الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique

Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
De Master en Electrotechnique

Option : ***Energies Solaire Et Eolienne***

THEME

La stratégie de commande SVPWM appliquée à une machine asynchrone à double alimentation (MADA) utilisée pour la production d'énergie éolienne

Proposés et dirigés par

M^r.Medjber Ahmed

M^r.MoualdiaAbdelhafidh

Préparé et présenté par :

M^r. Yous Mohamed

Remerciements

Qu'il me soit permis tout d'abord de remercier et d'exprimer ma gratitude envers le bon dieu, tout puissant, de la bonne santé, la volonté, le courage et la patience qu'il m'a donné pour que je puisse terminé ce travail.

J'exprime toute ma gratitude aux professeurs encadreurs Mr. Ahmed. Medjber et Mr. Abdelhafidh. Moualdia pour le suivi, la patience, les conseils et l'aide qu'ils m'ont accordé tout au long de la réalisation de ce modeste travail et qui m'ont offert la possibilité d'élargir mon spectre de connaissances scientifiques.

Mes remerciements vont également aux enseignants du département de génie électrique et informatique qui ont contribué à notre encadrement pendant l'année d'étude en master II.

Je remercie également tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail.

Enfin je remercie aussi toute personne qui m'a aidé de près ou de loin à la rédaction de ce mémoire.

Mr. YOUS MOHAMED

Dédicace

Je dédie ce travail à mes très chers parents, dont le sacrifice, la tendresse, La patience et les encouragements sont le secret de ma réussite. Sans eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.

Je dédie ce travail également
A ma femme et mes deux enfants, pour m'avoir supporté dans les deux sens du mot pendant la réalisation de ce travail.
A mes chers frères et sœurs pour leurs soutien, leurs aides, leurs encouragements.
A tous ceux qui me sont chères.

Mohamed

Table des matières

I. Etat de l'art des éoliennes 1
I.1 INTRODUCTION 1
I.2. Estimation des ressources éoliennes en Algérie 2
I.3. Définition et catégories de l'énergie éolienne 3
I.4. Fonctionnement technique ou scientifique 4
I.5. Les différents types d'éoliennes 4
I.5.1. Eolienne à axe vertical 4
I.5.2. Aérogénérateur de Type Darrieus 5
I.5.3. Aérogénérateur Type Savonius 6
I.5.4. Eolienne à axe Horizontal 7
I.5.5. Eoliennes rapides 9
I.5.6. Eoliennes lentes 9
I.5.7. D'autres types d'éoliennes 9
I.6. Principaux composants d'une éolienne. 10
I.7. Machine asynchrone à cage d'écureuil 17
I.8. Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné". 19
I.9. Conclusion 19
II. Modélisation de la turbine éolienne. 21
II.1. Introduction 21
II.2. Définition de l'énergie éolienne 21
II.3. Structure des systèmes éoliens : 21
II.3.1. Les éoliennes à vitesse fixe 21
II.3.2. Eoliennes à vitesse variable. 23
II.3.3. Intérêt de la vitesse variable ; 25
II.3.4. L'aérodynamique du rotor et des pales 26
II.3.5. Principe de fonctionnement de l'aérogénérateur. 27
II.4. Description de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) 27
II.4.1. Domaine d'applications des machines asynchrones à double alimentation 28
II.4.2. Avantages et inconvénients de la MADA 29
II.4.2.1 Avantages 29
II.4.2.2. Inconvénients 29
II.4.3. Fonctionnement de la MADA à vitesse variable 29
II.4.3.1. Fonctionnement moteur hypo synchrone (g > 0) 30
II.4.3.2. Fonctionnement moteur hypersynchrone (g < 0) 30

II.4.3.3. Fonctionnement générateur hyposynchrone (g > 0) *31*
II.4.3.4. Fonctionnement générateur hypersynchrone (g < 0) *31*
II.5. Modélisation d'une chaine de conversion éolienne. *31*
II.5.1. Modèle de la turbine éolienne. *32*
II.5.2. Modélisation du vent : *32*
II.5.3. Puissance cinétique du vent. *33*
II.5.4. La puissance aérodynamique *33*
II.5.5. Modelé de l'arbre. *34*
II.5.6. Stratégie de maximisation de puissance. *38*
Calcul de la commande *45*
Elimination de l'effet de chattering. *46*
Interprétation *47*
II.5.6.3. Etude comparative *49*
II.5.6.4. Robustesse vis-à-vis l'inertie *50*
II.5.6.5. Interprétation des résultats : *52*
II.6. Conclusion: *53*
III. Modélisation de l'ensemble MADA-Convertisseur *54*
III.1 Introduction *54*
III.2. Modélisation de la machine asynchrone double alimentation (MADA) *54*
III.2.1. Modélisation côté machine *54*
III.2.1.1. Principe de la commande vectorielle de la MADA *59*
III.2.1.2. Commande vectorielle directe. *64*
III.2.1.3. Commande vectorielle indirecte. *64*
III .2.1.4. Modélisation du fonctionnement de l'onduleur à deux niveaux *65*
III.2.1.5. Modèle du bus continu *69*
III.2.1.6 : Interprétation des résultats *71*
III.2.2. Modélisation d'une chaine de conversion éolienne côté réseaux *72*
III.2.2.1. Modèle de contrôle des courants transitant dans le filtre RL *72*
III.2.2.2. Contrôle du convertisseur coté réseau CCR par hystérésis *74*
III.2.2.3. Simulation et interprétation des résultats *75*
III.2.3. Conclusion : *78*
IV. La commande SVM de la MADA coté réseau *79*
IV.1. Introduction : *79*
IV.2. Onduleur de Tension MLI Vectorielle (SVPWM): *80*
IV.3. Principe de la SVPWM : *80*
IV.4. Technique de Modulation Vectorielle : *80*

IV.6. Simulation et Modélisation de l'Onduleur SVPWM à deux niveaux: 91
IV .7. Interprétation des résultats : 92
IV.8. Conclusion : 93
Conclusions générales et perspectives 94
Asservissement de vitesse par régulateur mode glissant 96
Paramètres de la Turbine Eolienne 101
Bibliographie 102

Liste des figures

Figure I.1. Croissance mondiale de puissance installée d'énergie éolienne dans le monde.[2]..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure I.2 Densité de puissance moyenne éolienne récupérable à 10 m du sol en Algérie ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure I.3:Conversion de l'énergie cinétique du vent. ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure I.4.Eoliennes à axe vertical. ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure I.5a: éolienne type Darrieus ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure I.5b:Différentes déclinaisons des éoliennes de type Darrieus.**Erreur ! Signet non défini.**
Figure I.6:Eoliennes de type Savonius. ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 1.7 : éolienne type Savonius hélicoïdale ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure I.8 :l'influence de vent sur éolienne. ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure I.9 : Les éoliennes à axe horizontal ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure I.10: Efficacité des éoliennes par type de rotor. ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure I.11. Principaux composants d'une éolienne..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure I.12:Montage d'un mât tubulaire..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure I.13 : Tour en treillis métalliques ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure I.14 : La Nacelle. ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure I.15 : L'arbre de transmission. ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure I.16 : Le multiplicateur..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure I.17 : Chaîne de fabrication de générateurs d'éoliennes. .. **Erreur ! Signet non défini.**
Figure I.18:Système de contrôle (commande)..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure I.19: Les Pales ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure I.20 : Le rotor ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure I.21. a/ Girouette b/ Anémomètre ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure I.22 : Système d'orientation de la nacelle ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure I.23: La fondation en béton. ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 1-24 : Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure I.25 : Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.**Erreur ! Signet non défini.**
Figure I.26 : Machine asynchrone à rotor bobiné (document "Joliet Equipement") ... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure II.1.a: Eoliennes à vitesse fixe ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure II.3 : La direction du vent attaquant un profil de pale..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure II.8: Schéma de la turbine éolienne. ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure II.9 : a) Coefficient de puissance (Cp) en fonction de $\boldsymbol{\lambda}$ pour β variable. b) Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure II.10 : Modèle mécanique de la turbine éolienne. ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure II.12: Profil du vent appliqué à la turbine pendant 15 secondes.**Erreur ! Signet non défini.**
Figure II.14 : a)- Coefficient de puissance b)- Rapport de vitesse**Erreur ! Signet non défini.**
Figure II.19: Système régulé par un PI..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure II.20: a)- Vitesse mécanique de la génératrice. b)- Puissance aérodynamique. c)- Coefficient de puissance. d)- Rapport de vitesse, avec asservissement de vitesse PI. **Erreur ! Signet non défini.**
Figure II.21 : Commande douce à un seul seuil. ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure II.22: a)- Vitesse mécanique de la génératrice. b)- Puissance aérodynamique..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure II.23: a)- Vitesse mécanique de la génératrice. b)- Puissance aérodynamique. c)- Coefficient de puissance. d)- Rapport de vitesse, asservissement de vitesse avec le régulateur flou. e)- Caractéristique de la puissance générée. ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure II.24 : a)- Comparaison de la vitesse mécanique entre le régulateur PI, mode glissant et le régulateur flou. b)- Comparaison avec ZOOM..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure II.25 : a)- Comparaison de la puissance aérodynamique entre le régulateur PI, mode glissant et le régulateur flou. b)- Comparaison avec ZOOM. ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure II.26 : a)- Comportement de la vitesse mécanique réglée par trois régulateur, test avec J= -50% Jn b)- Comparaison avec ZOOM ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure II.27: a)- Coefficient de puissance avec J= -50% Jn b)- Comparaison avec ZOOM ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure II.28 : a)- Puissance aérodynamique avec J=+-50% Jn b)- Comparaison avec ZOOM. ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure II.29 : a)- Comportement de la vitesse mécanique avec J=+100% Jn b)- Comparaison avec ZOOM ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure II.30 : a)- Coefficient de puissance avec J=+100% Jn b)- Comparaison avec ZOOM. ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure III.1. Chaine de conversion éolienne..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure III.2 Représentation schématique de la machine asynchrone.**Erreur ! Signet non défini.**
Figure III.3. Repère référentiel de Park..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure III.4. Performances de la turbine éolienne ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure III.5.Représentation spatiale de l'orientation du flux statorique**Erreur ! Signet non défini.**
Figure III.6. Schéma bloc de la MADA à réguler ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure III.7.Schéma bloc de la commande de puissance directe.. **Erreur ! Signet non défini.**
Figure III.8. Schéma bloc de la commande de puissance indirecte.**Erreur ! Signet non défini.**
Figure III.9. Onduleur de tension 2-niveaux alimentant une charge triphasée.**Erreur ! Signet non défini.**
Figure III.10. Différentes signaux de la stratégie triangulo-sinusoïdale.**Erreur ! Signet non défini.**
Figure III.11. Tension simple de l'onduleur à deux niveaux commandé par la stratégie triangulo-sinusoïdale. ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure III.12. Signaux de commandes de l'onduleur ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure III.13. Modèle de bus continu ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure III.14. : a) Vitesse du vent, b) Vitesse mécanique de la MADA.**Erreur ! Signet non défini.**
Figure III.15. : a) Puissance active de la MADA, b) Puissance réactive.**Erreur ! Signet non défini.**
Figure III.16: a) Courant direct du rotor, b) Courant en quadrature rotorique.**Erreur ! Signet non défini.**
Figure III.17 : a) Courants de phases rotorique, b) Courants de phases zoom.**Erreur ! Signet non défini.**
Figure III.18: Tension et courant de phase. ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure III.19. Connexion du CCR au réseau électrique. ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure III.20. Schéma bloc des boucles de régulation des courants dans le filtre d'axes dq ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure III.21 : a) charge, b) courants direct et quadrature. ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure III.22 : puissances active et réactive du filtre..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure III.23 : Courants de phases et Zoom ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure III.24 : Courant d'une phase avec Zoom..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure III.25 : a) variation de la charge, b) variation des puissances active et réactive..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure III.26 :a) courant direct et en quadrature, b) courants de phases avec ZOOM **Erreur ! Signet non défini.**
Figure III.27. Tension du bus continu avec un ZOOM. ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure IV.1 : Schéma équivalent de l'onduleur de tension. ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure IV.2 : Les différentes combinaisons des transistors..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure IV.3: Principe de construction du vecteur de tension $\boldsymbol{Vs}$.. **Erreur ! Signet non défini.**
Figure IV.4 : vecteur d'espace V_s , de l'onduleur de tension..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure IV.5. Séquence de vecteurs $\boldsymbol{V1}, \boldsymbol{V2}$et $\boldsymbol{V3}, \boldsymbol{V4}$ ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure IV.6: Secteurs de position du vecteur $\boldsymbol{V}$ sref..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure IV.7: Projection du vecteur de référence pour le secteur $\boldsymbol{S1}$.**Erreur ! Signet non défini.**
Figure IV.8: a) charge Rch constante, b) courants direct et quadrature du filtre. ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure IV.9: a) Courants de phases, b) zoom ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure IV.10: a) Tension de phase, b) tension du bus continu ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure IV.11: a) charge Rch variable, b) courants direct et quadrature du filtre..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure IV.12: a) Courants de phases, b) tension de phase..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure IV.13: Tension du bus continue b) Zoom ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Liste des tableaux

Tableau IV.1: Les différentes combinaisons des transistors. ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau IV.2 Calcul des largeurs d'impulsions..... **Erreur ! Signet non défini.**

TableauIV.3: Le calcule de V_α, V_β pour les différents états de l'onduleur**Erreur ! Signet non défini.**

Tableau IV4: Le secteur (i=1,2, 3, 4, 5,6). ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau IV.5: Détermination des secteurs..... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau IV.6: l'état des $\boldsymbol{T1}$ et $\boldsymbol{T2}$ pour chaque secteur..... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau IV.7: les signaux de commande ($\boldsymbol{Sa}$,b,$\boldsymbol{c}$) en fonction de $\boldsymbol{Txon}$**Erreur ! Signet non défini.**

NOTATIONS ET ABREVIATIONS

$[L_s], [L_r]$	: Les matrices des inductances statoriques et rotoriques
$[M_{sr}]$	: La matrice des inductances mutuelles entre le stator et rotor
$[P(\theta)]^{-1}$	: La matrice inverse de PARK
$\cos\varphi$	: Facteur de puissance
$\phi_{ar}, \phi_{br,}\phi_c$	: Les flux des trois phases rotorique
$\phi_{as,}\phi_{bs}, \phi_c$	: Les flux des trois phases statorique
$\phi_{dm}\phi_{qm}$	: Les flux d'entrefer dans le référentiel (d, q)
ϕ_{sdq}, ϕ_{rdq}	: Les flux statorique et rotorique dans le référentiel (d, q)
Ω_{mec}	: Vitesse de rotation mécanique
Ω_r	: Vitesse de rotation mécanique
Ω_s	: La vitesse synchrone
C_{aer}	: Couple aérodynamique
$C_{aer-estime}$	: Couple aérodynamique estime
C_{em}	: Couple électromagnétique
C_{em-ref}	: Couple électromagnétique de référence
C_g	: Couple issu du multiplicateur
C_{mec}	: Couple mécanique
C_p	: Le coefficient de puissance de la turbine
C_r	: Couple résistant
C_{vis}	: Couple de frottement visqueux
$I_{ar}, I_{br,}I_{cr}$	: Les courants des trois phases rotoriques
$I_{as}, I_{bs,}I_{cs}$	: Les courants des trois phases statoriques
I_{sdq}, I_{rdq}	: Courant statorique et rotorique dans le référentiel (d, q)
J_t	: l'inertie totale qui apparait sur le rotor de la génératrice
K_i	: Le gain intégral du régulateur PI (Proportionnel Intégral)
K_p	: Le gain proportionnel du régulateur PI (Proportionnel - Intégral)
L_m	: Inductance mutuelle cyclique
M_s, M_r	: Les inductances de fuite mutuelle (stator, rotor)
$[P(\theta)]$	: La matrice de PARK
P_{aero}	: Puissance aérodynamique
$R_A, R_{B,}R_C$	: Résistance rotorique des trois phases ABC
R_a, R_b, R_c	: Résistance statorique des trois phases abc
R_s, R_r	: Résistance statorique et rotorique
T_s, T_r	: La constante de temps statorique et rotorique
V_{as}, V_{bs}, V_c	: Les tensions des trois phases statoriques
V_{estime}	: Vitesse du vent estimé
V_{sdq}	: Tension statorique dans le référentiel (d, q)
l_s, l_r	: Les inductances de fuites des statoriques et rotoriques

