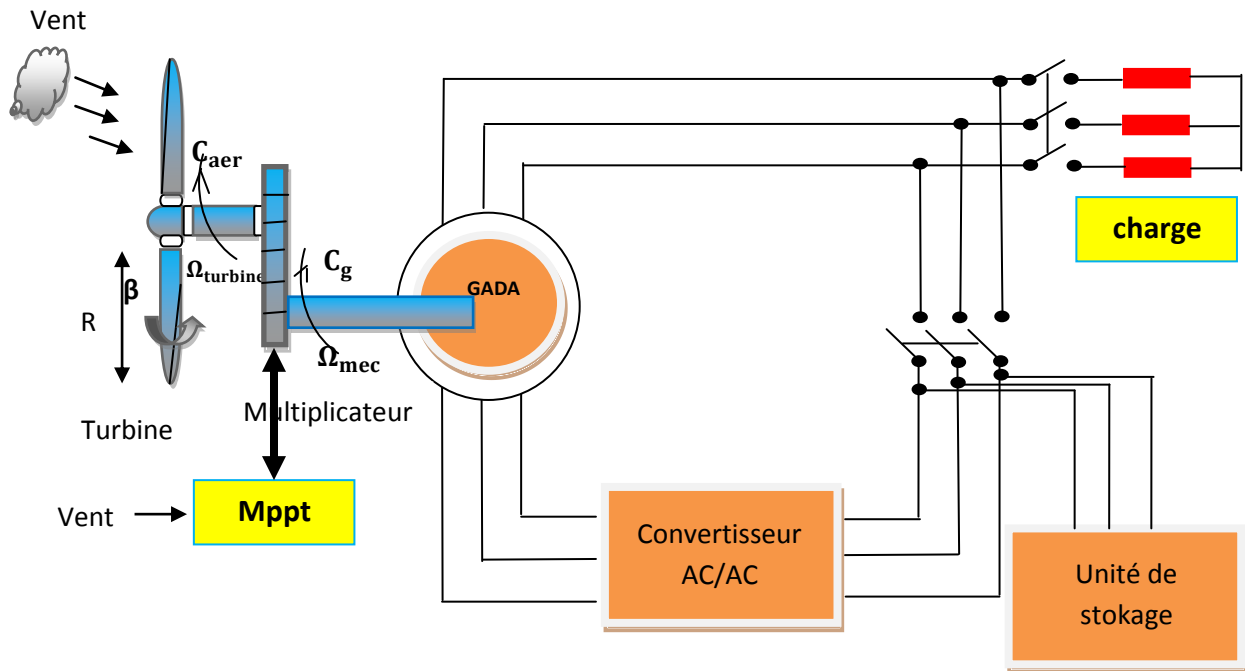


Fig. IV.1: Éolienne isolée à base de la DFIG.

IV.3. Les éoliennes en fonctionnement isolé et autonome

Dans la plupart des régions isolées et ventées, l'énergie éolienne constitue la principale source potentielle d'énergie électrique. La baisse continue des prix des aérogénérateurs et les développements technologiques de l'électronique de puissance, conjugués aux incitations gouvernementales, conduisent à une utilisation d'éoliennes autonomes de plus en plus courante dans ces régions isolées. La variabilité et les fluctuations des ressources (vent) ainsi que les fluctuations de la charge selon les périodes annuelles ou journalières, qui ne sont pas forcément corrélées avec les ressources, constituent encore des limitations à une exploitation plus large.

La conception des petits systèmes éoliens est considérablement différente de celles des éoliennes connectées aux grands réseaux. En effet, le but de l'utilisation de ces petits systèmes n'est pas toujours la recherche de la conversion maximale de puissance éolienne mais la production de la quantité d'énergie électrique adéquate alliée à un prix d'installation et de maintenance le plus faible.

Les systèmes éoliens dans les applications isolées et autonomes sont généralement conçus pour répondre à un besoin énergétique allant du simple éclairage à l'électrification complète de villages. Dans cette partie, nous présenterons les différentes solutions de conversion d'énergie éolienne utilisées dans ces applications de petites puissances pour les deux systèmes isolés et autonomes [39-40].

IV.4. Modèle mathématique de la GADA à vide

Avant le raccordement au réseau, le générateur (GADA) fonctionne avec le modèle à vide, c'est-à-dire le courant est zéro.

$$i_{ds} = 0, i_{qs} = 0 \quad (\text{IV .4})$$

Les équations de tension et de flux de la GADA a vidé exprimée par :

$$\begin{cases} V_{sd} = \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{sq} = \frac{d\varphi_{qs}}{dt} - \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad (\text{IV .5})$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{IV .6})$$

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \end{cases} \quad (\text{IV .7})$$

Régulation de la courant rotorique avec orientation de flux statorique φ_r :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = M i_{rd} \\ \varphi_{sq} = M i_{rq} = 0 \end{cases} \quad (\text{IV .9})$$

La commande en puissance active et réactive de la BDFG n'est pas nécessaire à la synchronisation, le principe de commande est basé sur la régulation les courant de BC avec la considération les orientation le flux ($\psi_{qs} = 0$), et on compte tenu de les équation (III-9), on peut alors écrire :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = M i_{rd} \\ \varphi_{sq} = 0 \end{cases} \quad (\text{IV .10})$$

$$\begin{cases} i_{rd}^* = \varphi_{sd} / M \\ i_{rq}^* = 0 \end{cases} \quad (\text{IV .11})$$

le flux statorique peut être estimé en boucle ouverte à partir de le équation de tension statorique dans la repère $\alpha - \beta$

$$\begin{cases} \varphi_{s\alpha} = \int (V_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) dt \\ \varphi_{s\beta} = \int (V_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) dt \end{cases} \quad (\text{IV .12})$$

Le flux transformé dans le repère (d-q) à travers de la matrice de rotation commet suit :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{s\alpha} \\ \varphi_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.13})$$