$\Omega_{turbine}$	: Vitesse de rotation de la turbine rad/s
θ_s, θ_r	: Angle électrique statorique, rotorique
ω_a	: Vitesse angulaire électrique
ω_r, ω_s	: Les pulsations électriques respectivement du rotor et du stator
AR, BR, CR	: Indice des phases rotorique
As, Bs, Cs	: Indice des phases statorique
d, q	: Les axes correspondant au référentiel lié au repère de PARK
f	: La fréquence du réseau
f_P	: La fréquence de la porteuse
G	: Gain du multiplicateur
IGBT	: Insulate Gâte Bipolar Transistor
M	: L'indice de modulation
M.P.P.T	: Maximum Power Point Tracking
MADA	: Machine Asynchrone à Double Alimentation
MAS	: Machine Asynchrone à Cage
MLI	: Modulation de Largeurs d'Impulsions
PI	: Régulateur proportionnel-intégral
P_m	: Puissance cinétique du vent.
s, r	: Indice correspondants au stator et rotor
V_d	: la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie
V_m	: la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement
CCR	Commande côté réseau
CCM	: commande côté machine.
X	: Vecteur d'état
λ	: La vitesse spécifique
Ω_{mecref}	: Vitesse de rotation mécanique de référence
J	: Le moment d'inertie de la machine
R	: Le rayon de la pale en m
S	: La surface d'air en m² balayée par les pales
V	: La vitesse du vent en m/s
f	: Coefficient de frottement visqueux
f_r	: Le coefficient de frottement
g	: Le glissement
m	: La masse de l'air traversant la surface balayée par le rotor en une seconde
p	: Nombre de paire de pole
β	: Angle de calage
θ	: La position angulaire du rotor par rapport au stator
ρ	: La densité de l'air égale à 1.225kg /m3 a la pression atmosphérique à 15°C.
ω	: Pulsation du réseau

ملخص:
مع التقدم في مجال الالكترونيات الطاقة وتطوير تكنولوجيا التحكم الرقمي، اقترحت عدة هياكل بديلة لمراقبة الآلات ذات التغذية بالتيار المتناوب الحالية من أجل تحقيق نفس الأداء كما لو كان الالة ذي تيار مستمر.
ويتوقف أداء الالة غير المتزامن ذي التغذية المزدوجة إلى حد كبير على الخصائص الدينامية والثابتة للمحول المرتبط به. يقدم هذا الموجز العديد من الأدوات والنهج لاستخلاص قوانين التحكم في هذا النوع من الآلات على نطاق السرعة بأكمله. وقد وفر تطوير تشكيل عرض النبضة قدرا أكبر من المرونة في التحكم في المحولات. بين المتغيرات في آليات تشكيل عرض النبضة، والأكثر وضوحا في الآونة الأخيرة أساسا في قيادة آلات التيار المتناوب، ما يسمى ناقلات تعديل (SVM). ويستند مبدأ هذه التقنية على اختيار تسلسل وحساب أوقات التوصيل أو قطع التيار. يتم أيضا محاكاة النظام العام على برنامج SIMULINK/MATLAB
الكلمات الرئيسية: تشكيل عرض النبضة، SVM، MATLAB / SIMULINKالتحكم الشعاعي.

Résumé :

Avec les progrès de l'électronique de puissance et le développement des technologies numériques de commande, plusieurs structures de contrôle pour les machines à courant alternative ont été proposées, afin d'obtenir des performances identiques à celles de la machine à courant continu.

Les performances de la commande vectorielle appliquée à la Machine Asynchrone à Double Alimentation dépendent en grande partie des caractéristiques dynamiques et statiques de l'onduleur qui lui est associé.

Ce mémoire présente différents outils et approches pour dériver les lois de commande de la machine asynchrone à double alimentation en régime permanent sur toute la plage de vitesse.

Le développement de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) a apporté une plus grande souplesse dans le contrôle des convertisseurs. Parmi les variantes de la MLI, la plus en vue ces derniers temps essentiellement dans la conduite des machines à courant alternatif, la technique dite modulation vectorielle ou Space Vector Modulation (SVM). Le principe de cette technique repose sur la sélection de la séquence et le calcul des temps de conduction ou d'extinction. La simulation de système globale est faite aussi sur le logiciel MATLAB/SIMULINK.
Mots clés : MLI, SVM, MATLAB/SIMULINK, commande vectorielle.

Abstract:

With the advances in power electronics and the development of digital control technologies, several control structures for AC machines have been proposed in order to achieve the same performances as those of the DC machine.

The performance of the vector control applied to the Dual Power Asynchronous Machine depends to a large extent on the dynamic and static characteristics of the inverter associated with it.

This brief presents several tools and approaches for deriving the control laws of the asynchronous machine with dual supply in steady state over the entire speed range.

The development of pulse width modulation (PWM) has provided greater flexibility in the control of converters. Among the variants of the MLI, the most conspicuous lately mainly in the driving of AC machines, the so-called vector modulation or Space Vector Modulation (SVM).

The principle of this technique is based on the selection of the sequence and the calculation of the conduction or extinction times. The global system simulation is also done on the MATLAB /SIMULINKsoftware.
Keywords: MLI, SVM, MATLAB / SIMULINK, vectorial control.

Introduction générale.

Les solutions alternatives aux énergies fossiles que sont le charbon, le pétrole et l'uranium sont donc des voies vers lesquelles notre société toute entière doit s'engager. De plus, la consommation d'énergie, toujours en augmentation, fait réduire les réserves en énergies fossiles et rapproche l'échéance de leur épuisement, ou du moins leur extraction à moindre frais. En effet, pour prendre l'exemple du pétrole, les puits sont désormais beaucoup plus profonds et les gisements plus difficiles d'accès ce qui nécessite plus d'infrastructures et de transformations avant de pouvoir être utilisé comme combustible pour être transformé sous une autre forme d'énergie.[43]

L'énergie éolienne est l'énergie du vent. C'est une énergie plus respectueuse de l'environnement que les énergies classiques. Quoique le vent soit une source d'énergie gratuite, sa puissance varie considérablement en fonction du lieu et du moment ainsi que du climat et des saisons. Le vent ne peut assurer un apport énergétique régulier et il est difficile à contrôler. Toutefois, il est possible de prévoir la vitesse moyenne du vent, sa direction et son intensité dans certains lieux.

La première machine à avoir utilisé le vent en tant que source d'énergie fut le moulin à vent. Le moulin à vent fut inventé au VIIe siècle en Iran et en Afghanistan. De là, il s'est développé au Moyen-Orient, en Inde et a fini par être utilisé en Chine. Les premiers moulins servirent à moudre le grain pour obtenir de la farine. Ils furent aussi utilisés pour pomper l'eau des rivières afin d'irriguer les terres. Le moulin à vent est apparu en Europe au XIIe siècle. Un nouveau type de moulin à axe horizontal en forme de tour fut inventé : la structure tourne autour d'un pivot à la base et les pales étaient face au vent. Par la suite, une tour fixe fut adoptée; seule la partie supérieure, à laquelle étaient fixées les pales, tourne sous l'effet du vent. Au XVIIIe siècle, un gouvernail a été inventé pour que la partie supérieure du moulin tourne automatiquement et s'arrête lorsque les pales font face au vent.

La conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique fait appel à de nombreuses disciplines scientifiques (météorologie pour l'étude du comportement du vent, mécanique et chimie pour les contraintes et la composition des divers matériaux utilisés dans l'aérogénérateur, mécanique des fluides pour l'effet des masses d'air en mouvement sur les pales, électrotechnique pour la conversion électromécanique et l'adaptation de l'énergie

électrique). C'est à la partie électrotechnique de cette chaîne de conversion qu'est consacré ce mémoire.[37]

C'est donc dans ce cadre que nous allons développer notre étude sur un système de conversion éolienne permettant de produire une puissance constante au réseau tout en offrant des services systèmes tels que correction d'harmonique de courant et fourniture d'énergie réactive.

Nous y verrons donc l'intérêt que présente la machine asynchrone à double alimentation par rapport aux autres machines utilisées ainsi que l'intérêt de mettre en place une hélice à angle de calage des pales variable afin de pouvoir fonctionner à vitesse variable pour mieux capter la puissance des faibles vents.

Dans le premier chapitre nous allons présenter un état de l'art actuel des différents modes de production éolienne. Ceci nous permet de nous positionner quant au choix du type de génératrice et de technicité utilisée pour l'éolienne, en plus d'un bref rappel sur les machines les plus utilisées comme génératrice d'électricité.

Dans le second chapitre nous développerons la modélisation de la partie mécanique de l'éolienne. Une fois cette partie mécanique en fonctionnement, nous allons nous attacher à la génération d'électricité par la modélisation de la génératrice et l'élaboration de sa commande permettant de gérer les puissances et d'assurer des services systèmes. Notre choix s'est porté sur une machine asynchrone à double alimentation MADA car elle va nous permettre, en association avec l'hélice à pas variable, de fonctionner quelles que soient les conditions de vent et de vitesse de rotation. En effet, le contrôle de cette machine se fait par les tensions rotoriques et l'on peut alors la contrôler pour produire de l'énergie électrique lorsque la vitesse est à ±30% de la vitesse de synchronisme. Ainsi il est possible de produire de la puissance tout en maintenant la fréquence de 50 Hz constante au réseau. De plus, la commande en double alimentation va nous permettre de réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives de la MADA.

Le troisième chapitre porte sur différentes commandes de la chaine de conversion éolienne. Nous présenterons la modélisation de la machine coté machine et coté réseau en évoquant les performances de l'onduleur par la commande MLI. Une étude du convertisseur coté réseau et du filtre sera faite à la fin du chapitre.

Les performances du dispositif sont analysées et comparées en termes de suivi de consigne, robustesse, et rejet de perturbations.

Le quatrième et dernier chapitre est dévoué à l'étude de la technique de contrôle SVM de la machine coté réseau.

Les résultats obtenus dans ces investigations nous permettront de conclure sur les méthodes utilisées et d'envisager les perspectives pour ce travail.

I. Etat de l'art des éoliennes

I.1 INTRODUCTION

La multiplication des appareils domestiques électriques et l'intense industrialisation des dernières décennies ont conduit à des besoins en énergie électrique considérables. Pour satisfaire cette demande, toujours croissante, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident nucléaire catastrophique, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures. Sans oublier que des événements climatiques récents, ont soulevé de nouvelles interrogations sur la viabilité du nucléaire, notamment à cause du réchauffement climatique et son impact sur la température de l'eau des fleuves utilisée pour refroidir les réacteurs.

Face à ces problèmes, et de façon à limiter l'emploi de centrales nucléaires, certains pays, se sont tournés vers de nouvelles formes d'énergie dites "renouvelables" faisant appel, de façon directe ou indirecte, à l'énergie solaire. Parmi celles-ci, l'éolien apparaît clairement en bonne place, non pas en remplacement des sources conventionnelles, mais comme énergie d'appoint complémentaire à l'énergie nucléaire. En effet l'énergie potentielle des masses d'air en mouvement représente, un gisement considérable, au niveau mondial.

Actuellement, la croissance mondiale est de l'ordre de 30 % par an depuis le début des années 2001(Figure I.1).

La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie.

Grâce aux nombreux travaux de recherche menés sur la commande d'éoliennes, les dernières générations de celles-ci fonctionnent avec une vitesse variable et disposent d'une régulation pitch offrant un très bon rendement énergétique, une bonne robustesse ainsi qu'une facilité d'exploitation et de commande. En plus, elles permettent un fonctionnement sur une plage de vitesse de ± 30 % autour de la vitesse de synchronisme, garantissant ainsi un

dimensionnement réduit des convertisseurs statiques.. Nous pouvons par conséquent modifier la vitesse de rotation et l'angle de calage de chacune des pales, nous permettant ainsi d'améliorer la production de l'aérogénérateur [1].

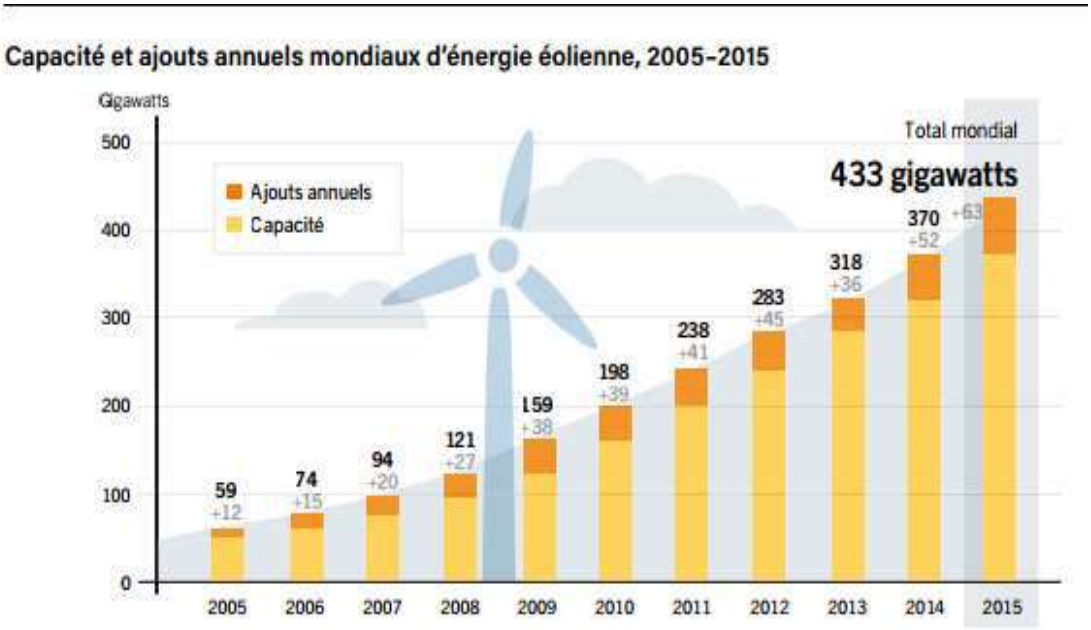


Figure I.1. Croissance mondiale de puissance installée d'énergie éolienne dans le monde.[2]

I.2. Estimation des ressources éoliennes en Algérie

L'énergie éolienne peut contribuer avec une part significative aux autres sources nouvelles d'énergie n'émettant pas de gaz à effet de serre dont l'exploitation raisonnée permet de produire de l'électricité. Ces énergies renouvelables théoriquement exploitables sont nombreuses et variées.

Le développement de l'énergie éolienne connaît un essor important vu la diversité des zones exploitables et aux coûts relativement intéressants [1]. Les systèmes éoliens se développent plus rapidement en s'appuyant désormais sur des techniques nouvelles fiables et éprouvées. De plus, les estimations de la puissance du potentiel énergétique mondial de cette énergie est de 5300 TWh, ce qui représente un gisement énergétique important et très prometteur.

Dans le cas de l'Algérie, comme le montre la figure I.2, la cartographie de la densité de puissance moyenne annuelle récupérable à 10 mètres d'altitude, la majorité du sud-ouest du

Sahara est caractérisée par un potentiel annuel moyen récupérable variant de 1 à 2 MWh/m2 [3]

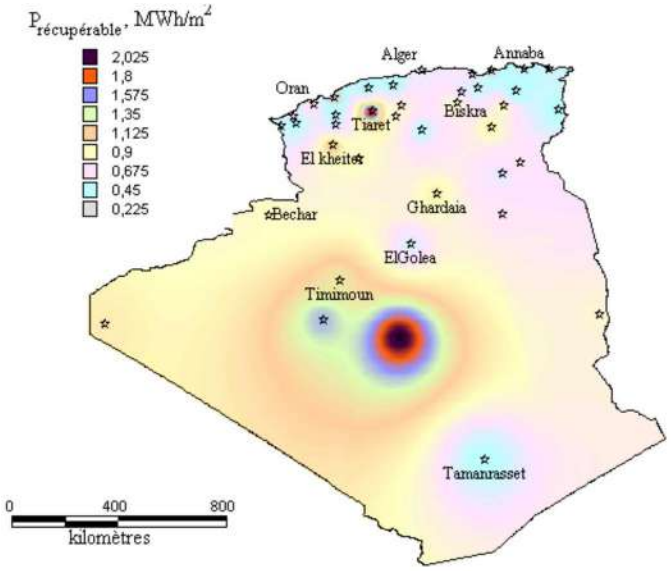


Figure I.2 Densité de puissance moyenne éolienne récupérable à 10 m du sol en Algérie

I.3. Définition et catégories de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement autour du globe. La racine étymologique du terme « éolien » provient du nom du personnage mythologique Éole, connu en Grèce antique comme le maître des Vents.

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire : les rayons solaires absorbés dans l'atmosphère entraînent des différences de température et de pression. De ce fait les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique. Celle-ci peut être transformée et utilisée à plusieurs fins parmi lesquelles la production d'énergie électrique (Figure I.3):

L'éolienne est couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène), un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie. Une éolienne est parfois qualifiée d'aérogénérateur dès lors qu'elle produit de l'électricité.
Il en existe deux modes d'exploitation de l'énergie éolienne

- Les éoliennes terrestres dites « on shore » sont installées sur la terre.
- Les éoliennes dites « off shore » sont installées en mer.

I.4. Fonctionnement technique ou scientifique

L'énergie électrique ou mécanique produite par une éolienne dépend de trois paramètres: la forme et la longueur des pales, la vitesse du vent et enfin la température qui influe sur la densité de l'air.

L'énergie récupérable correspond à l'énergie cinétique qu'il est possible d'extraire. Elle est proportionnelle à la surface balayée par le rotor et au cube de la vitesse du vent.

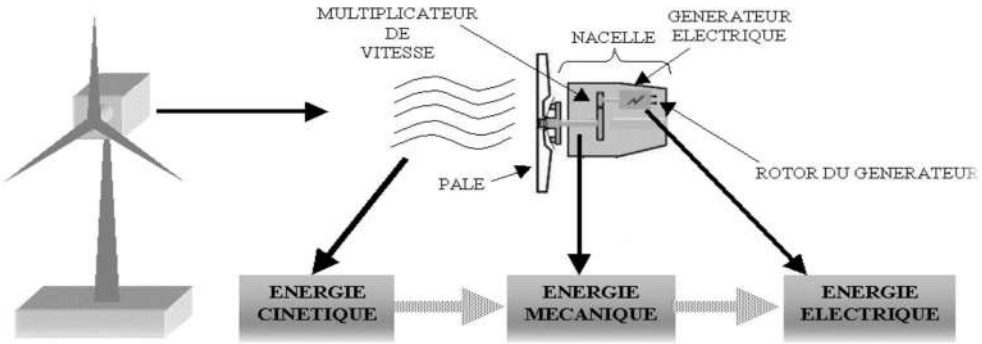


Figure I.3:Conversion de l'énergie cinétique du vent.

I.5. Les différents types d'éoliennes

I.5.1. Eolienne à axe vertical

Il est possible de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique via des aérogénérateurs à axes vertical, Les principaux avantages de ces types d'éoliennes, sont :

- Accessibilité de la génératrice et du réducteur de vitesse mis directement au sol, ce qui facilite la maintenance et l'entretien.
- La non nécessité d'un système d'orientation du rotor car le vent peut faire tourner la structure quel que soit sa direction.

Cependant elles ont comme inconvénients les points suivants :

- Faible rendement et fluctuations importantes de puissance,
- Occupation importante du terrain pour les puissances élevées,
- Faible vitesse du vent à proximité du sol.

Les plus reconnues sont les aérogénérateurs de type Darrieus et Savonius dont le principe de fonctionnement est expliqué et illustré dans les paragraphes suivants. Donc Plusieurs solutions d'éoliennes à axe vertical ont été expérimentées comme le montre la (Figure I.4).



a) Darrieus b) Darrieus de type H c) Savonius

Figure I.4.Eoliennes à axe vertical.

I.5.2. Aérogénérateur de Type Darrieus

D'après l'ingénieur français Georges Darrieus qui en breveta la conception en 1931, il est constitué de deux ou trois pales en forme de « C ». On distingue plusieurs déclinaisons autour de ce principe, depuis le simple rotor « H » à deux profils, jusqu'au rotor parabolique où les profils sont recourbés en troposkine et fixés au sommet et à la base de l'axe vertical, en passant par le rotor hélicoïdal (Figure I.5).

L'aérogénérateur de type Darrieus est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction d'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensités variables selon l'orientation de ce profil .La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif.

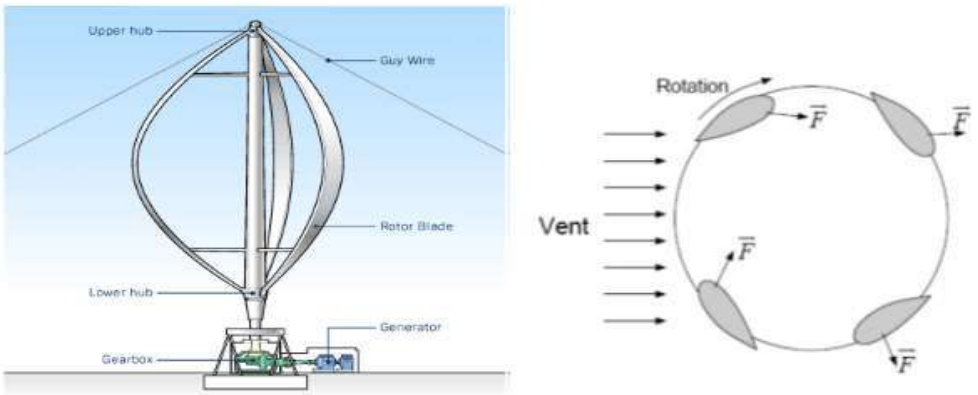


Figure I.5a: éolienne type Darrieus



Figure I.5b:Différentes déclinaisons des éoliennes de type Darrieus.

I.5.3. Aérogénérateur Type Savonius.

Ce rotor a été inventé par le Finlandais Sigurd Savonius en 1925 et a fait l'objet d'un brevet français. Il comporte essentiellement deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre (Figure I.6).

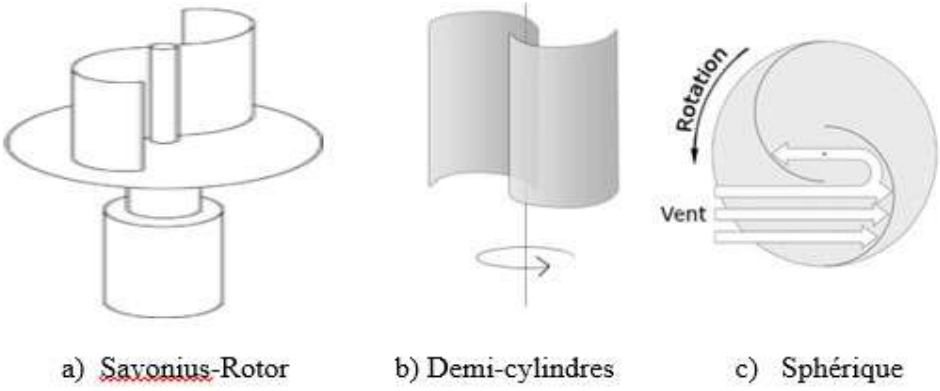


Figure I.6:Eoliennes de type Savonius.

Outre son faible encombrement, qui permet d'intégrer l'éolienne aux bâtiments sans en dénaturer l'esthétique, il est peu bruyant. Il démarre à de faibles vitesses de vent et présente un couple élevé quoique variant de façon sinusoïdale au cours de la rotation. Il existe une variante, appelée Savonius hélicoïdal (ou twisted Savonius en anglais), qui permet d'augmenter le rendement en proposant de façon continue une surface d'accroche au vent. Au lieu d'avoir des demi-cylindres verticaux, ceux-ci sont tordus de façon hélicoïdale autour de l'axe de rotation. Figure 1.7.

Du fait de leur faible encombrement au sol, de leur bon rendement et du besoin d'un très faible vent, ils sont utilisés en ville sur les toits des maisons.



Figure 1.7 : éolienne type Savonius hélicoïdale

I.5.4. Eolienne à axe Horizontal

Le principe de l'éolienne à axe horizontal ou « éolienne à hélices » est simple et rappelle celui du moulin à vent. Les pales sont fixées au sommet d'un pylône et sont orientées face ou dos au vent, ce qui permet des rendements élevés. Il existe un grand nombre de modèles à axe horizontal qui sont les éoliennes adaptées à l'implantation sur terrain. Elles sont en effet à proscrire pour une pose sur bâtiment.

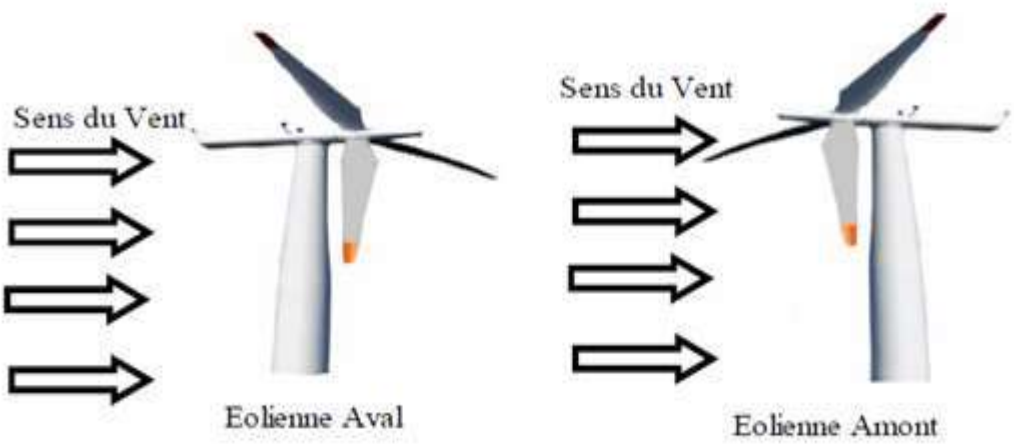
Les modèles puissants sont dotés d'une hélice à pas variable, qui permet d'incliner les pales en fonction du vent. Elles conservent ainsi en toute occasion un rendement élevé. On peut aussi, sur certains modèles, orienter le rotor grâce à un moteur électrique. Ainsi, si le vent a tourné, on peut changer l'orientation de l'hélice. Ce système est réservé aux éoliennes les plus puissantes (à partir de 10 kW).

Les éoliennes dites "aérogénérateurs" possèdent en général deux à trois pales. Moins il y a de pales, meilleur est le rendement.

Ce type d'éoliennes a pris le dessus sur les éoliennes à axe vertical grâce à leur efficacité, leur coût et leur exposition réduite aux contraintes mécaniques. On peut distinguer les capteurs éoliens dont l'hélice est en amont par rapport au vent, « hélice face au vent», et ceux dont l'hélice est en aval par rapport au vent, « hélice sous le vent » (Figure I.8).

Ce sont les types de turbines les plus répondus et les plus utilisés dans les fermes éoliennes à grandes puissances. Elles présentent un coût moins important, et fonctionnent dans des vents forts par rapport aux turbines à axe vertical, et donc produisent plus d'énergie,

du fait que les pales sont placées à une hauteur importante. En plus elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques. Elles sont constituées d'une ou de plusieurs pales pour générer



un couple moteur entraînant la rotation de l'arbre de la turbine.

Figure I.8 :l'influence de vent sur éolienne.

Le rotor tripal est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Le plan de rotation des turbines à axe horizontal est généralement placé face au vent par un mécanisme d'asservissement de l'orientation à l'aide des capteurs de mesure du sens du vent.

Elles comportent un nombre variable de pales profilées aérodynamiquement comme les ailes d'un avion (Figure I.9).



Figure I.9 : Les éoliennes à axe horizontal

I.5.5. Eoliennes rapides

Les éoliennes rapides (Figure I.9.b) et (Figure I.9.c) ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids et de leur rendement élevé. Par contre, elles présentent l'inconvénient de démarrer difficilement [4].

I.5.6. Eoliennes lentes

Les éoliennes lentes sont caractérisées par une multitude de pales entre (20 et 40) qui couvrent toute la surface de la roue. Elles sont adaptées aux vents de faible vitesse (Figure I.9.a). Le diamètre des plus grandes éoliennes de ce genre que l'on construit actuellement est de l'ordre de 5 à 8 mètres. Le couple de l'éolienne est élevé et permet de fournir un effort appréciable dès le démarrage [5]. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Ces éoliennes multipales sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse [6].

I.5.7. D'autres types d'éoliennes

Les Eoliennes à axe verticale et horizontale présentées précédemment sont les turbines de bases utilisées pour la collecte de l'énergie cinétique du vent. Toutefois il en découle une variété d'éoliennes et de designs qui dépend de l'utilisation, tel que l'éolienne Savonius Hélicoïdale, et l'éolienne Darrieus-Savonius hybride, l'éolienne H-type pour les turbines éoliennes à axe vertical. Pour les éoliennes à axe horizontale, la conception de la pale et le nombre de celle-ci jouent un rôle important pour la détermination du type d'application de l'éolienne, à savoir une utilisation.

- Pour l'extraction de grande ou de petite puissance.
- Pour un fonctionnement à petite ou grande vitesse et la résistance aux rafales de vents.
- L'efficacité et le rendement énergétique de l'éolienne.

La Figure I.10 illustre la courbe caractéristique de chaque type de turbine. La turbine bipale permet un fonctionnement à de très grande vitesse de vent avec l'efficacité énergétique la plus élevée. La turbine tripale permet également un fonctionnement avec une efficacité élevée mais sur une gamme de vitesse de vent aussi grande que large, c'est le type de turbine

qui offre le meilleurs compromis économique, énergétique et qui résiste à l'usure et aux vibrations mécaniques. C'est la raison qui fait de cette éolienne la plus répondue dans le marché des fermes éoliennes à grande puissance. Pour un fonctionnement à de petites vitesses et pour de petites puissances les éoliennes les plus adéquates sont la turbine américaine multi-pale à axe horizontal, et l'éolienne Savonius. Elles permettent d'extraire la puissance électrique même à des vitesses de vent très petites, toutefois elles ne permettent d'extraire le maximum de cette énergie que pour une bande de vitesse de vent très étroite.

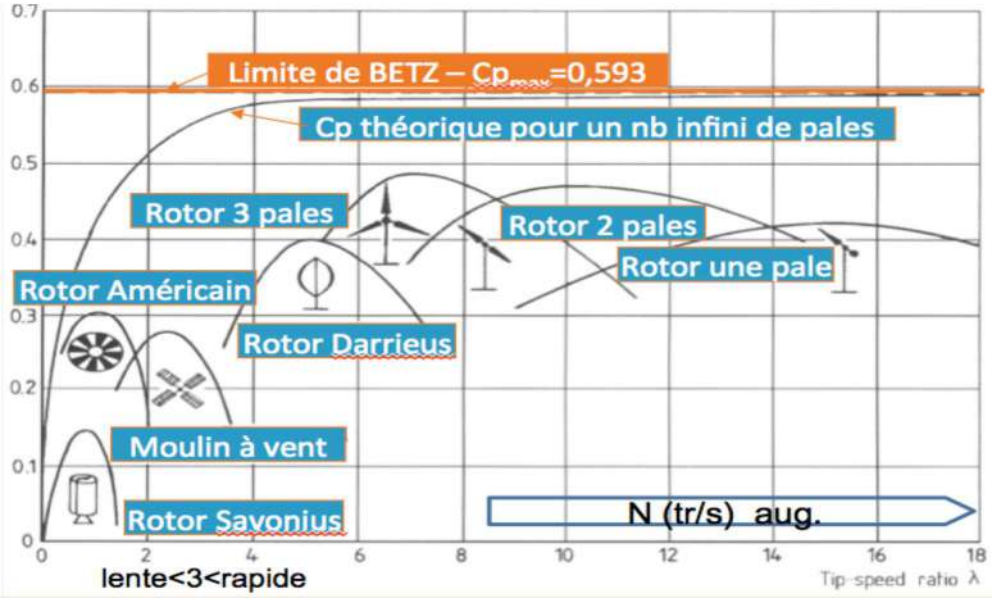


Figure I.10: Efficacité des éoliennes par type de rotor.

I.6. Principaux composants d'une éolienne.

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux : la tour ou mat, la nacelle et l'ensemble rotor-pales. Elle comporte des éléments mécaniques et électriques qui sont illustrés sur la figure 1.11

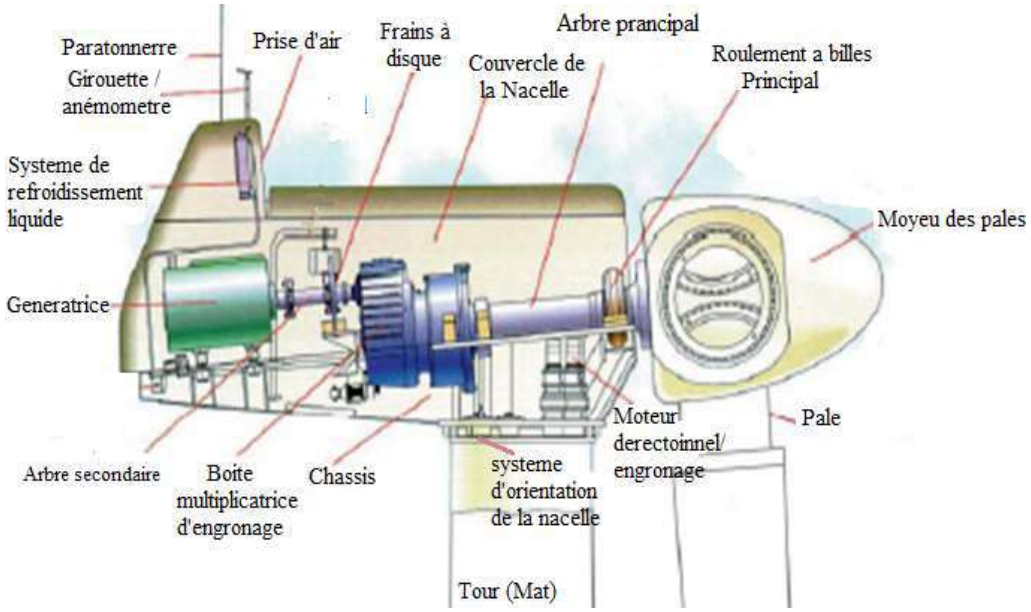


Figure I.11. Principaux composants d'une éolienne.