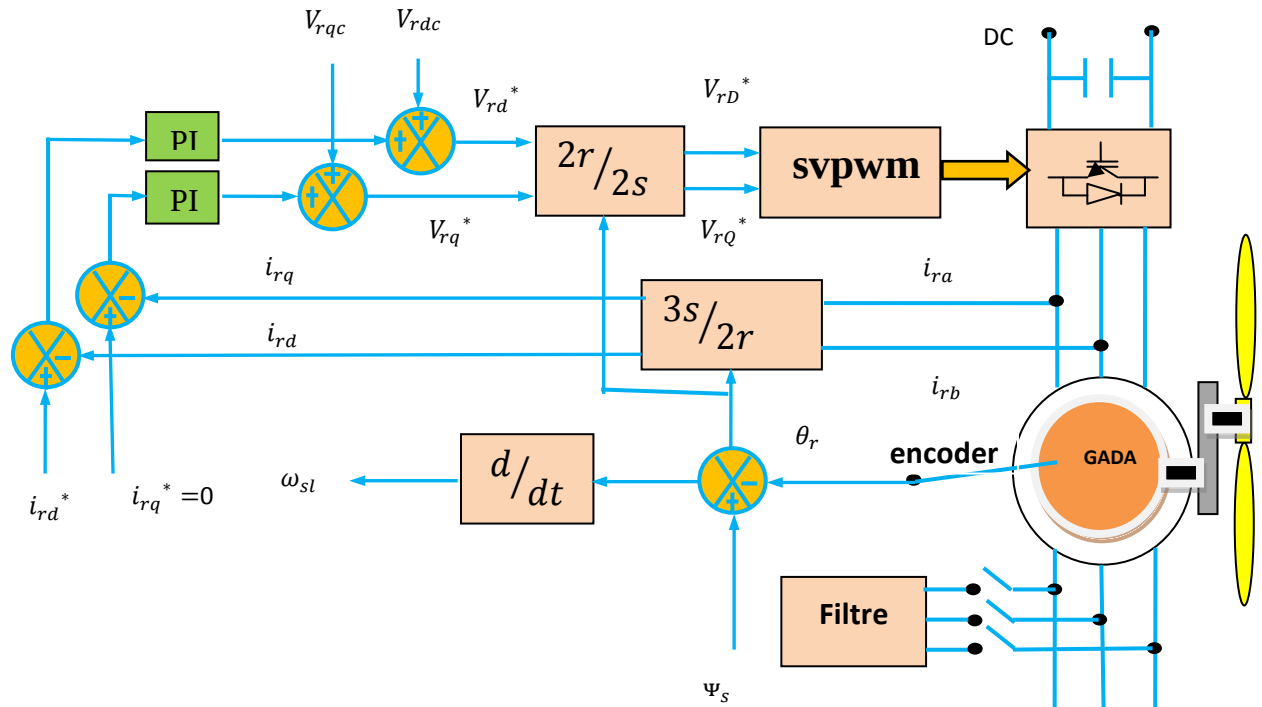
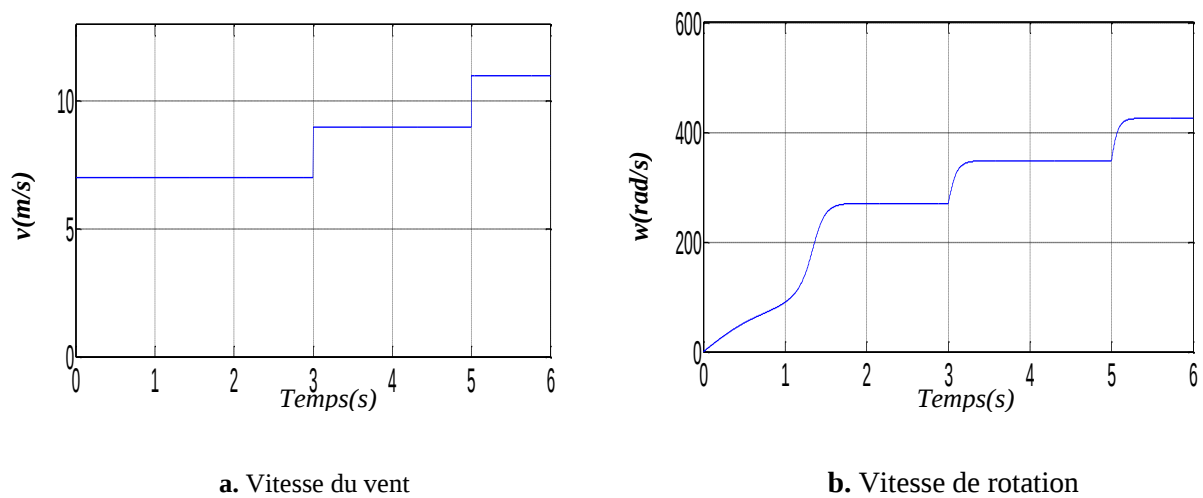
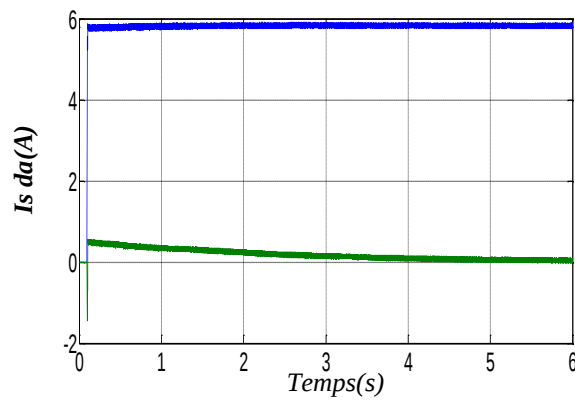


Fig. IV.2:Schéma de principe du système éolien dans un site isolé à vide.

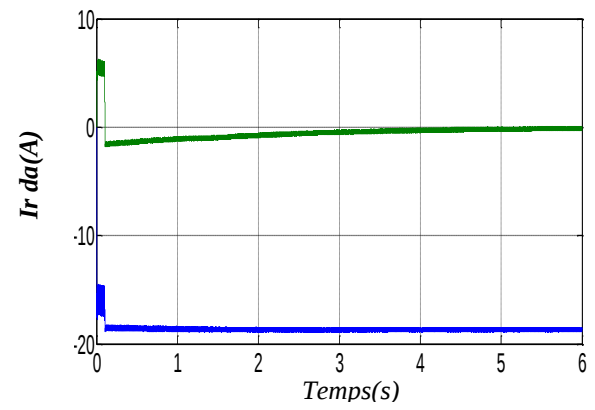
IV.4.1.Résultats de simulation

Nous pouvons montrer les résultats obtenus qui sont présentés sur les figures suivantes :

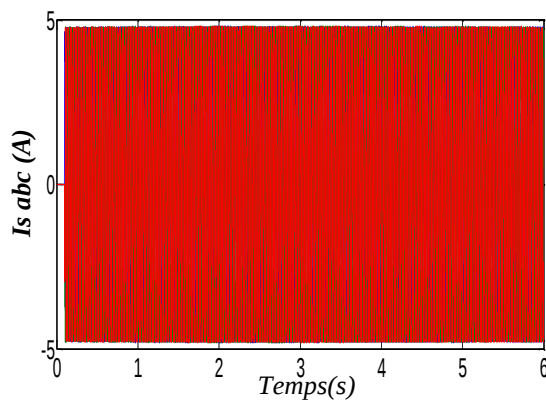




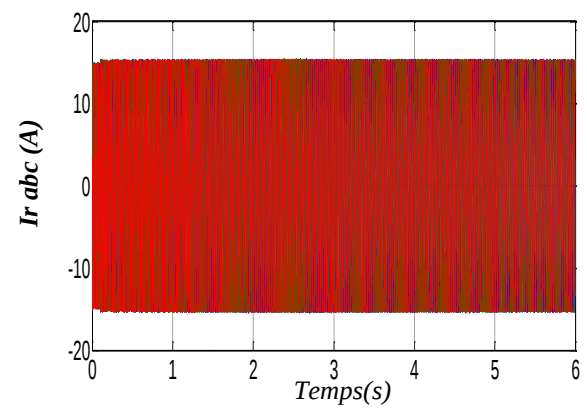
c. Courant statorique is dq



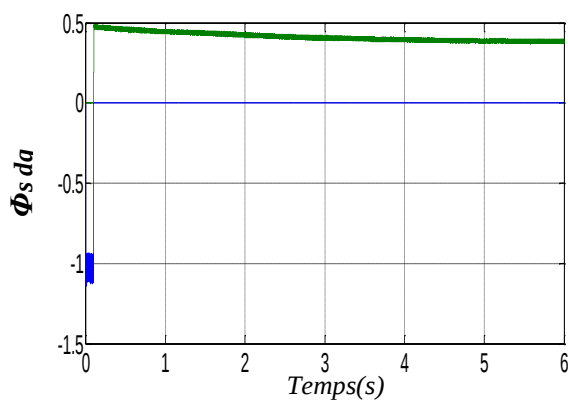
d. Courant rotorique ir dq



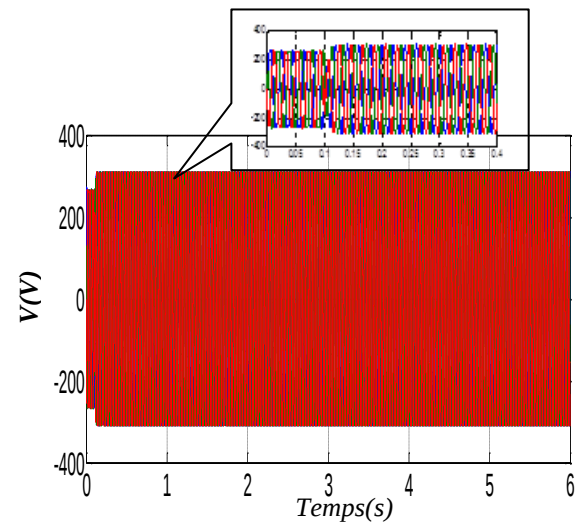
e. Courant statorique is abc



f. Courant rotorique ir abc



g. Flux statorique ds qs



h. tension (v)