- **Le mat ou la tour:**

La tour a une forme d'un tronc en cône où à l'intérieur sont disposés les câbles de transport d'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'accès à la nacelle.



Figure I.12:Montage d'un mât tubulaire



Figure I.13 : Tour en treillis métalliques

- **La nacelle**:

La nacelle est située en haut de la tour, elle comporte toute l'installation permettant la production d'électricité : le multiplicateur, les outils de mesure du vent, le générateur, le système de refroidissement, les systèmes de frein et d'orientation de l'éolienne et tous les équipements automatisés d'asservissement de l'ensemble des fonctions de l'éolienne.



Figure I.14 : La Nacelle.

- **L'arbre de transmission:**

Il est composé de deux arbres:

• L'arbre primaire: qui transmet l'effort fourni par le rotor au multiplicateur. Il est dit arbre lent, car il tourne à des vitesses comprises entre (20 - 40 tr/min).

• L'arbre secondaire: il entraîne la génératrice à des vitesses élevées (environ 2000 tours/minute) et est muni d'un frein à disque actionné en cas d'urgence (Figure I.15) [7].

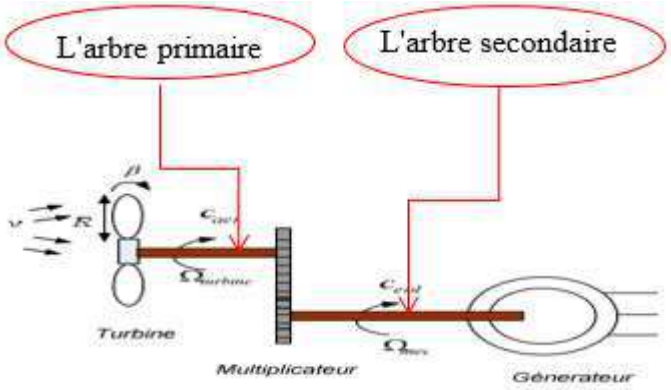


Figure I.15 : L'arbre de transmission.

- **Le multiplicateur:**

Le multiplicateur relie l'arbre (primaire) de la turbine éolienne à l'arbre (secondaire) de la génératrice électrique. Il permet de transformer une puissance à couple élevé et à vitesse lente en une puissance à couple faible et vitesse rapide.

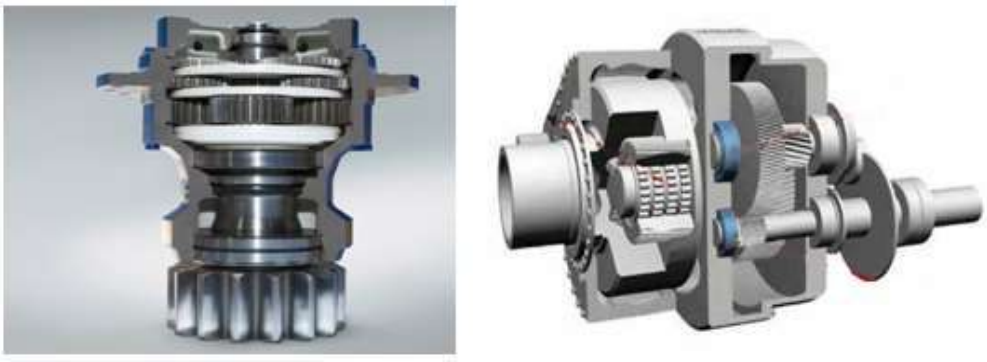


Figure I.16 : Le multiplicateur

- **Le système de refroidissement**:

Se compose généralement d'un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice, et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.

- **La génératrice électrique**:

C'est l'élément principal de la conversion mécano-électrique qui est généralement une machine synchrone, asynchrone à cage ou à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre quelque kW à 10 MW.



Figure I.17 : Chaîne de fabrication de générateurs d'éoliennes.

- **Le système de commande - contrôle de l'éolienne**:

Le système de contrôle de l'éolienne est composé d'un certain nombre d'ordinateurs qui surveillent sans cesse la condition de l'éolienne, tout en recueillant des statistiques sur son fonctionnement. Comme son nom l'indique, cette unité contrôle également plusieurs

interrupteurs, pompes hydrauliques et soupapes situés à l'intérieur de l'éolienne. Avec l'augmentation de la taille des éoliennes, il devient encore plus important que leur taux de disponibilité soit très élevé, donc que leur fonctionnement soit fiable à tout moment.

Le système contrôle-commande communique avec le propriétaire ou l'opérateur de l'éolienne par un lien de communication, en transmettant des alarmes ou des demandes d'entretien par téléphone ou radio. Il rend également possible d'appeler l'éolienne afin de recueillir des statistiques et de contrôler sa condition actuelle. Dans un parc éolien, il est normal qu'une des éoliennes soit dotée d'un ordinateur permettant de contrôler et de recueillir les données des autres éoliennes du parc. On peut appeler cet ordinateur par communication téléphonique ou radio



Figure I.18:Système de contrôle (commande).

- **Le système d'orientation des pâles**:

Il sert à la régulation de la puissance (réglage aérodynamique).
En plus de ces éléments, la turbine est munie des pâles fixes ou orientables et qui tournent à des vitesses nominales inférieures à 40 tr/min. [8]. Elles sont généralement en fibre de verre, Leur diamètre varie en fonction de la puissance désirée (entre 7m et 72m) [7]. Elles ont pour rôle de capter l'énergie du vent et de la transférer ensuite au rotor. Le nombre de pales peut varier suivant les éoliennes. Actuellement, le système tripale est le plus utilisé car il permet de limiter les vibrations.



Figure I.19: Les Pales

- **Le rotor**

Le rotor est constitué de 1 à 3 pales, il est relié à la nacelle par son moyeu. Son rôle est de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.



Figure I.20 : Le rotor

- **Les outils de mesure du vent**

Nous avons deux types : une girouette (Figure I.21 a) pour évaluer la direction du vent et un anémomètre (Figure I.21 b) pour en mesurer la vitesse.

- **Anémomètre.**

Les signaux électriques émis par l'anémomètre sont utilisés par le système de control et de commande de l'éolienne pour la démarrer lorsque la vitesse du vent atteint approximativement 5m/s. De même le système de commande électrique arrête automatiquement l'éolienne si la vitesse du vent arrive à dépasser 25m/s pour assurer la protection de l'éolienne [9].

-



Figure I.21. a/ Girouette b/ Anémomètre

- **Système d'orientation de la nacelle**

Les grandes éoliennes utilisent des moteurs électriques ou hydrauliques pour faire pivoter la nacelle face au vent.

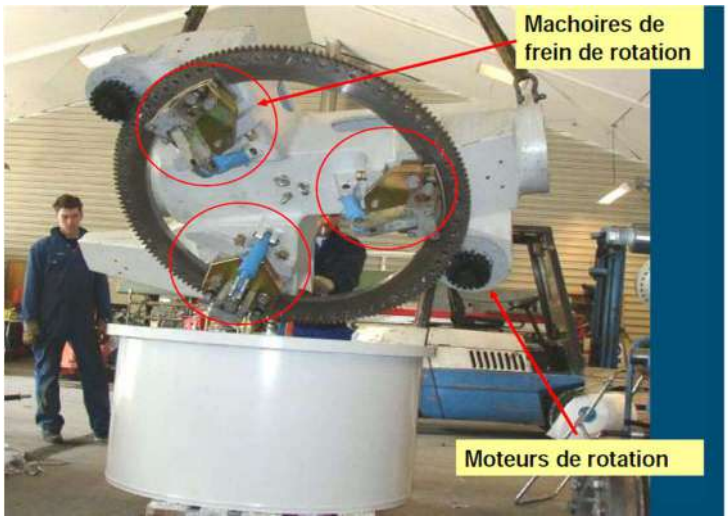


Figure I.22 : Système d'orientation de la nacelle

- **La fondation en béton.**

Une fondation solide assurant la résistance de l'ensemble par grand vent et/ou dans des conditions de givrage.



Figure I.23: La fondation en béton.

I.7. Machine asynchrone à cage d'écureuil.

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde.

La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne. La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la Figure I-24 [10].

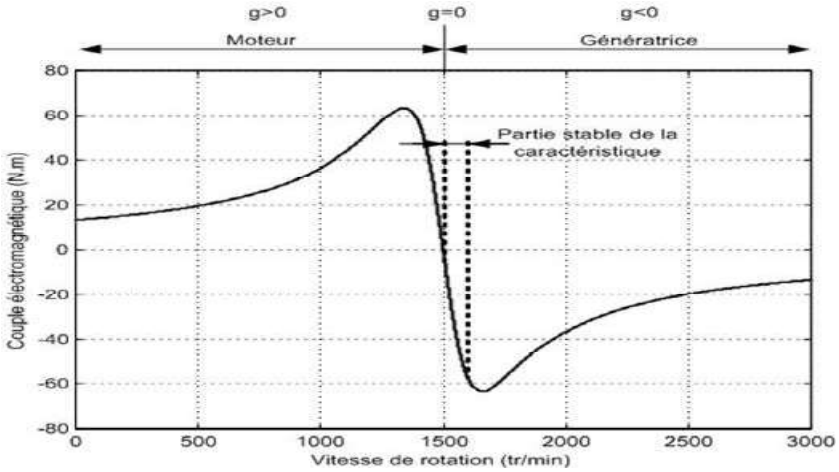


Figure 1-24 : Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point g=0), dans le cas de la caractéristique ci-dessus, la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 trs/min

Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau (Figure I.25). La machine a un nombre de paire de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs. La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine.

Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau. Celui-ci peut-être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la Figure I.25 qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

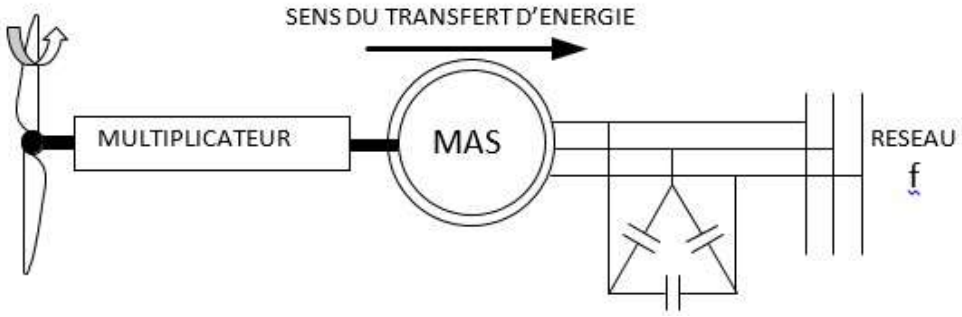


Figure I.25 : Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.

Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales, il n'exploite pas la totalité de la puissance théoriquement disponible pour les vitesses de vent élevées. En effet le système est conçu pour fonctionner sur la partie gauche du réseau de courbes de la Figure I.10, là où celles-ci sont le plus rapprochées les unes des autres. La machine est alors naturellement protégée contre les surcharges mais l'efficacité de l'éolienne est fortement

réduite. De plus les variations du couple mécanique sont fréquentes puisque le système d'orientation des pales est souvent en action pour pallier les variations de vitesse de vent. Ces variations de couple produisent de brusques variations du courant débité sur le réseau entraînant ainsi des perturbations.

I.8. Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné".

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes décrits ci-dessous. Les convertisseurs utilisés sont alors dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Le surcoût engendré par la présence de bobinages au rotor est alors compensée par l'économie réalisée sur le convertisseur. Cette configuration fera l'objet d'une étude détaillée dans la seconde partie de ce mémoire.

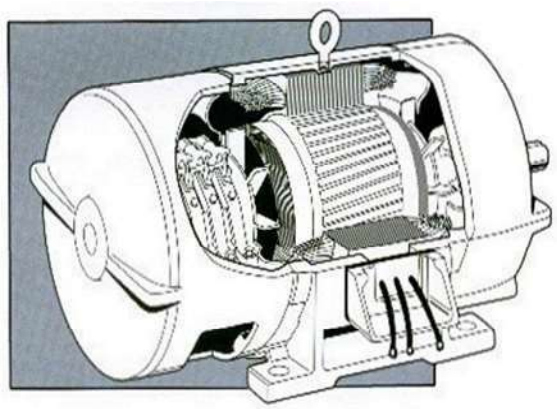


Figure I.26 : Machine asynchrone à rotor bobiné (document "Joliet Equipement")

I.9. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un rappel des notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits, nous avons présenté les deux technologies des éoliennes à savoir les éoliennes à vitesse fixe et celles à vitesse variable. Deux technologies d'éoliennes de grande puissance les plus couramment installées, ont été exposées en soulignant

leurs capacités de réglage de la puissance. Afin d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement de la turbine éolienne, partant de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique (Loi de Betz), nous avons décrit de façon explicite les différents éléments constitutifs de la turbine.

A la fin de ce chapitre, on a donné un aperçu sur les principaux systèmes de conversion électromécanique et les différentes génératrices utilisées dans les éoliennes récentes tout en mettant en valeur l'intérêt de l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation dans les aérogénérateurs.

II. Modélisation de la turbine éolienne.

II.1. Introduction

Les systèmes éoliens connaissent un essor considérable depuis une quinzaine d'années, Grâce au caractère renouvelable et non polluant de l'énergie produite, l'intégration de ces systèmes est devenue un élément clé pour des nouvelles politiques énergétiques dans de nombreux pays [10, 11]. 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 [12], 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.

II.2. 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 (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [13].

II.3. Structure des systèmes éoliens :

Le fonctionnement d'un aérogénérateur est fortement influencé par sa configuration. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration [23].

II.3.1. Les éoliennes à vitesse fixe

a - Principe général

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. La génératrice qui est généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil fonctionnant en hyper-

synchronisme à une vitesse légèrement supérieure à celle du synchronisme est reliée directement au réseau sans convertisseur de puissance. Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales (Pitch control). Sa vitesse mécanique fixe est imposée par la fréquence du réseau et par son nombre de paires de pôles (figure.II.1.a).

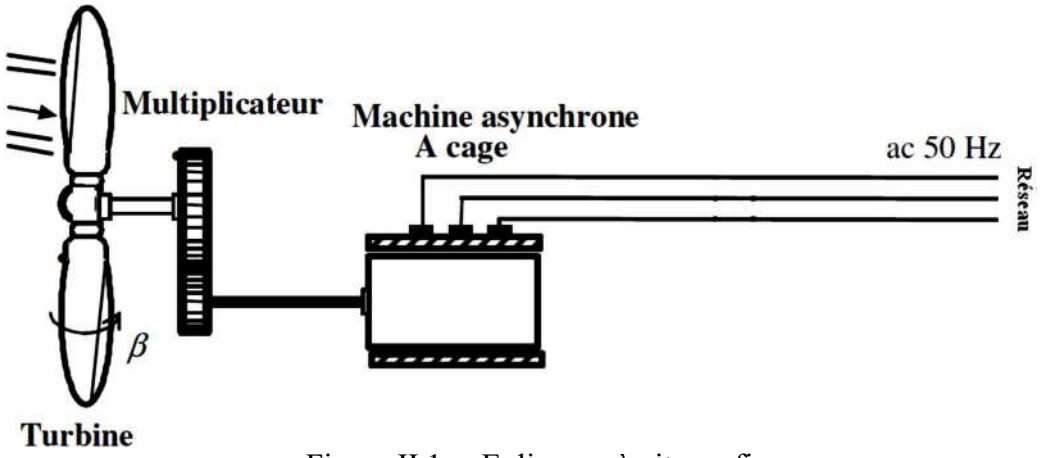


Figure II.1.a: Eoliennes à vitesse fixe

Le contrôle de la puissance de ce type de système se fait au niveau de la turbine, soit par décrochage aérodynamique, soit par calage variable des pales de l'aérogénérateur pour s'approcher du fonctionnement synchrone.

Parmi les avantages de fonctionnement à vitesse fixe:

- Système électrique plus simple;
- Plus grande fiabilité;
- Faible coût.

Néanmoins il possède les inconvénients suivants:

- Puissance extraite non optimisée;
- Rendement faible pour des vents de faibles et moyennes vitesses.
- Pas de gestion de l'énergie réactive par le générateur.

b - Contrôle par décrochage aérodynamique passif (passive stall)

Ce concept est simple et robuste parce qu'il ne fait intervenir aucun système mécanique ou électrique auxiliaire, l'angle de calage β est fixe. L'angle α augmente naturellement avec la vitesse du vent incident V si la vitesse de rotation est pratiquement constante. Cette augmentation provoque une augmentation de la traînée et un décrochage progressif de la pâle.

La puissance captée par la turbine est une fonction de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation. Il n'y a donc aucune possibilité d'adaptation.

c - Contrôle par décrochage aérodynamique actif

L'angle α peut être augmenté (ou diminué) légèrement par diminution (ou augmentation) de l'angle de calage β de quelques degrés (3°à 5°). Donc un très faible réglage de l'angle de calage associé à un profil de pâle optimisé permet d'obtenir un compromis entre complexité du système de réglage et qualité de la courbe de puissance obtenue. Le couple est maintenu pratiquement constant jusqu'au décrochage total où il chute rapidement. La puissance peut donc être limitée à sa valeur nominale. Ce type de contrôle présente la possibilité d'adaptation de la turbine aux conditions d'exploitation.

d - Contrôle par angle de calage variable (pitch control)

L'angle α peut être diminué (ou augmenter) fortement par augmentation (ou diminution) de l'angle de calage β de quelques dizaines de degrés (20° à 30°généralement). Les forces aérodynamiques s'exerçant sur les pales sont donc ainsi réduites. Le couple est maintenu pratiquement constant et peut être annulée par mise en drapeau des pales (β=90°). La puissance est donc limitée. Ce principe est à la plupart du temps appliqué dans des turbines à vitesse variable. Dans ce contrôle, la diminution de l'angle d'incidence α jusqu'à une valeur nulle ou négative limite toutes les forces aérodynamiques sur les pales, ce qui réduit considérablement les efforts à vitesse de vent élevée. Comme la force de poussée axiale est également diminuée, les efforts sur la tour sont réduits. Cet avantage est encore amplifié à vitesse variable puisque l'excès d'énergie pendant une rafale (dont la variation est trop brutale pour que le mécanisme d'orientation puisse compenser les effets) peut être stocké dans l'inertie du rotor par variation de sa vitesse alors que la puissance transmise reste pratiquement constante.

II.3.2. Eoliennes à vitesse variable.

A cause des inconvénients du système éolien à vitesse fixe, les industriels ont développés d'autres systèmes plus performants fonctionnant pour une gamme de vitesse plus large. Ces systèmes sont basés sur l'exploitation optimale de la puissance extraite de l'énergie cinétique du vent en ajustant en permanence la vitesse de la génératrice à celle du vent. Cette technique s'effectue par des commandes sur la chaîne globale du système à

savoir: la turbine, le générateur et le convertisseur utilisé qui sert à synchroniser la fréquence et l'amplitude générés par le générateur avec celles du réseau [24-26].

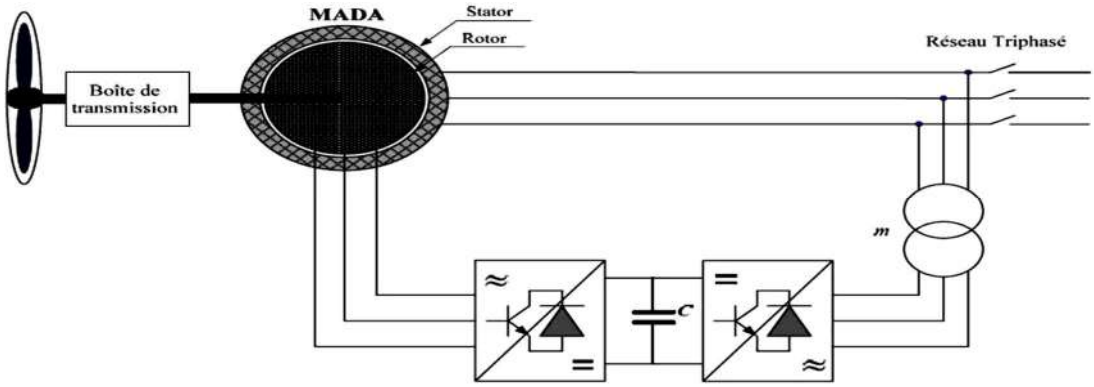


Figure II.1.b: Eoliennes à vitesse variable à cage d'écureuil.

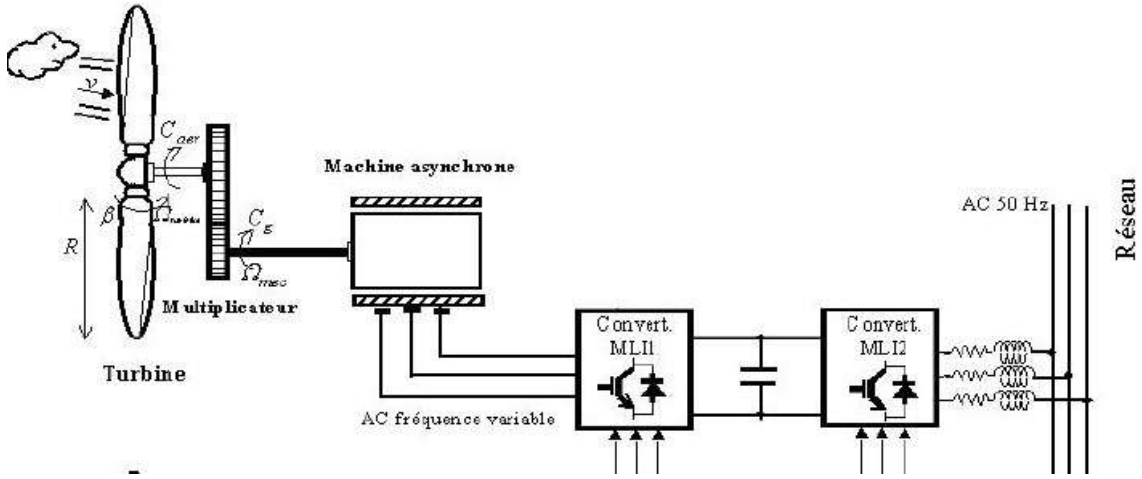


Figure II.1.c: Eoliennes à vitesse variable à rotor bobiné.

Il en existe deux variantes de ces éoliennes :

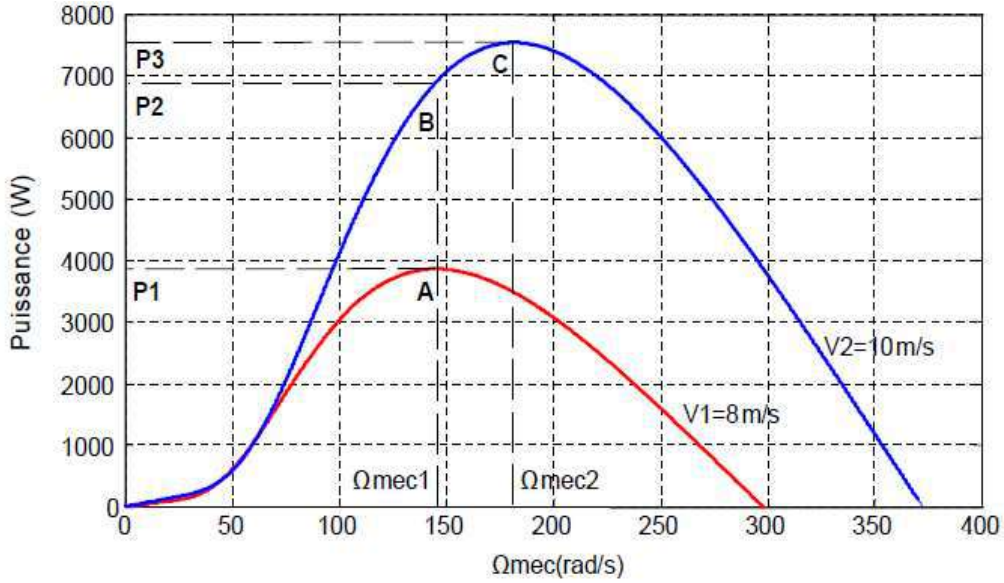
- La première variante représentée sur la figure (II.1.b), est basée sur une machine asynchrone à cage, pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques.
- La deuxième variante, figure (II.1.c), est basée sur l'emploi d'une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné permettant de réaliser une vitesse variable par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance situés sur le circuit rotorique.

Les convertisseurs d'électronique de puissance offrent des possibilités de contrôle extrêmement utiles au pilotage de l'ensemble: contrôle de la qualité des courants et des puissances active et réactive injectés au réseau, meilleur suivi des trajectoires des courants,

maîtrise fine et rapide des points de fonctionnement. La commande de l'onduleur côté rotor permet le contrôle de la puissance convertie.

II.3.3. Intérêt de la vitesse variable ;

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse mécanique est représentée sur la figure II.12



.Figure II.2. Caractéristique de la puissance générée.

Pour une vitesse de vent *V1* et une vitesse mécanique de la génératrice *Ωmec1*, on obtient une puissance nominale *P1* (point A). Si la vitesse du vent passe de *V1*=8m/s à *V2*=10m/s, et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance *P2* se trouve sur la 2ème caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure *Ωmec2*. Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée [27].

Les techniques d'extraction maximale de puissance consistent à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence (*Ωmecref*) calculée pour maximiser la puissance extraite [28, 29].

II.3.4. L'aérodynamique du rotor et des pales

Au passage du vent à travers le rotor, l'interaction entre le vent et les pales génère une poussée, dont la magnitude est liée directement à la transformation de l'énergie cinétique en énergie mécanique. Un couple est également généré sur les pales ce qui les met, puis les maintient, en rotation.

La figure II.3.Montre la force exercée localement sur un profil de pale. Ce profil se déplace vers le haut dans ce schéma, dans le plan de rotation du rotor. La résultante T peut être divisée en deux composantes et de deux manières.

– une composition avec $(\vec{L},\vec{D})$ et une autre avec $(\overrightarrow{Fx},)$. La première décomposition correspond aux projections dans la direction du vent relatif (la traînée$\vec{D}$) et sa direction perpendiculaire (la portance$\vec{L}$), tandis que la deuxième correspond aux projections sur l'horizontal pour la poussée $\overrightarrow{Fx}$ et sur le plan de rotation pour la force motrice$\overrightarrow{Fz}$. La vitesse de rotation $\Omega_r$et du vent incident V forment un triangle avec la vitesse relative W, "vue" par le tronçon de pale. Le vent relatif forme un angle avec le plan de rotation, appelé "l'angle d'assiette" et désigné par Φ. Avec l'inclinaison du tronçon par rapport au plan de rotation (la somme de l'angle de pitch et du vrillage, θ), la corde de ce profil forme un angle α avec le vent incident. Ce dernier angle est appelé "l'angle d'incidence" ou "l'angle d'attaque", qui est un paramètre pertinent en aérodynamique générale. Enfin, ce positionnement de profil correspond à une grande partie d'une pale lors du démarrage d'une éolienne. [30].

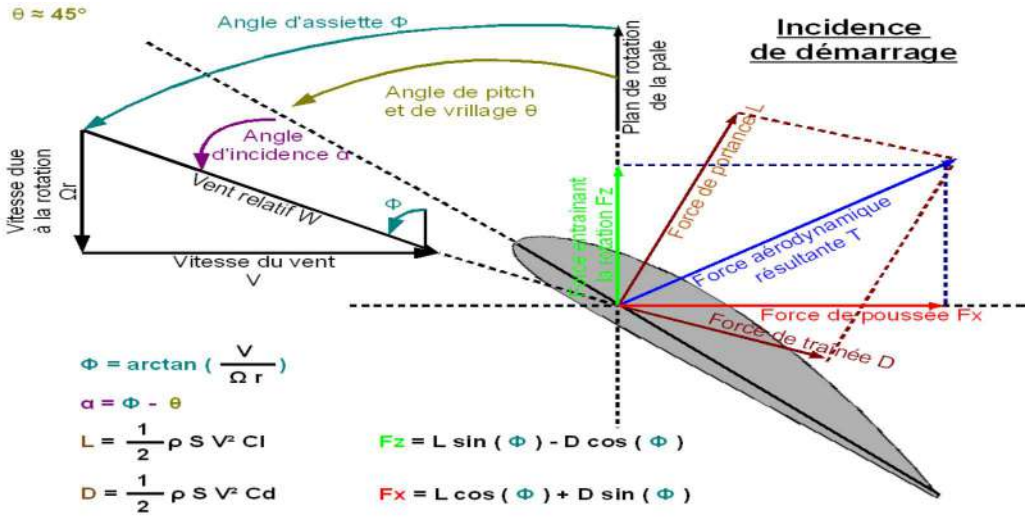


Figure II.3. – La direction du vent attaquant un profil de pale.

II.3.5. Principe de fonctionnement de l'aérogénérateur.

Les aérogénérateurs, communément appelés éoliennes, permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes [3].

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique

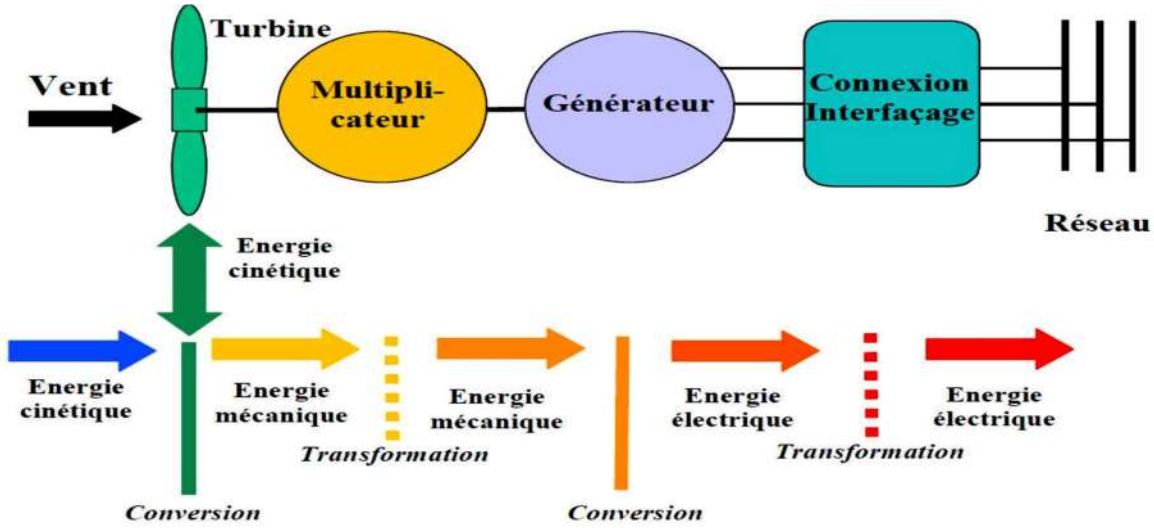


Figure II.4.Principe de la conversion

II.4. Description de la machine asynchrone à double alimentation (MADA)

La machine asynchrone à rotor bobiné présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont accessibles de l'extérieur par l'intermédiaire de trois ou quatre bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais [14]. (Figure II.5).

Les trois enroulements du stator (A, B et C) sont parallèles aux enroulements du rotor et sont distribués sinusoïdalement, décalés de 120 degrés l'un par rapport à l'autre

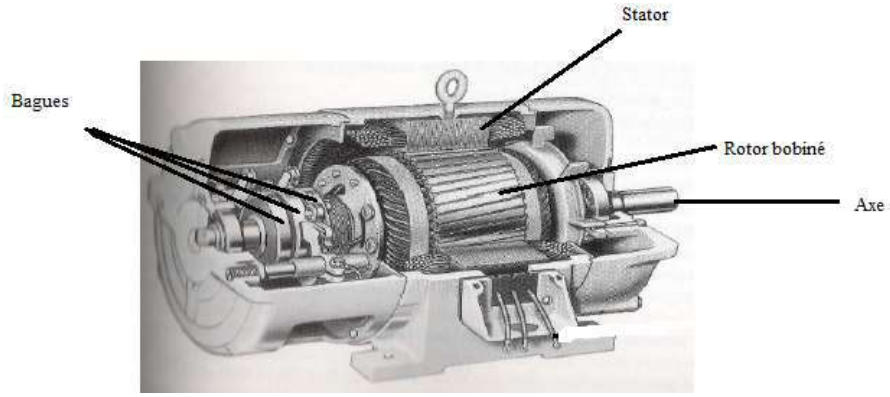


Figure. II.5: Machine asynchrone à rotor bobiné avec des bagues collectrices.

II.4.1. Domaine d'applications des machines asynchrones à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation a été conçue préalablement pour fonctionner en moteur sur une grande plage de variation de vitesse. La variation de la vitesse de la MADA est réalisée par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques, ce dispositif permet par conséquent de réduire considérablement le dimensionnement et le coût des convertisseurs placés entre le rotor et le réseau en réduisant leurs tailles d'environ 70% [15].

L'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable pour le cas de fonctionnement de la MADA en génératrice, permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse du rotor. Ce cas de figure présente la MADA comme une alternative incontournable aux machines asynchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée:

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

II.4.2. Avantages et inconvénients de la MADA

La MADA est une machine qui présente des avantages pour lesquels elle est privilégiée, toute fois, elle n'est pas exempte d'inconvénients qui sont liés à plusieurs facteurs : Sa structure, sa stratégie de commande et ses applications:

II.4.2.1 Avantages

- La mesure des courants au stator et rotor, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- La MADA se comporte comme une machine synchrone et l'on peut pratiquer des rapports de démagnétisation très importants (de l'ordre de 1 à 6).
- Dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement**.**

II.4.2.2. Inconvénients

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement plus longue à causes des balais.
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage.
- Utilisation d'un nombre de convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs, ou un redresseur et deux onduleurs) plus important que la machine à cage (un redresseur et un onduleur).