Fig. IV.3: Résultat de simulation de la GADA à vide dans un site isolé.

IV.4.2. Interprétations des Résultats

Les figures ci-dessus représentent les résultats obtenus, Au démarrage la tension statorique de GADA no filtre à l'instant $t=0.1s$ en fermé l'interrupteur de (la filtre +les capacités d'auto-amorçage).

La force électromotrice augmente a $t=0.1$ a cause de la connexion de capacités sur les phases du stator entraîne alors la création d'un courant réactif qui augmente le champ magnétique de la machine et par conséquent les forces électromotrices.

La vitesse de rotation est stable en régime permanent, ils restent pratiquement égaux a leurs valeurs de références optimales qui corresponde a λ_{opt} 8.1 et $C_p=0.49$ successivement , donc la puissance éolienne capturée suit sa référence optimale.

IV.5. Modèle mathématique de la GADA en charge .

après le raccordement au réseau, le générateur (GADA) fonctionne avec le modèle en charge ,c'est-à-dire la valeur résistance statorique exprimée par :

$R_s = R_s + R_{ch}$ el la valeur de l'inductance $L_s = L_s + L_{ch}$

Les équations de tension et de flux et le courant de la GADA en charge :

$$\begin{cases} V_{ds} = (R_s + R_{ch})I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = (R_s + R_{ch})I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \phi_{qr} \\ 0 = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \phi_{dr} \end{cases} \quad (IV.14)$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} \end{cases} \quad (IV.15)$$

$$\begin{cases} \phi_{ds} = M_s i_{dr} \\ \phi_{qs} = M_s i_{qr} \end{cases} \quad (IV.16)$$

$$\begin{cases} \phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (IV.17)$$

Régulation de la courant rotorique avec orientation de flux statorique ϕ_r :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = M_s i_{dr} \\ i_{qr} = 0 \end{cases} \quad (\text{IV .18})$$

$$\begin{cases} i_{dr}^* = \varphi_{ds} / M \\ i_{qr}^* = 0 \end{cases} \quad (\text{IV .19})$$

le flux statorique peut être estimé en boucle ouverte à partir de l'équation de tension statorique dans la repère $\alpha - \beta$

$$\begin{cases} \varphi_{\alpha s} = \int (V_{\alpha s} - R_s i_{\alpha s}) dt \\ \varphi_{\beta s} = \int (V_{\beta s} - R_s i_{\beta s}) dt \end{cases} \quad (\text{IV .20})$$

Le flux transformé dans le repère (d-q) à travers de la matrice de rotation comme suit :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{\alpha s} \\ \varphi_{\beta s} \end{bmatrix} \quad (\text{IV .21})$$

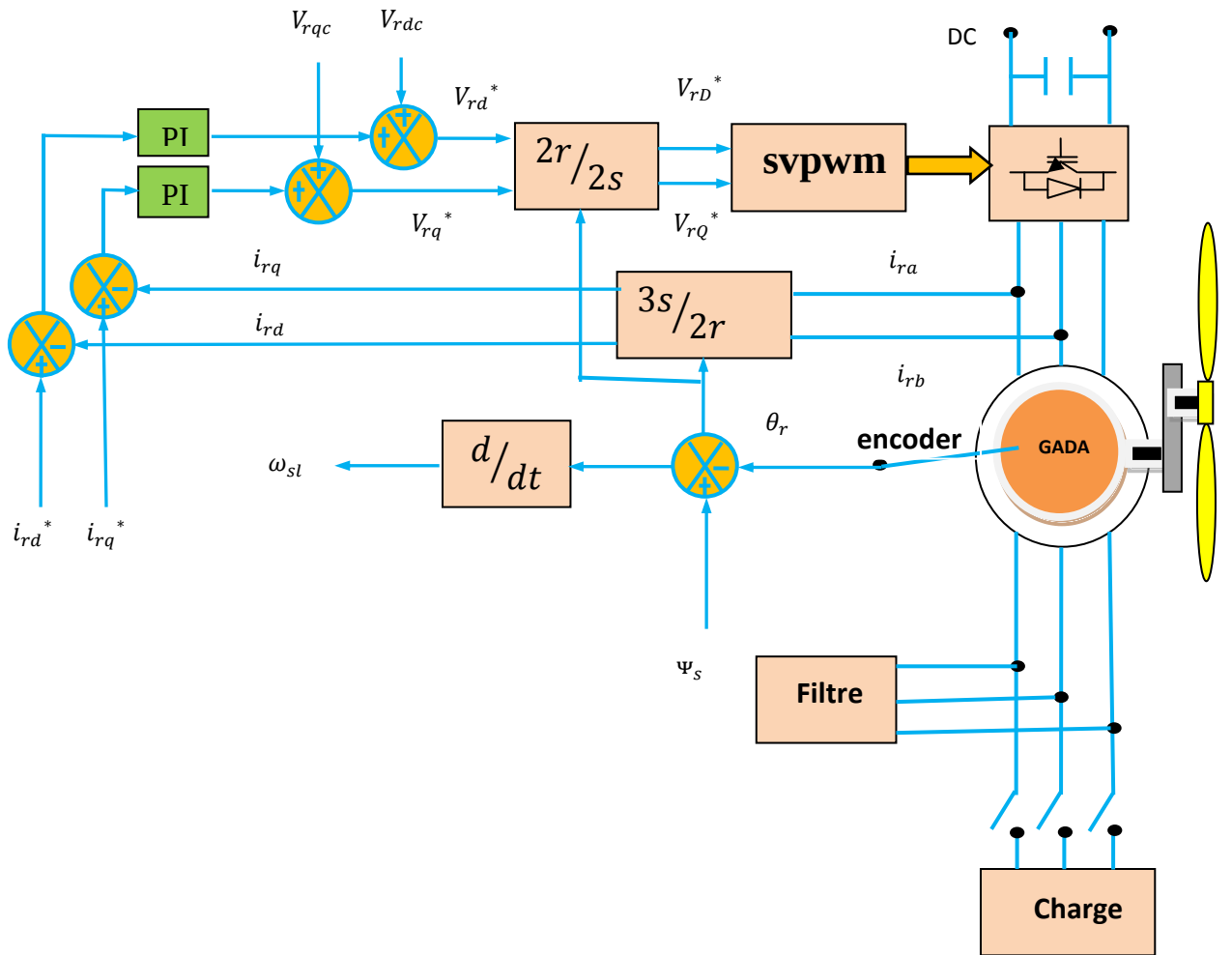
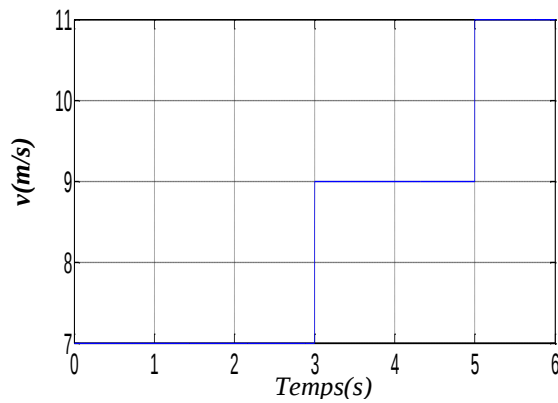


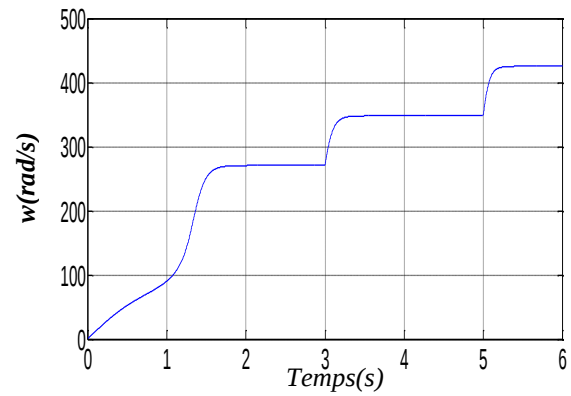
Fig. IV.4:Schéma de principe du système éolien avec charge isolée.

IV.5.1.Résultats de simulation Avec une charge de : $R = 20 \Omega$, $L = 0.2 \text{ han}$

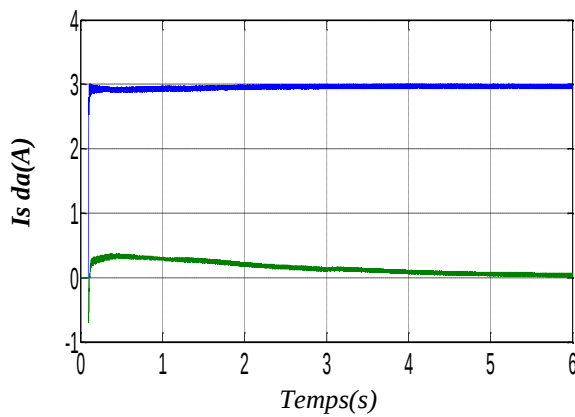
On a appliqué un profil de vent sous la forme escalier donc l'objectif c'est de voir le degré de poursuite du point à maximum de puissance.



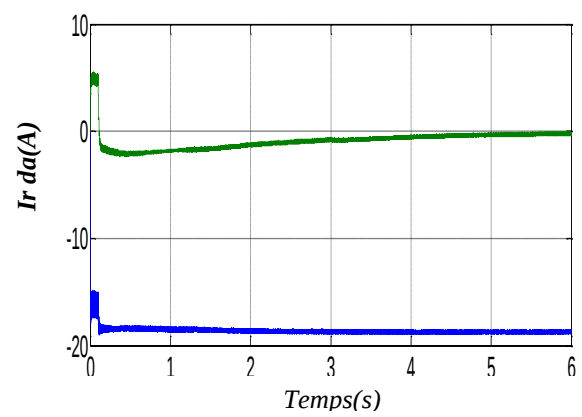
a. Vitesse du vent



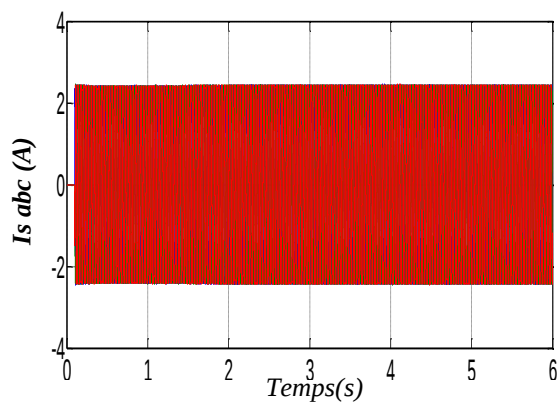
b. Vitesse de rotation



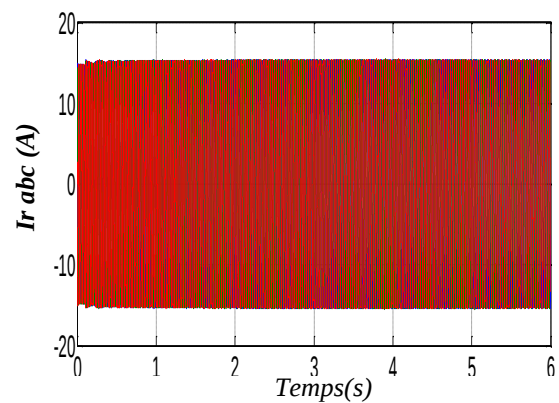
c. Courant statorique is dq



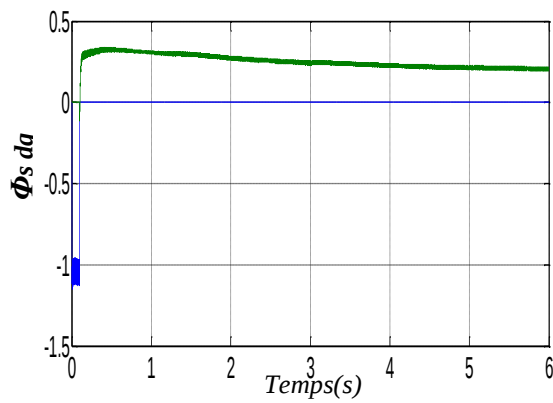
d. Courant rotorique ir dq



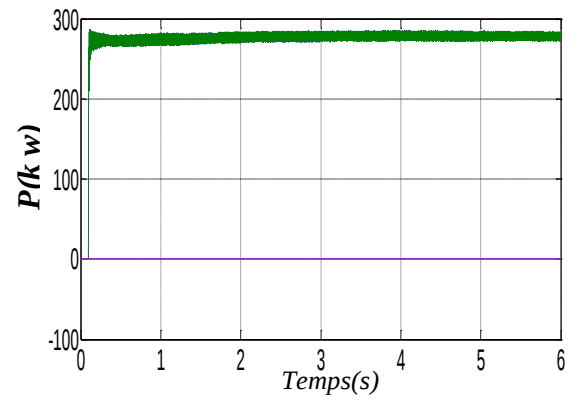
e. Courant statorique is abc



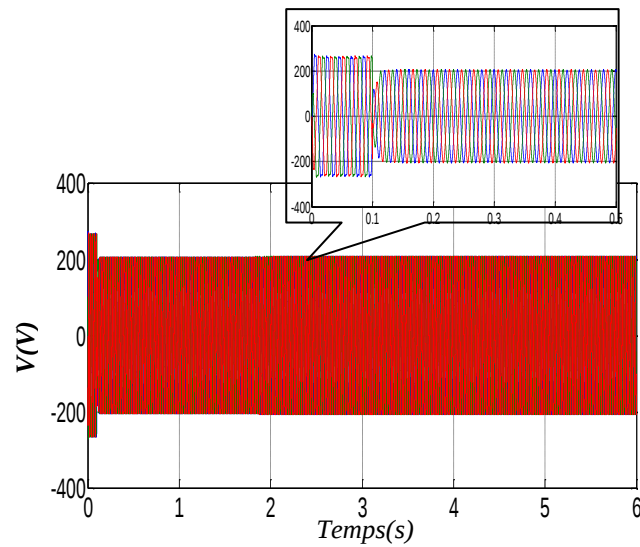
f. Courant rotorique ir abc



g. Flux statorique sur l'axes d-q



h. La puissance active



i. tension (v)

Fig. IV.5: Résultat de simulation de la GADA en charge dans un site isolé

IV.5.2. Interprétations des Résultats en charge

Le GADA fonctionne à vide avant la connexion au charge . Au démarrage la tension statorique de GADA proche de la tension de de réseaux à l'instant $t=0.1s$ en fermé l'interrupteur de la chargé, il y'a une chute de tension a cous de la perte ohmique de la résistance de la charge.