Nous soulignons que des études récentes, tenant compte de la chute du prix du silicium, donnent maintenant un petit avantage à la MADA.

II.4.3. Fonctionnement de la MADA à vitesse variable

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

Nous savons déjà que la machine asynchrone à rotor à cage doit tourner en dessous de la vitesse de synchronisme pour fonctionner en moteur et en dessus de la vitesse de

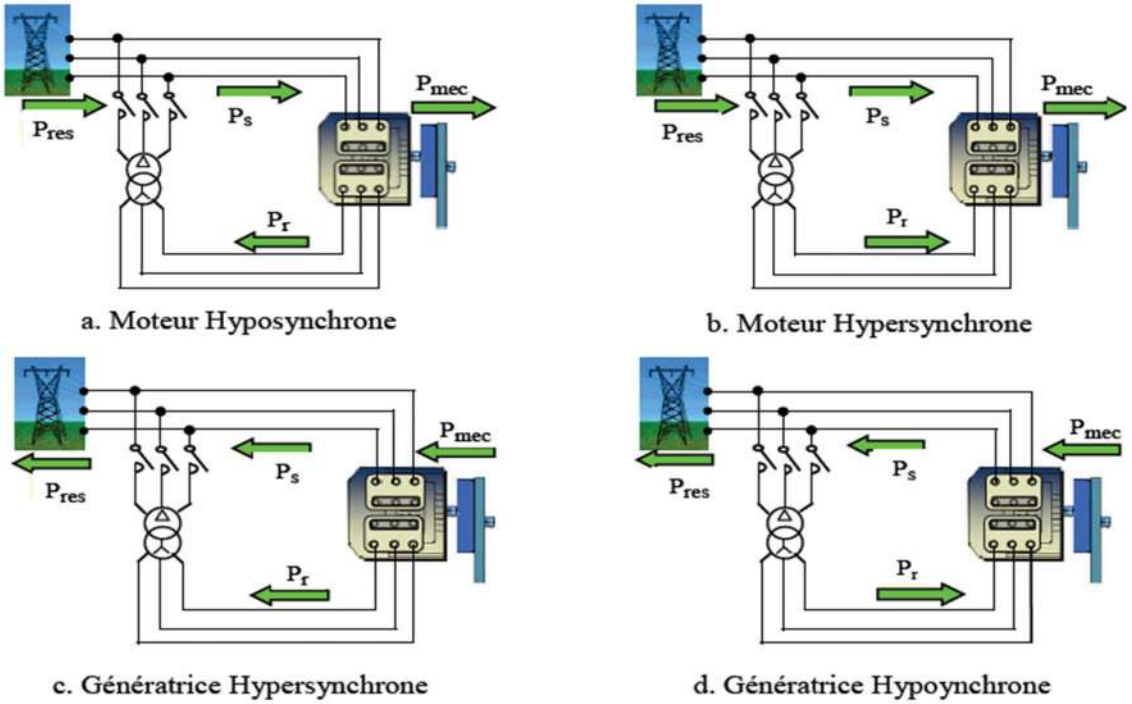
synchronisme pour fonctionner en générateur, ceci n'est plus le cas pour la MADA, en effet c'et la présence du convertisseur entre le rotor et le réseau qui permet de gérer le champ magnétique ; ainsi le transfert de puissance permet de contrôler la puissance et la commande des tensions rotoriques offrant ainsi la possibilité de fonctionner en générateur ou en moteur[16, 17].

II.4.3.1. Fonctionnement moteur hypo synchrone (g > 0)

Pour ce cas, la machine en mode de fonctionnement moteur tourne à une vitesse faible inferieure à la vitesse de synchronisme. La puissance ***Ps*** est fournie par le réseau au stator, la puissance ***Pr*** (la puissance de glissement) transitant par le rotor est réinjecté au réseau (Figure II.6.a). Les conditions mathématiques qui traduisent ce fonctionnement en négligeant tous les pertes sont : $g>0$, $P_S>0$, $P_{mec}>0$, $P_R=g.P_S>0$.

II.4.3.2. Fonctionnement moteur hypersynchrone (g < 0).

Le fonctionnement en mode hypersynchrone du moteur est réalisé lorsque la vitesse de la machine peut varier au-delà de la vitesse de synchronisme. Dans ce mode de fonctionnement une partie de la puissance fournie par le réseau va au rotor via les convertisseurs statiques et est convertie en puissance mécanique (Figure II.6.b)



. Figure II.6. Différentes configurations de fonctionnement de la MADA

II.4.3.3. Fonctionnement générateur hyposynchrone (g > 0)

Dans ce mode de fonctionnement, la puissance est fournie par le dispositif d'entraînement; une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor (Figure II.6.c).

II.4.3.4. Fonctionnement générateur hypersynchrone (g < 0)

Dans ce cas, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine par la turbine éolienne est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à *g. Pmec* est transmise par l'intermédiaire du rotor (Figure II.6.d).

II.5. Modélisation d'une chaine de conversion éolienne.

Le système éolien à vitesse variable étudié dans ce mémoire, basé sur une MADA, est illustré à la Figure II-7, La turbine, via un multiplicateur, entraine la MADA, laquelle est raccordée au réseau électrique directement par le stator mais également au travers de convertisseurs statiques triphasés par le rotor, Celui-ci est muni de systèmes bagues/balais.

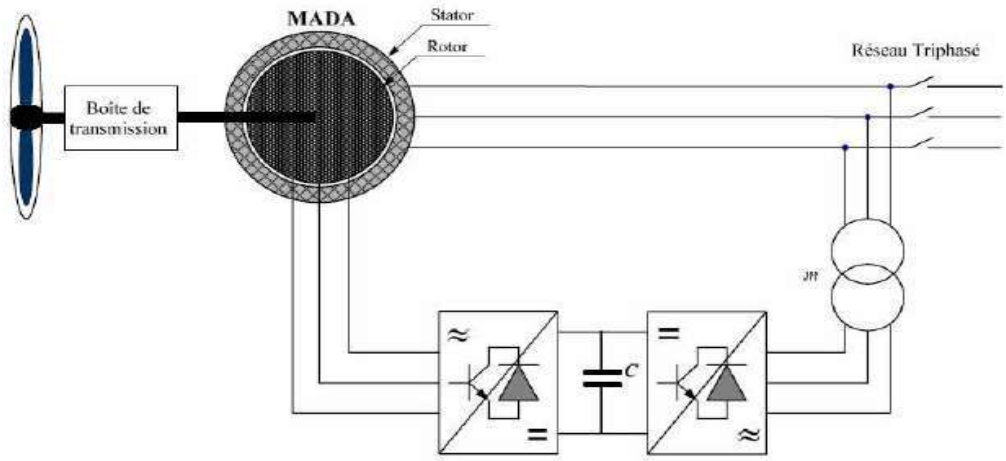


Figure II.7. Chaine de conversion éolienne.

II.5.1. Modèle de la turbine éolienne.

La turbine, sujet d'étude est composée de trois pales de longueur R, entrainant une génératrice asynchrone à double alimentation à travers un multiplicateur de vitesse de gain G (Figure II.8).

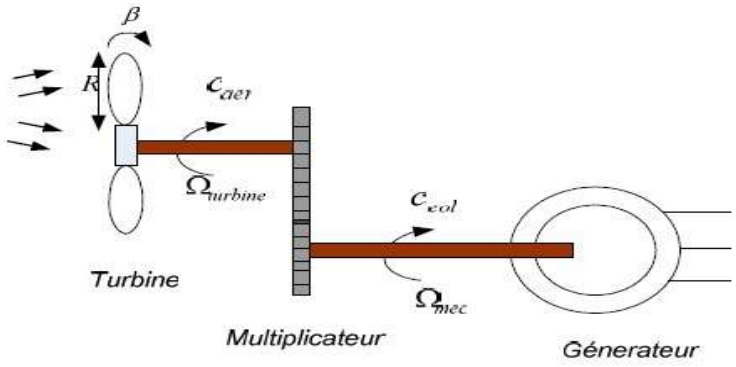


Figure II.8:Schéma de la turbine éolienne.

II.5.2. Modélisation du vent :

Le vent est la source principale d'énergie faisant fonctionner une éolienne, il est donc nécessaire de connaitre son modèle mathématique qui peut être très complexe et qui rend évidemment compte de sa phénoménologie turbulente [18].

La modélisation du vent est très importante pour :

− définir les conditions de fonctionnement de l'éolienne.

− définir les sollicitations qui s'appliquent sur les pales.

− évaluer le potentiel d'énergie utilisable.

− fournir une aide pour l'implantation des machines

La définition du modèle nécessite des données climatiques et géographiques du site concerné, par l'étude. A titre d'exemple, le modèle du vent est donné par une représentation en série de Fourier le présentant comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques selon la formule suivante :

$$V_v(t) = A + \sum_{k=1}^{i} ak.\sin(\omega kt) \qquad \text{(II.1)}$$

Avec : A : la valeur moyenne de la vitesse du vent

ak : amplitude de l'harmonique de l'ordre k

ωk: pulsation de l'harmonique de l'ordre k

i: le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent

II.5.3. Puissance cinétique du vent.

La puissance cinétique du vent à travers un disque S formé par la rotation des pales de rayon R, est donnée par la relation suivante:

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

II.5.4. La puissance aérodynamique

La turbine éolienne est un système aérodynamique complexe à modéliser, cependant des modèles mathématiques simples sont souvent utilisés, une première théorie permettant d'estimer la puissance d'une éolienne est la théorie de Betz qui s'applique essentiellement aux machines à axe horizontal. [19]. La puissance aérodynamique apparaissant sur l'arbre de la turbine s'écrit donc [20] :

$$P_{aéro} = Cp.Pm = Cp(\lambda\beta).\frac{\rho.S.V^3}{2} \quad \text{(II.3)}$$

Avec : *Cp* : coefficient de puissance ou encore de performance :

$$Cp(\lambda,\beta) = C1.\left(\frac{C2}{\lambda_i} - \mathrm{C3}.\beta - \mathrm{C4}\right).\exp\left(\frac{C5}{\lambda_i}\right) + \mathrm{C6}.\lambda \quad \text{(II.4)}$$

$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda+0.008\beta} - \frac{0.035}{\beta^3+1}$; $C_1 = 0.5176, C_2 = 116\,, C_3 = 0.4\,, C_5 = 21, C_6 = 0.0068$

β: L'angle d'orientation des pâles.

$$\lambda = \frac{R.\Omega_1}{V_1} \quad \text{(II.5)}$$

λ : Vitesse spécifique.

$\Omega 1$: Vitesse de rotation avant multiplicateur

R : Rayon de l'aérogénérateur.

Le couple de la turbine peut alors être obtenu en divisant l'expression de la puissance mécanique extraite de l'éolienne par la vitesse de rotation de l'arbre mécanique $\Omega 1$:

$$C_{turbine} = \frac{P_m}{\Omega_1} = \frac{1}{2.\Omega_1}.C_{P.}\left(\frac{R.\Omega_2}{K.V_1}\right).\rho.\pi.R^2.V_1^3 \quad \text{(II.6)}$$

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse K, la puissance mécanique Pmg disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par:

$$P_{mg} = C_P\,.P_{mt} = \frac{1}{2}.C_P.(\frac{R.\Omega_2}{K.V_1})\rho\pi R^2V_1^3 \quad \text{(II.7)}$$

Avec *Ω2* : Vitesse de rotation de l'arbre accouplé à la génératrice à la sortie du multiplicateur. 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 (Figure II.9.) [21].

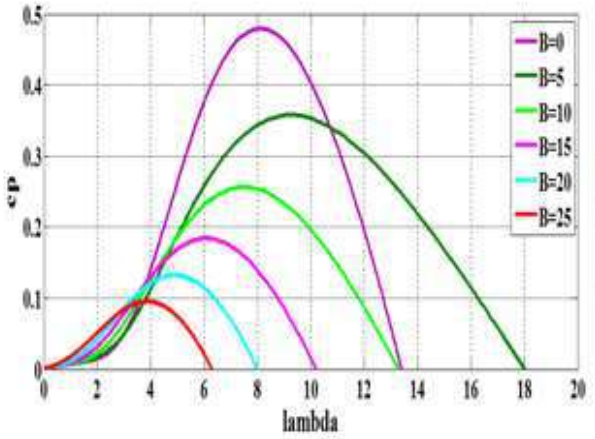


Figure II.9 : a) Coefficient de puissance (Cp) en fonction de λ pour β variable.

II.5.5. Modelé de l'arbre.

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse (rapide) de la génératrice (figure II.10). Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles.

$$\Omega_{mec} = G.\Omega_{turbine} \qquad \text{(II.8)}$$

Avec : Ω_{mec} = Vitesse angulaire mécanique du générateur (*rad/s*).

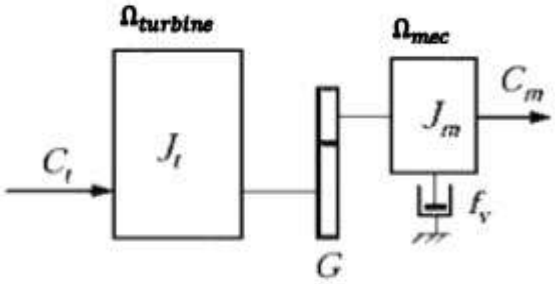


Figure II.10. Modèle mécanique de la turbine éolienne.

Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le gain de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur [22].

$$C_{mec} = \frac{1}{G}.C_{turbine} \quad \text{(II.9)}$$

Où : *G :* Gain de multiplication ;

Cmec: Couple mécanique sur l'axe du générateur en (*N.m*).

Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale *J* constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et celle de la génératrice elle-même.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad \text{(II.10)}$$

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

$$J.\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad \text{(II.11)}$$

avec : $$C_{mec} = C_{turbine} - C_{em} - C_{vis} \quad \text{(II.12)}$$

J : Inertie totale des parties tournantes (*Kg.m*2)

Cvis= f .Ω*mec*: Couple des frottements visqueux;

f *:* Coefficient de frottements visqueux ;

Cturbine=Couple total de l'éolienne ;

Cem : Couple électromagnétique du générateur en (*N.m*).

En fonctionnement générateur le couple électromagnétique *Cem* a un signe négatif.

Les équations précédentes permettent d'établir le schéma bloc du modèle de la turbine (Figure II.11).

La figure ci-dessous représente la production du couple aérodynamique à partir de la puissance cinétique du vent et par action sur l'ongle d'orientation des pales β. Le multiplicateur de vitesse transforme le couple aérodynamique $C_{aéro}$ de la turbine en couple

de la génératrice C_g auquel s'oppose le couple électromagnétique C_{em}. Le contrôle de cette dernière peut donc être effectué soit par action sur l'angle d'orientation des pales soit à travers le couple électromagnétique de la génératrice.

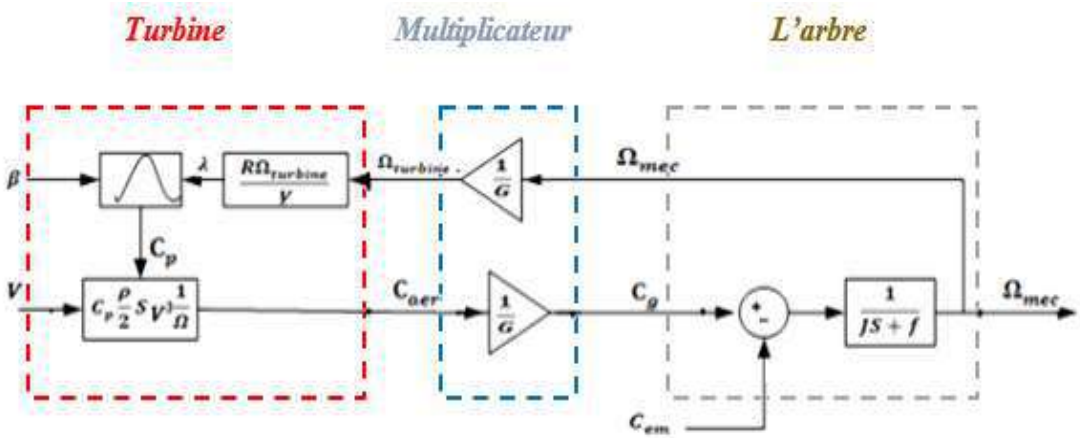
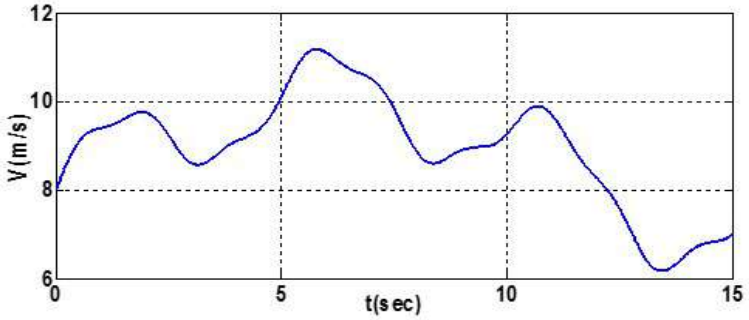


Figure II.11. Schéma bloc du modèle de la turbine



FigureII.12 : Profil du vent appliqué à la turbine pendant 15 secondes.