La tension de sortie peuvent être obtenus avec une amplitude et une fréquence fixes malgré la vitesse variables et la charge donc aucune information sur le vitesse mécanique.

Nous pouvons constater que le flux statorique suit sa référence suivant l'axe (avec une composante quadrature presque nulle, ce qui signifie que le découplage de la machine est réalisé avec succès.

On constate aussi que les courant statoriques sinusoïdales a fréquences constant mais et les courant rotoriques de la MADA sont sinusoïdales a fréquences variable en raison variation de la vitesse de rotor.

IV.6. Système de génération GADA autonome

Le système quand va étudier est illustré dans la Figure IV.6 , Dans notre configuration le système fourni de l'énergie électrique à l'aide d'un système éolien et un batterie pour alimenter l'onduleur dans le temps de démarrage de GADA [40].

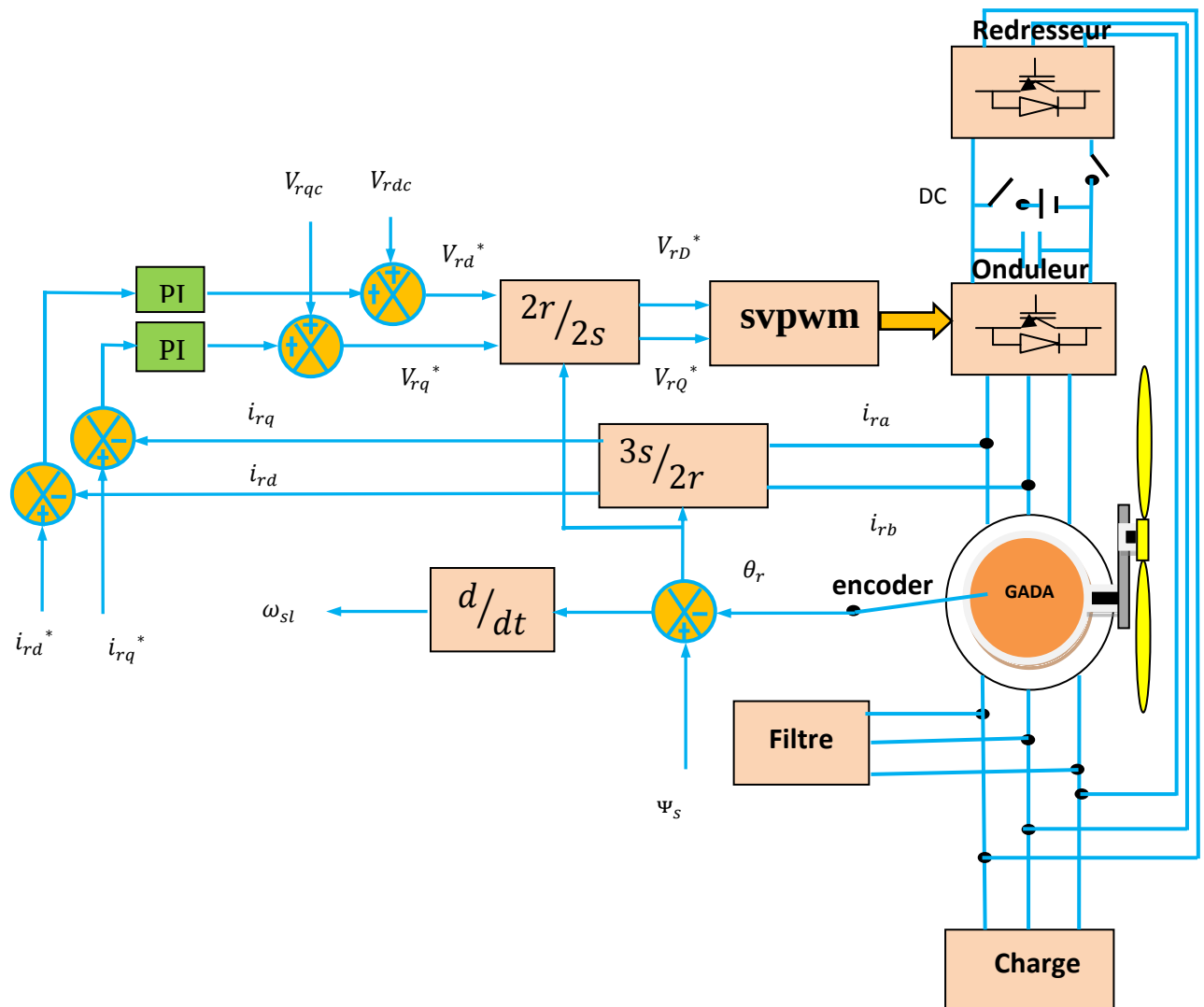
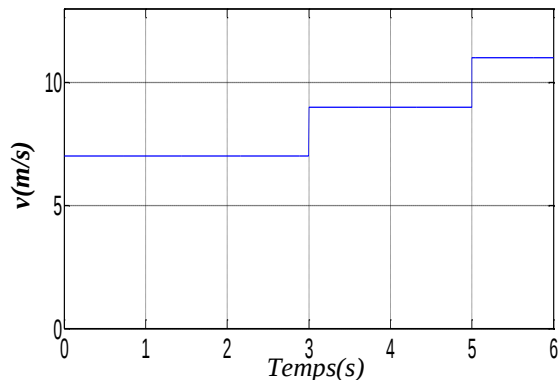
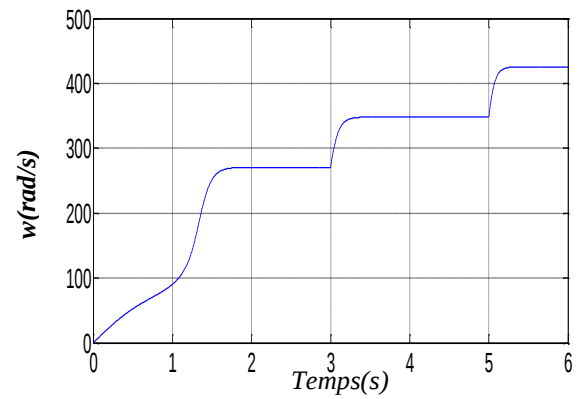


Fig. IV.6:Schéma de Système de génération GADA autonome .

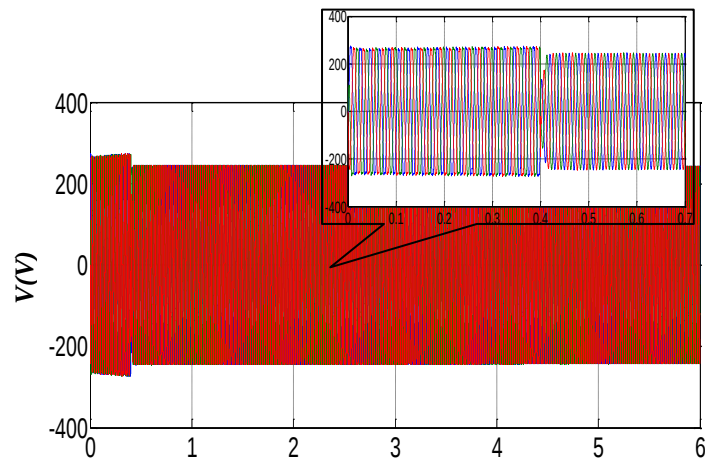
IV.6.1. Résultats de simulation de GADA autonome



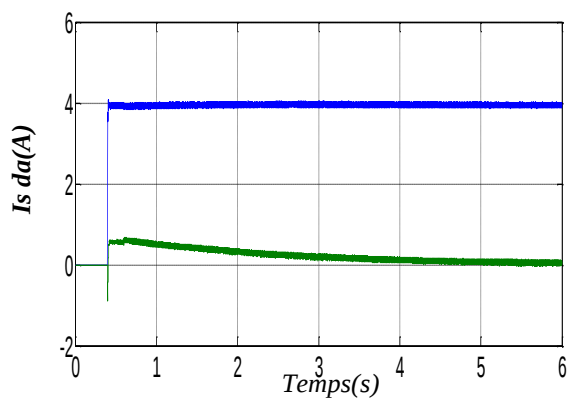
a. Vitesse du vent



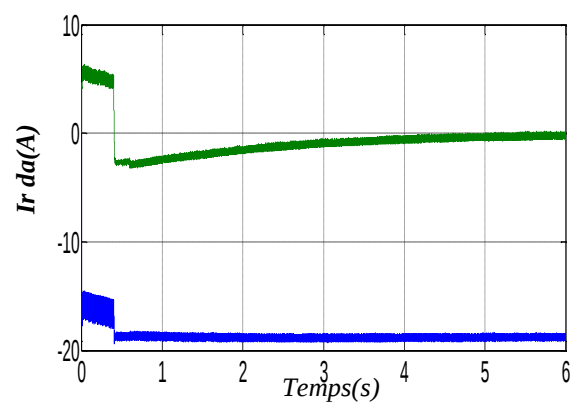
b. Vitesse de rotation



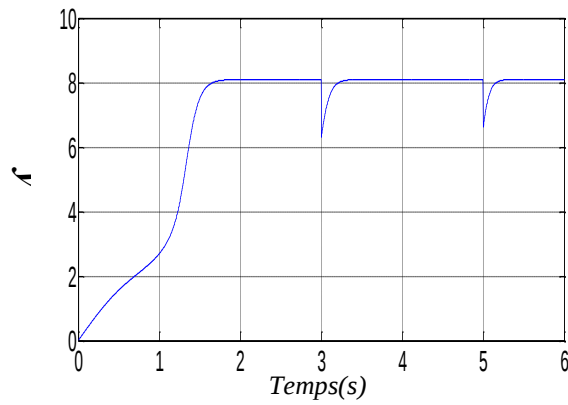
c. Tension statorique



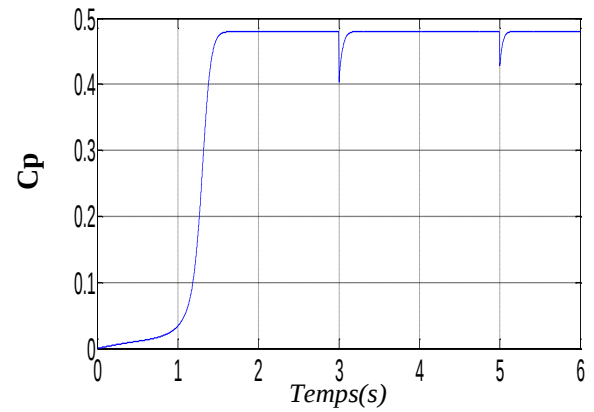
d. Courant statorique sur l'axe dq (A)



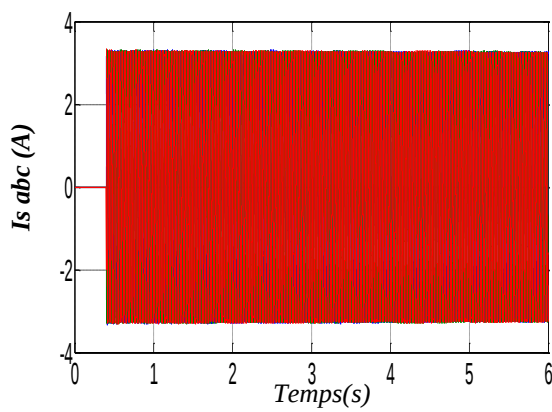
e. courant rotorique sur l'axe dq (A)



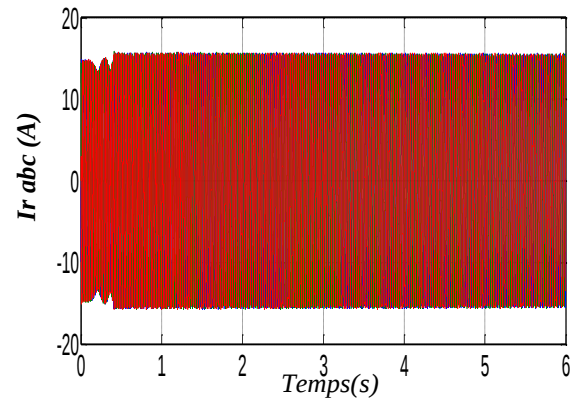
f. Vitesse spécifique λ



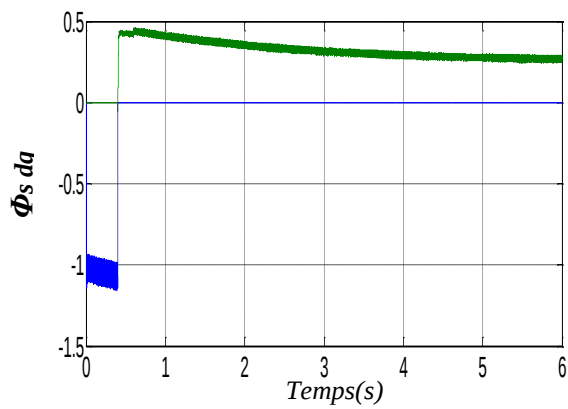
g. coefficient de puissance C_p



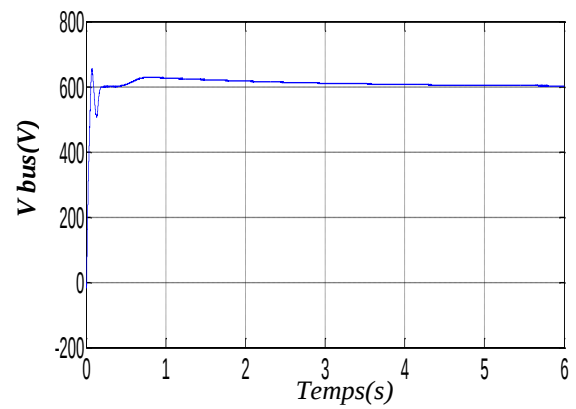
h. Courant statorique $i_s abc$ (A)



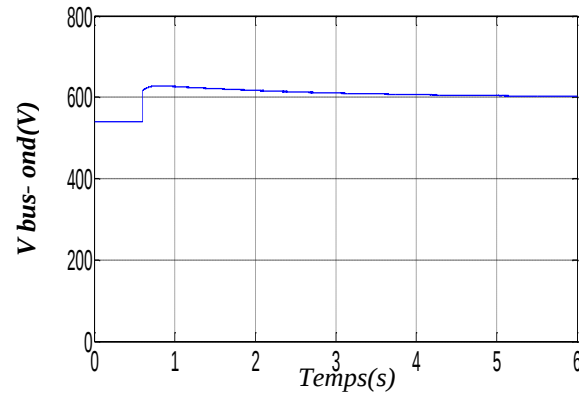
i. courant rotorique $i_r abc$



j. flux statorique sur l'axes d-q



k. tension du bus continu de redresseur



I. tension du bus continu de l'onduleur

Fig. IV.7: Résultat de simulation de vitesse d'un aérogénérateur de GADA autonome.