La vitesse de la turbine et celle de la génératrice sont illustrées respectivement sur les figures II.13 (a et b). Il est à noter que pendant la durée de 15s le système éolien passe par les deux modes de fonctionnement hypo et hyper synchrone.

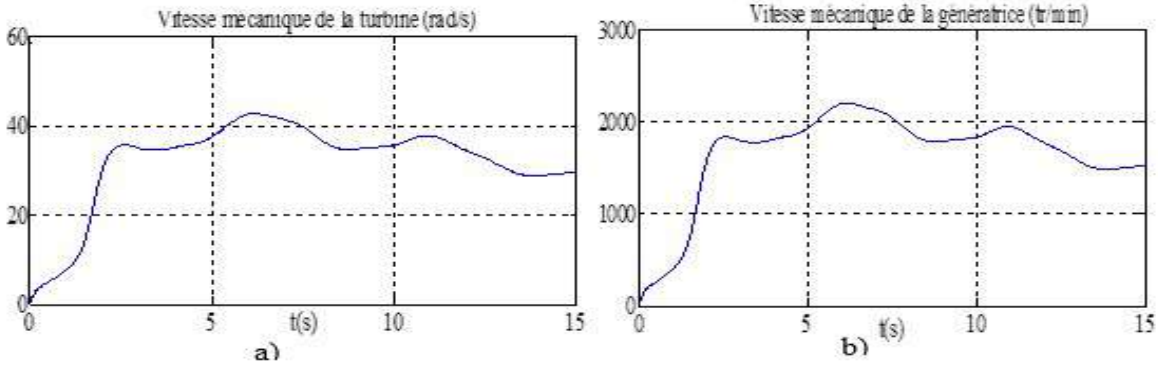


Figure II.13 : a)- Vitesse mécanique de la turbine ; b)- Vitesse mécanique de la génératrice.

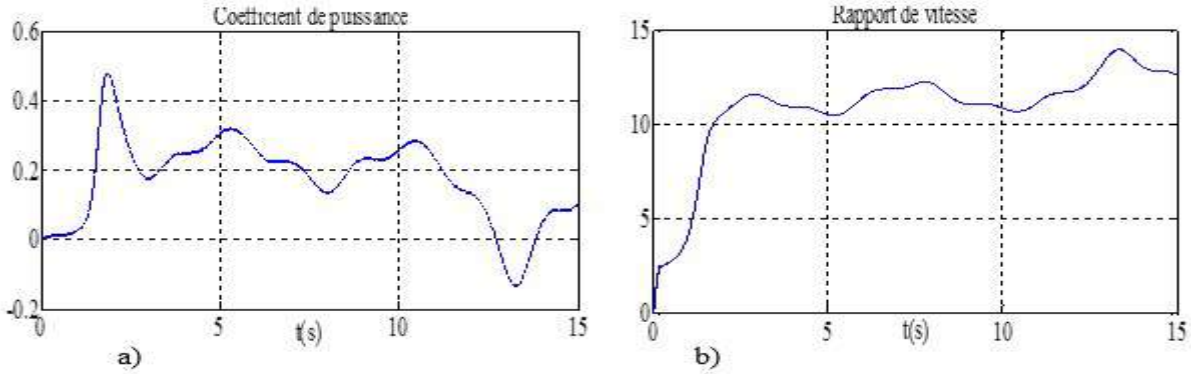


Figure II.14 : a)- Coefficient de puissance b)- Rapport de vitesse

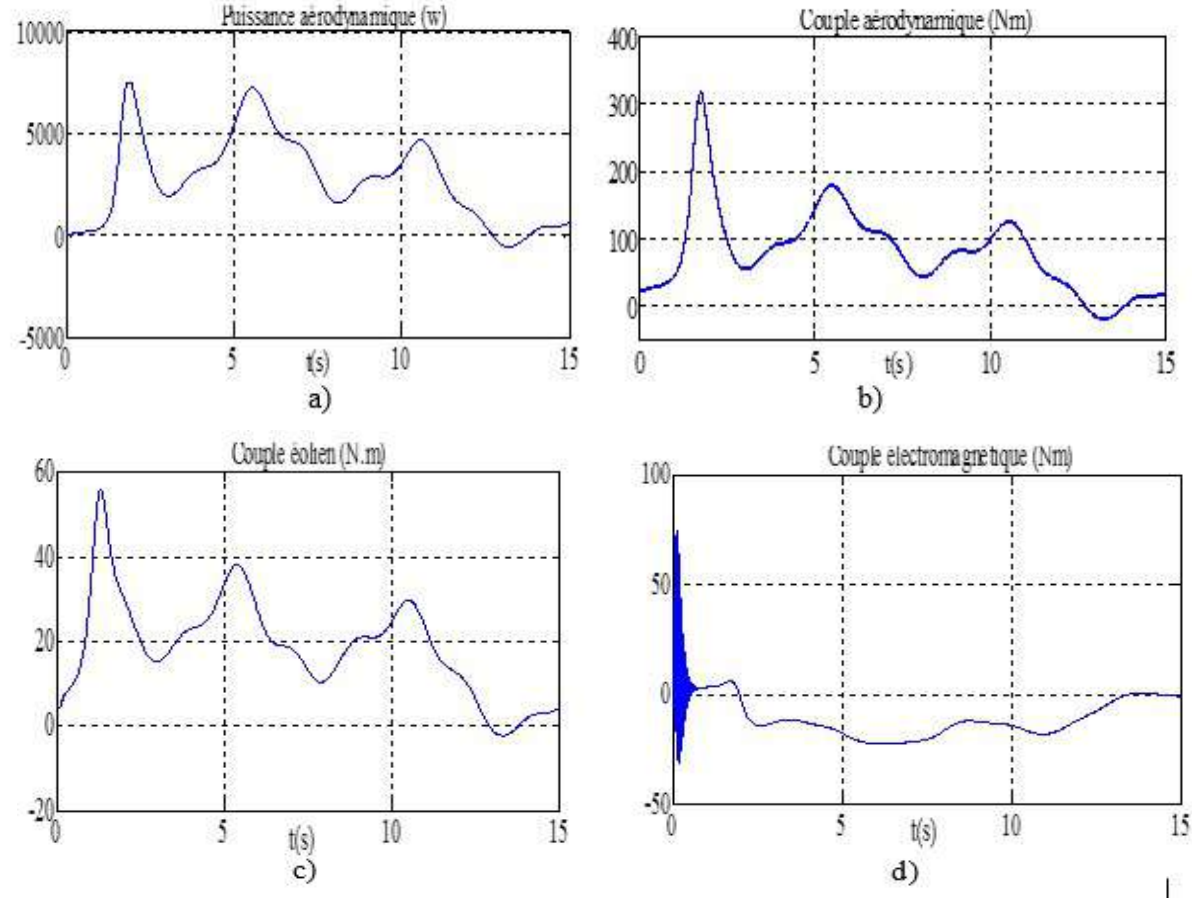


Figure II.15 : a)- Puissance aérodynamique b)- Couple aérodynamique c)- Couple éolien d) Couple électromagnétique.

Les Figures II.14 (a et .b) présentent respectivement la variation du coefficient de puissance Cp et le rapport de vitesse λ en fonction du temps. On vérifie, que les valeurs du coefficient de puissance n'atteignent pas la valeur théorique maximale donnée par Betz (0,59). La puissance aérodynamique disponible au niveau de la turbine et le couple aérodynamique sont illustrés respectivement dans les figures II.15 (a et b). Les figures II.15 (c et d) montrent

respectivement le couple issu du multiplicateur et le couple appliqué par la MADA qui agissent directement sur l'arbre.

II.5.6. Stratégie de maximisation de puissance.

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

Actuellement, les stratégies adoptées visent à extraire le maximum de puissance du vent. Cette puissance est extraire lorsque la turbine fonctionne au coefficient de puissance maximale. La recherche du maximum se fait en permanence et l'éolienne s'adapte donc à chaque variation de vent pour être dans une configuration d'extraction maximale de puissance. Dans notre travail, nous représentons deux stratégies de maximisation de la puissance :

- ✓ Stratégie de maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse.
- ✓ Stratégie de maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse.

1. Stratégie de maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse (BO)

Le principe de cette stratégie consiste à supposer que la vitesse du vent varie très peu en régime permanant. Ce qui revient à négliger l'effet du couple des frottements visqueux C_{vis} ($C_{em} = 0$). Dans ces conditions, on aura :

$$C_{em} = C_{turbine} \tag{II.13}$$

Le couple électromagnétique de réglage est déterminé à partir du couple éolien estimé, tel que :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{t-estimé}}{G} \tag{II.14}$$

Le couple éolien peut être déterminé à partir de la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent et de la mesure de la vitesse mécanique :

$$C_{t-estimé} = \frac{1}{2\Omega_{t-estimé}} C_p \rho S V_{1estimé}^3 \tag{II.15}$$

La vitesse estimée de la turbine est donnée par la relation suivante :

$$\Omega_{turbine-estimé} = \frac{\Omega_{méc}}{G} \quad \text{(II.16)}$$

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 (II.14), tel que :

$$V_{estimé} = R\frac{\Omega_{turbine-estimé}}{\lambda} \quad \text{(II.17)}$$

En regroupant ces quatre dernières équations ; on obtient une relation de contrôle :

$$C_{em-ref} = 0.5\frac{\rho\pi R^5 C_p}{\lambda^3 G^3}\Omega_{mec}^2 \quad \text{(II.18)}$$

Pour extraire le maximum de la puissance générée, il faut fixer le ratio de la vitesse à sa valeur nominale($\lambda_{optimale}$), de manière à obtenir le coefficient de puissance(C_{pmax}). Le couple électromagnétique doit être réglé à la valeur du couple de référence suivante :

$$C_{em-ref} = 0.5\frac{\rho\pi R^5 C_{pmax}}{\lambda_{opti}^3 G^3}\Omega_{mec}^2 \quad \text{(II.19)}$$

Cette expression montre que le couple de référence est proportionnel au carré de la vitesse de la génératrice. Le schéma bloc de cette stratégie est donné par la Figure II.16.

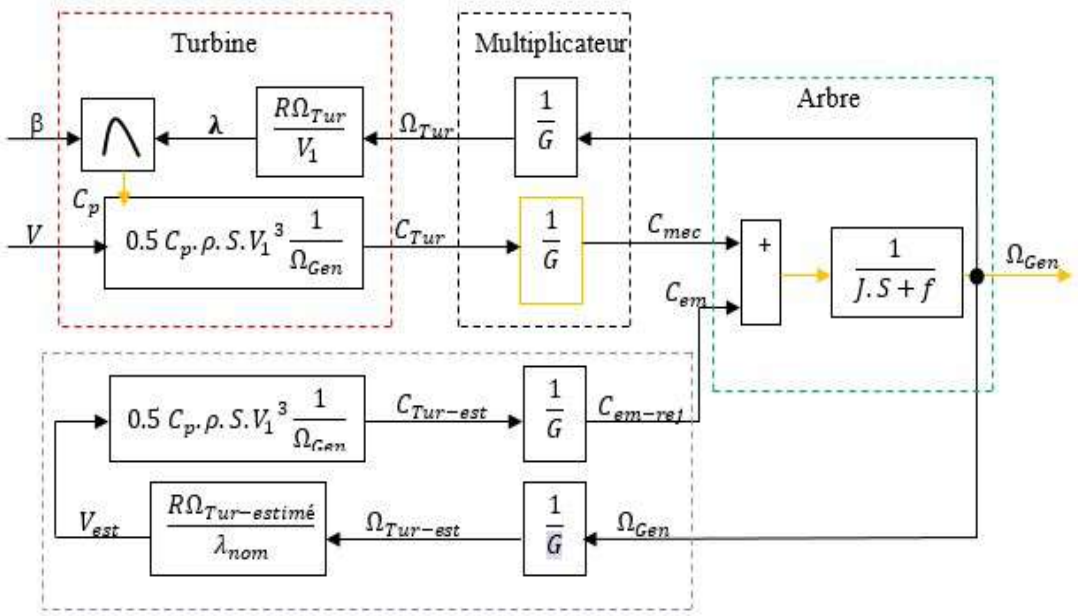


Figure II.16 : Schéma bloc de maximisation de la puissance extraite sans asservissement de vitesse.

- *Résultats de la simulation sans asservissement de vitesse (BO)*

Les résultats de simulation correspondant à cet algorithme de commande montrent que les variations de vitesse mécanique sont adaptées à la variation de la vitesse du vent mais avec une dynamique lente Figure II.17. La puissance aérodynamique est très fluctuante, de fait que le coefficient de puissance et le ratio de vitesse ne sont pas ajustés à leurs valeurs optimales.

Les figures II.17 (a, b, c et d), montrent respectivement la vitesse mécanique de la génératrice, puissance aérodynamique, coefficient de puissance et le rapport de vitesse, on remarque que la variation de la puissance aérodynamique est adaptée à la variation de la vitesse mécanique de la turbine, et cette dernière est adaptée à la variation du vent, ceci montre l'influence de la vitesse mécanique en fonction de la vitesse du vent sur la puissance électrique produite, la puissance extraite est maximale pour les différentes variations du vent jusqu'à une valeur limite correspondant à la puissance nominale .

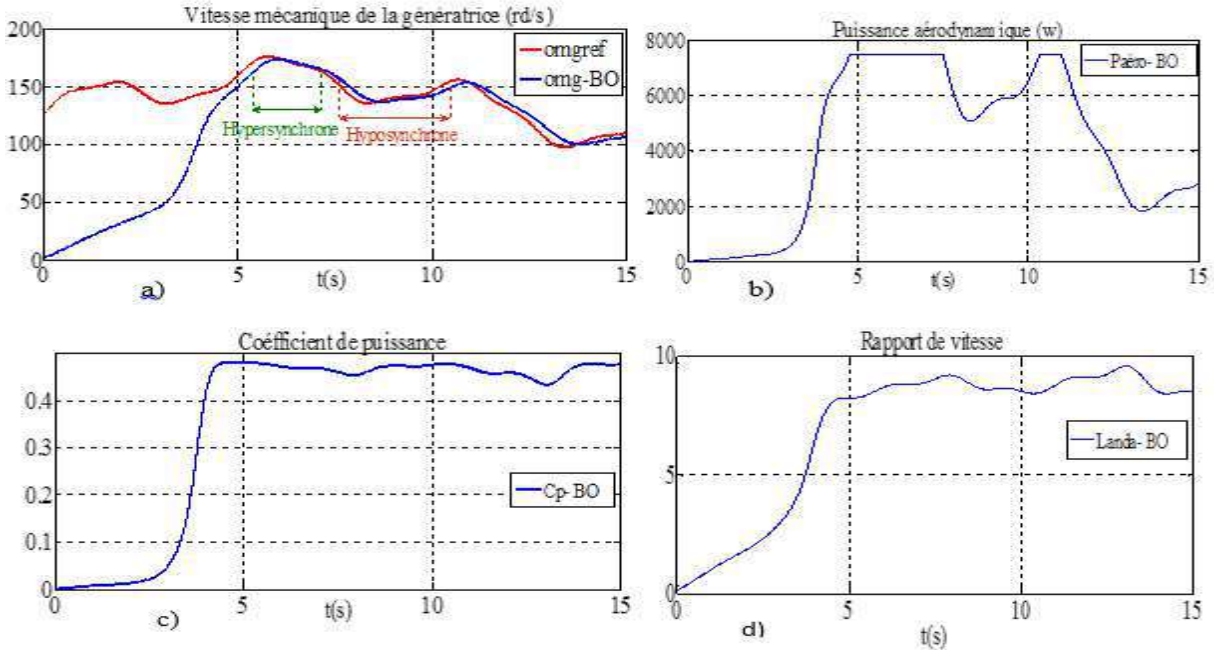


Figure II.17: a)- Vitesse mécanique de la génératrice. b)- Puissance aérodynamique. c)- Coefficient de puissance. d)- Rapport de vitesse, sans asservissement de vitesse.

Stratégie de maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse :

Cette technique consiste à ajouter la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quel que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice afin d'obtenir le maximum de puissance générée ainsi que le maximum du couple électromagnétique.

Pour cette étude, on supposera que quelle que soit la puissance générée le couple électromagnétique développé est à tout instant égal à sa valeur de référence:

$$C_{em} = C_{em-ref} \quad \text{(II.20)}$$

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}:

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \frac{1}{J}(C_g - C_{em}) \quad \text{(II.21)}$$

Le couple électromagnétique de référence $C_{em\text{-}ref}$ permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la vitesse de référence Ω_{ref} est obtenu par la relation suivante:

$$C_{em-ref} = PI.(\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad \text{(II.22)}$$

Cette vitesse de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer (Ωturbine-réf) pour maximiser la puissance extraite. En prenant en compte le gain du multiplicateur, on a donc:

$$\Omega_{ref} = G.(\Omega_{turbine-ref}) \quad \text{(II.23)}$$

La référence de la vitesse de la turbine permettant d'obtenir une valeur maximal du Cpmax avec λ_{Cpmax} (à β constant égal à 0°), est obtenue à partir de l'équation :

$$\Omega_{turbine-ref} = \frac{\lambda_{cp-max}.V}{R} \quad \text{(II.24)}$$

Pour l'asservissement de la vitesse, nous utilisons un régulateur proportionnel intégral (PI).