IV.6.2.Interprétations des Résultats

On remarque qu'à l'instant $t=0.4s$ on ferme l'interrupteur du redresseur et ouvre l'interrupteur de batterie.

D'après les résultats obtenus on remarque que, la GADA reliée à la turbine fonctionne à une vitesse variable qui ne l'influence pas sur la tension générée.

Le découplage entre les courants statorique et rotorique sur l'axe d-q est clairement montré.

La vitesse spécifique et le coefficient de puissance ne changent pas beaucoup de valeurs en régime permanent, ils restent pratiquement égaux à leurs valeurs de références optimales 8.1 et 0.49 successivement, avec la puissance éolienne capturée sa référence optimale.

Nous remarquons la stabilité de la tension du bus continu qui suit bien sa référence qui est 600V.

Les courants statoriques (i_{sabc}) et les courants rotoriques (i_{rabc}) sont de forme quasi-sinusoidale.

IV.7.conclusion

Ce chapitre est focalisé sur la chaîne de conversion de l'énergie éolienne à base de la GADA avec une charge isolée et en mode autonome utilisées dans le cadre d'installations électriques autonomes c'est à dire d'installations qui ne sont pas raccordées sur le réseau de distribution d'électricité.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le présent travail nous a permis de faire une étude d'un système de production d'énergie éolienne dans un site isolé . ce travail s'attache la modélisation des différents composants du système éolien pour ensuite utiliser ces modèles pour élaborer un système de commande qui devait atteindre l'objectif d'assurer un fonctionnement optimal de la chaîne éolienne. A travers cette étude nous obtenons non seulement un moyen générant de l'énergie avec un rendement optimal.

Généralités sur les systèmes éoliens (Les énergie éolienne à vitesse variable) sont présentées dans le premier chapitre.. Les différents composants d'une turbine éolienne ont été présentés et expliqués en premier lieu, puis un état de l'art sur les différentes associations machines électriques convertisseurs statiques pouvant être accouplées à une éolienne a été dressé pour expliquer la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique tout en montrant les avantages et les inconvénients de chaque dispositif.

Une modélisation et commande vectorielle de la MADA était l'objectif du deuxième chapitre, le modèle de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique (le modèle de la turbine éolienne, le modèle de la génératrice asynchrone à double alimentation). Ensuite, on va modéliser la turbine et l'aérogénérateur, et la commande vectorielle avec onduleur a deux niveaux .

La commande du système éolien à vitesse variable basé sur MADA était l'objectif du troisième chapitre, les extraction et stratégie de contrôle MPPT avec et sans asservissement de la vitesse.

La commande de la GADA fonctionnement autonome intégré dans un système éolien était l'objectif du quatrième chapitre. Les résultats de simulation ont montré l'efficacité de la commande de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne à base de la GADA a vide et avec charge isolé et la fonctionnement autonome.

D'une manière générale le travail présenté dans ce mémoire nous a permet de montrer l'intérêt que suscitent les énergies renouvelables dans notre pays l'Algérie. Néanmoins, tous ces résultats n'excluent pas des améliorations qui peuvent être apportées dans le futur de notre travail. Il s'agit en fait des points suivants :

- Développement et mise en œuvre d'un banc d'essai d'un système éolien GADA fonctionnement autonome.
- Une intégration d'un système hybride éolien-photovoltaïque autonome.

ANNEXE

ANNEXE

Données de la machine asynchrone à double alimentée et la turbine :

1. Valeurs nominales :

4 kW, 220/380 – 50 Hz, 15/8.6A, 1440 tr/min.

2. Paramètres de la MADA:

- Résistance statorique: $R_s = 1.2 \Omega$.
- Résistance rotorique: $R_r = 1.8 \Omega$.
- Inductance cyclique statorique: $L_s = 0.1554 \text{ H}$.
- Inductance cyclique rotorique: $L_r = 0.1568 \text{ H}$.
- Inductance cyclique mutuelle: $L_m = 0.15 \text{ H}$.
- Le nombre de paires de pôles est: $p = 2$.

3. Constantes mécaniques de la MADA:

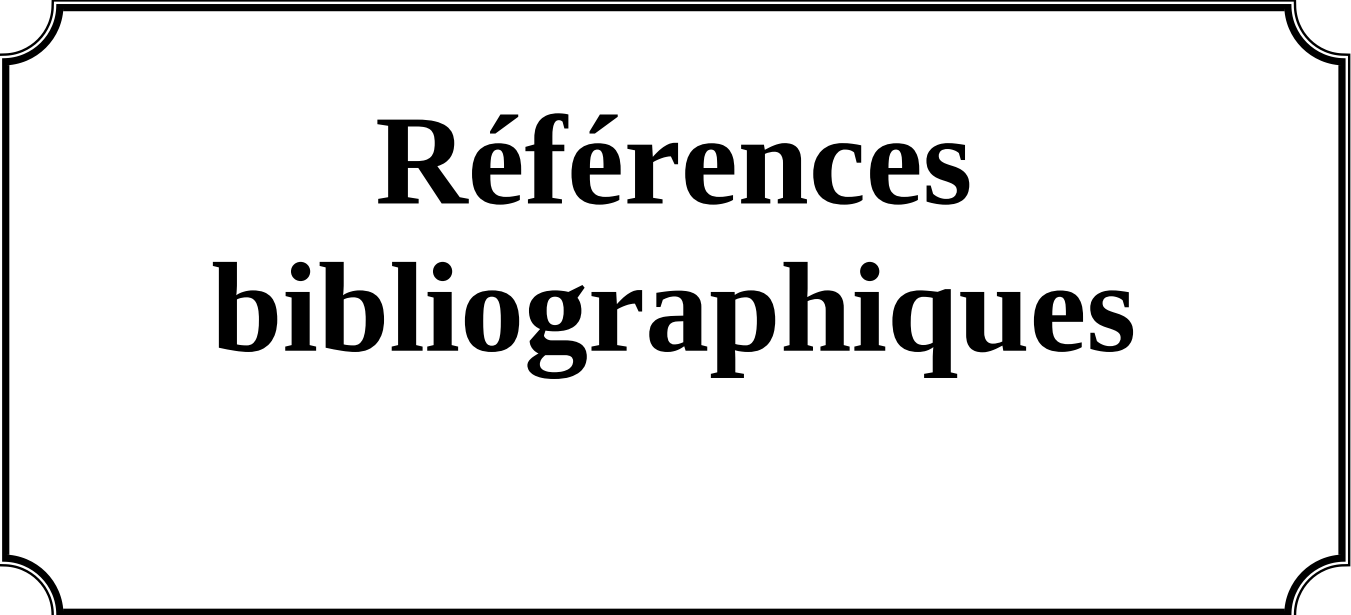
- Coefficient de frottement : $f = 0.001 \text{ N.m.s/rd}$.

4. Paramètres de la turbine éolienne utilisée :

- Nombre de pales = 3.
- Rayon de la surface balayée par les pales : $R = 2.5\text{m}$.
- Gain du multiplicateur : $G = 2$.
- Moment d'inertie de la turbine+ MADA : $J = 0.3 \text{ kg.m}^2$.
- Coefficient de frottement : $f = 0.0024 \text{ N.m.s/rd}$.

5. Paramètres de la redresseur :

$R = 0.3 \Omega$, $L = 14\text{e-}3 \text{ H}$, $C = 2\text{e-}3 \text{ F}$.



Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1]: K.LAZHAR : « Etude et simulation d'un moteur asynchrone à double alimentation type rotor bobiné » Master en électromécanique 2010 Université badji mokhtar Annaba..
- [2]: M.LOPEZ « Contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée » thèse de doctorat 2008 université de paris-sud11.
- [3]: Y.A.BENCHERIF « Modélisation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation pour la production de l'énergie éolienne » Ingénieur en Electrotechnique ENP 2008.
- [4]: F.POITIER « Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne » thèse de doctorat 19 décembre 2003 Université de Nantes..
- [5]: M.S.ABDOULAZIZ, S.N.IBRAHIM « Etude du générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne ». Ingénieur d'Etat en Electrotechnique 2007 Ecole Nationale Polytechnique.
- [6]: S.Ali , B.Mourad « Étude d'un générateur asynchrone dans la production d'énergie électrique par éolienne ». PFE d'Ingénieur d'état école nationale polytechnique 2006.
- [7]: Redjem Radia, « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne ». Thèse de magister université Mentouri de Constantine 2009.
- [8]: Arnaud DAVIGNY. « Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie » thèse de doctorat 2007 Université de Lille.
- [9]: S. EL AIMANI . « Modélisation de différentes technologies éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension » thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille et l'Universités Sciences et Technologies de Lille France 6 décembre 2004.
- [10]: HAMZAOUI Ihssen . « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur » Ingénieur en électrotechnique ENP 2008.
- [11]: Khezzani DJAMEL. « Etude et commande d'un système éolien connectée au réseau » Master en Electrotechnique 2010 Université badji mokhtar Annaba.

- [12]: Berkane HOUDAIFA « Modélisation et commande de la machine asynchrone à double alimentation pour la production de l'énergie éolienne » . Master En Electromécanique 2012 Université badji mokhtar Annaba.
- [13]: J. Martin, « Energies éoliennes » Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique ,B 8 585 1- B 8 585 21.
- [14]: K. bedouda,b, R. lakelb, M. ali-rachedic, S. lekhchined, T.bahid. « Modélisation d'une chaine de conversion d'énergie éolienne Basée sur une machine asynchrone à double alimentation ».
- [15]: S.Drid, «Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'une machine à induction double alimentée à flux orienté avec optimisation de la structure d'alimentation ».
- [16]: Serhoud, Hicham, Benattous, Djilani « Sensorless Sliding Power Control of Doubly Fed Induction Wind Generator Based on MRAS Observer » . World Academy of Science, Engineering & Technology; Aug2011, Vol. 80,pp 920.
- [17]: A.Boyette., « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » . mémoire de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy-I, 2006.
- [18]: A.BRAHIM, CH, ABDELMONAIM « Modélisation et Simulation de La Machine Asynchrone à Double Alimentation ». Mémoire de Fin d'Etude En vue de l'obtention du diplôme de licence academique Université d'EL-Oued 2013.
- [19]: BEN AMAR ASMA «étude de la commande d'un systeme éolien base sur une GADA ». memoire pour l'obtention du diplôme de magister en electrotechnique université hadj lakhdar - batna.
- [20] : T.GHENNAME « supervision d'une ferme éolienne pour son integration dans la gestion d'un reseaux electrique ,Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes a base de machine asynchrone a double alimentation ».
- [21]: A.BOULAHIA, « Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique ». mémoire de magister ,universite de constantine, 2009.
- [22]: O.Gergaud « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau » . Thèse de doctorat de l'école Normale Supérieure de Cachan, France, Décembre 2002.

- [23]: O. De Vries, « On the theory of the horizontal axis wind turbine ». Ann. Rev. Fluid. Mech. 1983, 15, pp. 77-96.
- [24]: The world wind energy association, 2013 half-yearreport « www.wwindea.org ».
- [25]: B. Multon « Energie électrique les enjeux ». Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2008.
- [26]: P. Berlu, « Calcul des efforts subis par les éoliennes de moyenne et forte puissance ». Thèse de doctorat, université des sciences et Technologies de Lille I, 1999.
- [27]: KHETTACHE LAID, « Étude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimentée ». Thèse de magister université de Batna 2007.
- [28]: TOUAL Belkacem, « Modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable ». Thèse de magister université de Batna, soutenu le 17/10/2010..
- [29]: Chatlin, « Machine Electrique ». Presses Polytechnique normandes 1990.
- [30]: A. Rahim, M.A. Alam, M.F. Kandlawala, « Dynamic performance improvement if an isolated wind turbine induction generator ». Computers and electrical engineering, Vol. 35.
- [31]: Y.Y. Hong, S.D. Lu, C.S. Chiou, « MPPT for PM wind generator using gradient Approximation ".Energy conversion and management » .Vol.50, pp. 82-89, 2009.
- [32]: S. Heier, « Grid Integration of Wind energy conversion systems ». Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998.
- [33]: Abdeddaim Sabrina, « Optimisation d'un système de génération renouvelable (Photovoltaïque et éolienne) connecté au réseau ». Mémoire de doctorat, université Mohamed Khider – Biskra 2013.
- [34]: H.TAMRABET, « Robustesse d'un contrôle vectoriel de structure minimale d'une machine asynchrone ».Mémoire de magister, université de Batna, 2006.
- [35]: L.BAGHLI, « Modélisation et commande de la machine asynchrone . » Notes de cours de l'IUFM de Lorraine – Nancy 1, non édité, France, 2005.
- [36]: M. Laamayad Tahar, « Commande optimale d'une machine asynchrone apport de la logique floue . » Thèse de magister de l'université de Batna, 2008.
- [37]: N. laverdure, « intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires ». Thèse doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble 2005.
- [38]: Paul-Etienne V, « Commande non-Linéaire d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation. » Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.

- [39]: N. Arnaud GAILLARD, « Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service » . Thèse doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1 2006.
- [40]: R . Kairouani , D. Med El-hadi, « intégration d'une éolienne sur un réseaux électrique isolé » . mémoire master academique, université kasdi merbah , ouargla 2013/2014.
- [41]: A. M. Sylla, « modélisation d'un émulateur éolien à base de machine asynchrone à double alimentation » . mémoire présenté à l'université du québec à trois-rivières 2013.
- [42]: S. Y.YANG, X.ZHANG,C. W.ZHANG, and L.CHANG, « integration development of a variable-speed wind energy conversion system based on doubly-fed induction generator » . School of Electric Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui, China 230009.
- [43]: G. Iwanski, W. Koczara, « grid connection to stand alone transitions of slip ring induction generator during grid faults » . warsaw university of technology institute of control and industrial electronics 75, koszykowa str., 00-662 warsaw, poland.