L'action des correcteurs de vitesse doit accomplir deux taches ;

- Asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence ;
- Atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entrée perturbatrice.

Le schéma bloc de cette stratégie est donné par la Figure II.18

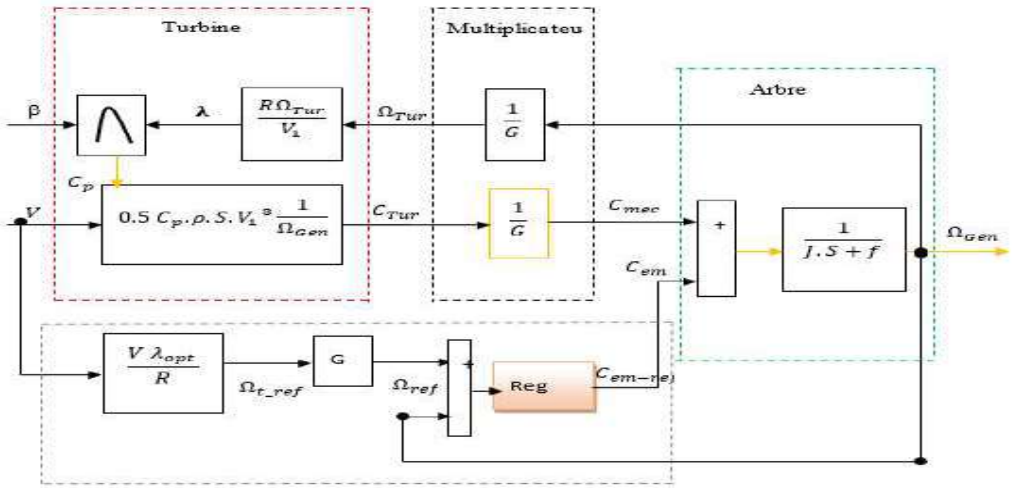


Figure II.18 : Schéma bloc de maximisation de la puissance extraite avec asservissement de vitesse.

Régulation à l'aide d'un contrôleur PI

Le régulateur Proportionnel Intégral PI, utilisé pour commander la MADA en génératrice, est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables. Ce type de régulateur assure une erreur statique nulle grâce à l'action intégrale tandis que la rapidité de la réponse est établie par l'action proportionnelle. Les grandeurs des références pour ces régulateurs seront la puissance active et réactive.

La (Figure II.19) montre une partie du système bouclé et corrigé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme : $K_P + \frac{K_i}{P}$

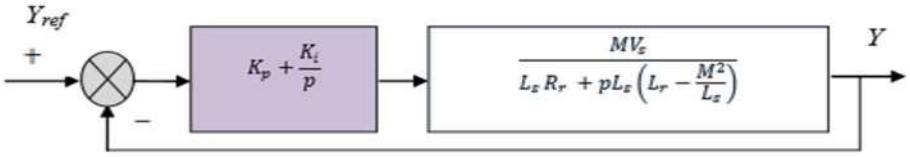


Figure II.19 : Système régulé par un PI

La Fonction de Transfert en Boucle Ouverte (FTBO) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante :

$$FTBO = \frac{P + \frac{K_i}{K_P}}{\frac{P}{K_p}} . \frac{\frac{MV_s}{L_s\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)}}{P + \frac{L_s R_r}{L_s\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)}} \qquad \text{(II.25)}$$

Afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert, la méthode de compensation de pôles est choisie. Ceci conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_P} = \frac{L_r R_r}{L_s\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)} \tag{II26}$$

Si l'on effectue la compensation, on obtient la FTBO suivante :

$$FTBO = \frac{K_P \frac{MV_s}{L_s\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)}}{P} \tag{II.27}$$

Ce qui nous donne en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1 + P\tau_r} \text{ avec } \tau_r = \frac{1}{K_P}\frac{L_s\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)}{MV_s} \tag{II.28}$$

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

Les gains Kp et Ki sont déterminés en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$K_P = \frac{1}{\tau_r}\frac{L_s\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)}{MV_s} K_i = \frac{1}{\tau_r}.\frac{R_r L_s}{MV_s} \tag{II.29}$$

La grandeur essentielle à contrôler avec une grande dynamique est la puissance active, car elle permettra à la machine de fonctionner à sa puissance maximale afin d'obtenir un bon rendement de l'ensemble du système. Cependant, il est aussi nécessaire de bien contrôler la puissance réactive de sorte que sa consigne sera maintenue nulle pour réaliser un facteur de puissance unitaire côté stator.

Résultats de la simulation par le régulateur PI.

Le régulateur PI utilisé pour le réglage des puissances active et réactive et des courants, offre plusieurs avantages notamment la rapidité et la simplicité à mettre en œuvre, ainsi qu'il offre des performances acceptables à la régulation du système considéré.

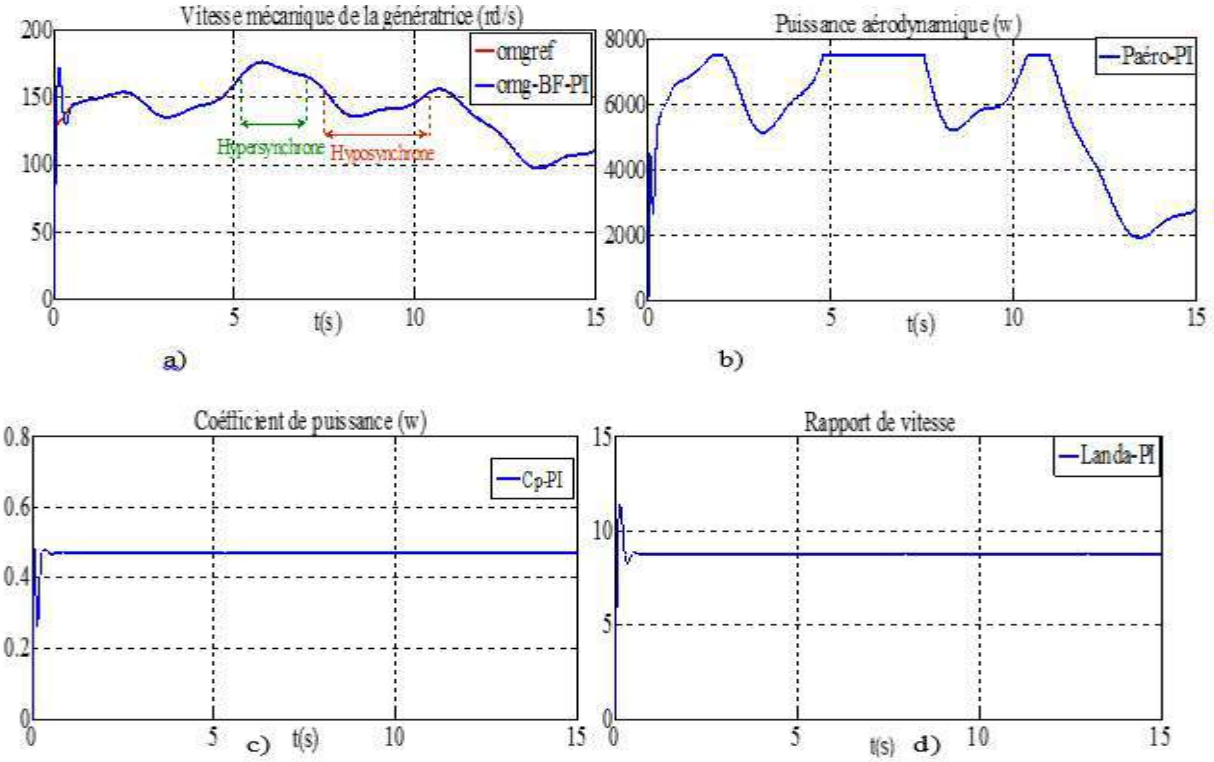


Figure II.20: a)- Vitesse mécanique de la génératrice. b)- Puissance aérodynamique. c)- Coefficient de puissance. d)- Rapport de vitesse, avec asservissement de vitesse PI.

Régulation par régulateur mode glissant

Les systèmes physiques étant de nature non linéaire, leurs comportement est le plus souvent décrit par des équations différentielles non linéaires .Si le domaine de fonctionnement du système est limité et si la non linéarité est douce, le système est linéaire et est représenté par un ensemble d'équations qui décrivent son comportement dynamique. Par contre l'analyse des systèmes non linéaires, qui sont plus riches et plus complexes que les systèmes linéaires est plus difficile. Récemment des études avancées ont été faites dans le domaine de l'automatique et particulièrement le réglage des systèmes non linéaires pour élaborer des algorithmes de commande qui prennent en compte cette propriété des systèmes.

En effet, lorsque l'organe de commande possède un comportement discontinu par commutation (action à deux positions), il est judicieux de faire appel à des méthodes de réglage non linéaires et discontinus qui s'adaptent mieux au comportement particulier de ces organes de commande. Il s'agit en particulier du réglage par **Mode Glissant** qui est un mode de fonctionnement particulier, des systèmes de réglage à structure variable. Ce type de systèmes a été étudié d'abord en Union soviétique (Emilianov 1950), par la suite ces travaux ont été repris ailleurs. Au début des années 80, la commande des systèmes à structure

variable par le mode de glissement est devenue très intéressante et attractive, elle est considérée comme l'une des approches les plus simples pour la commande des systèmes ayant un modèle imprécis grâce aux avantages qu'elle présente (robustesse vis-à-vis des paramètres variables, très haute précision, une bonne stabilité et temps de réponse très faible) ;[32]

La conception de cette commande peut être répartie en trois étapes principales très dépendantes.

a) Choix de la surface de glissement.

b) L'établissement des conditions d'existences et de convergence.

c) La détermination de la loi de commande.

En général, pour un système défini par l'équation d'état suivante :

$$\dot{X} = A.X + BU \tag{II.30}$$

Il faut choisir « m » surfaces de glissement, pour un vecteur « U » de dimension « m ». J.J. Slotine nous propose une forme d'équation générale pour déterminer la surface de glissement qui assure la convergence d'une variable d'état x vers sa valeur de consigne x_{ref}.

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{r-1} e(x) \tag{II.31}$$

Avec :

x : variable à régler

e(x) : l'écart de la variable à régler ($x_{ref} - x$)

λ : Constante positive.

r : degré relatif, (nombre de dérivation de la sortie pour faire apparaître la commande).

Calcul de la commande

La structure du contrôleur comprend deux parties, une concernant la linéarisation exacte et l'autre stabilisante .Cette dernière est très importante dans la commande non linéaire car elle est utilisée pour estimer les effets d'imprécision du modèle et les perturbations extérieures.

$$U = U_{eq} + U_n \tag{II.32}$$

U_{eq} correspond à la commande de linéarisation proposée par Emilianov et Utkin (commande équivalente).

Elimination de l'effet de chattering.

Dans le but de réduire les oscillations de hautes fréquences, la commande adoucie caractérisée par deux seuils (K , 2 ε), représentée par la figure II.21 se trouve être l'une des techniques les plus fréquemment utilisée.

K correspond à la valeur maximale de l'organe de commande que peut supporter le système. ε doit être pris en compte dans l'implémentation pratique du processus, car il influe directement sur la fréquence de commutation des semi-conducteurs et sur la poursuite de la trajectoire désirée [4].

$$U_n = \begin{cases} \left(K/\xi\right) S(x) & Si\ |S(x)| \leq \xi 1 \\ KSigne(S(x)) & Si\ |S(x)| > \xi 1 \end{cases} \qquad \text{(II.33)}$$

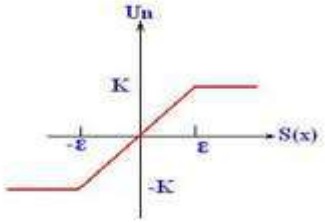


Figure II.21 : Commande douce à un seul seuil.

➢ ***Résultats de la simulation par le régulateur mode glissant.***

La simulation est réalisée en imposant à la turbine en imposant à la turbine un profil de vent variable pendant 15 secondes dont les résultats sont donnés par les graphes suivants :

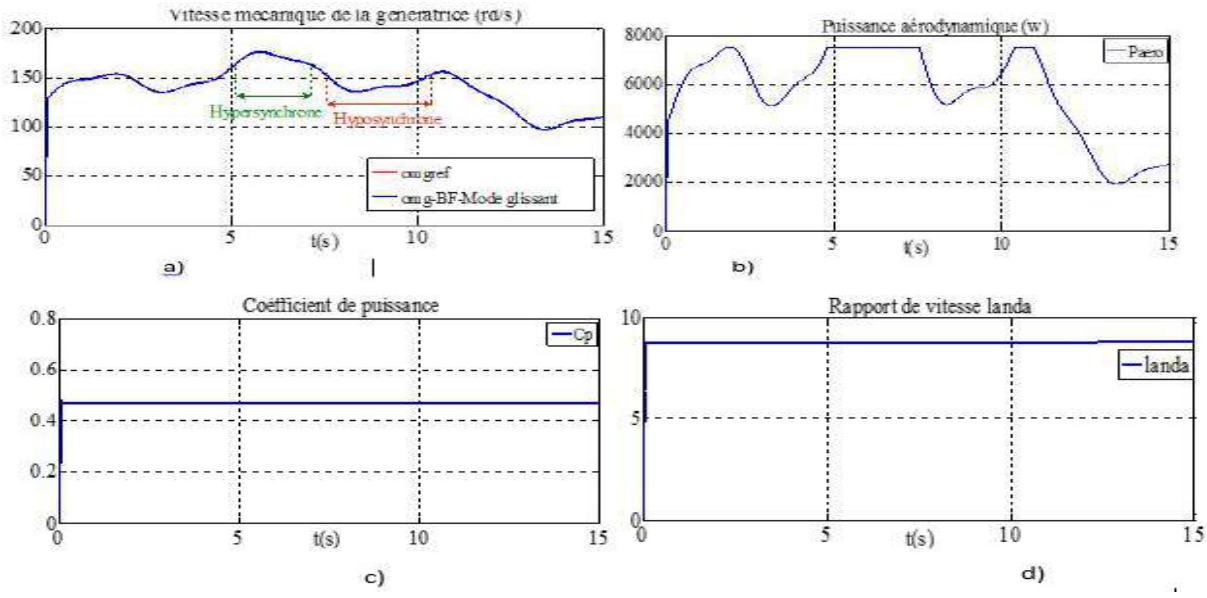


Figure II.22: a)- Vitesse mécanique de la génératrice. b)- Puissance aérodynamique.

c)- Coefficient de puissance. d)- Rapport de vitesse, asservissement avec mode glissant

Interprétation

Les figures II.22 représentent les résultats de simulation par le régulateur mode glissant obtenues par logiciel MATLAB/SIMULINK.

La figure II.22. a) représente le profil de la vitesse de la génératrice, qui est l'image du profil du vent donné dans la figure II.13, lequel est suivi par la courbe de la puissance aérodynamique jusqu'à une valeur de 7500 watt, figure II.22. b). Le coefficient de puissance ou coefficient de performance indique l'efficacité avec laquelle l'éolienne convertit l'énergie mécanique du vent en électricité. Ce tient compte de la limite de Betz. La figure II.22. c) montre que le rapport de vitesse reste constant pour une variation de la vitesse mécanique de la génératrice allant de 100 à 175 rd/s.

a) Régulation à l'aide d'un contrôleur flou.

La commande par logique floue est en pleine expansion. En effet, cette méthode permet d'obtenir une loi de réglage souvent très efficace sans devoir faire des modélisations approfondies.

Par opposition à un régulateur standard, le régulateur par logique floue ne traite pas une relation mathématique bien définie, mais utilise des inférences avec plusieurs règles. Généralement le traitement d'un problème par la logique floue se fait en trois étapes :

- **Fuzzification :** Cette opération permet de passer du domaine réel au domaine flou. Elle consiste à déterminer le degré d'appartenance d'une valeur à un ensemble flou.

- **Inférence :** Donne la relation qu'il existe entre les variables d'entrée (exprimée comme variables linguistiques) et la variable de sortie (également exprimé comme variable linguistique).

Le mécanisme d'inférence le plus couramment utilisé est celui dit «Madmani».

- **Défuzzification :** A la fin de l'inférence, l'ensemble flou de sortie est déterminé mais il n'est pas directement utilisable pour donner une information précise à l'opérateur ou commander un actionneur. Il est nécessaire de passer de «monde flou »au « monde réel », c'est Défuzzification.

➢ ***Résultats de simulation par le régulateur flou.***

La simulation par le régulateur flou a abouti aux résultats donnés par les graphes de la figure II. 23.

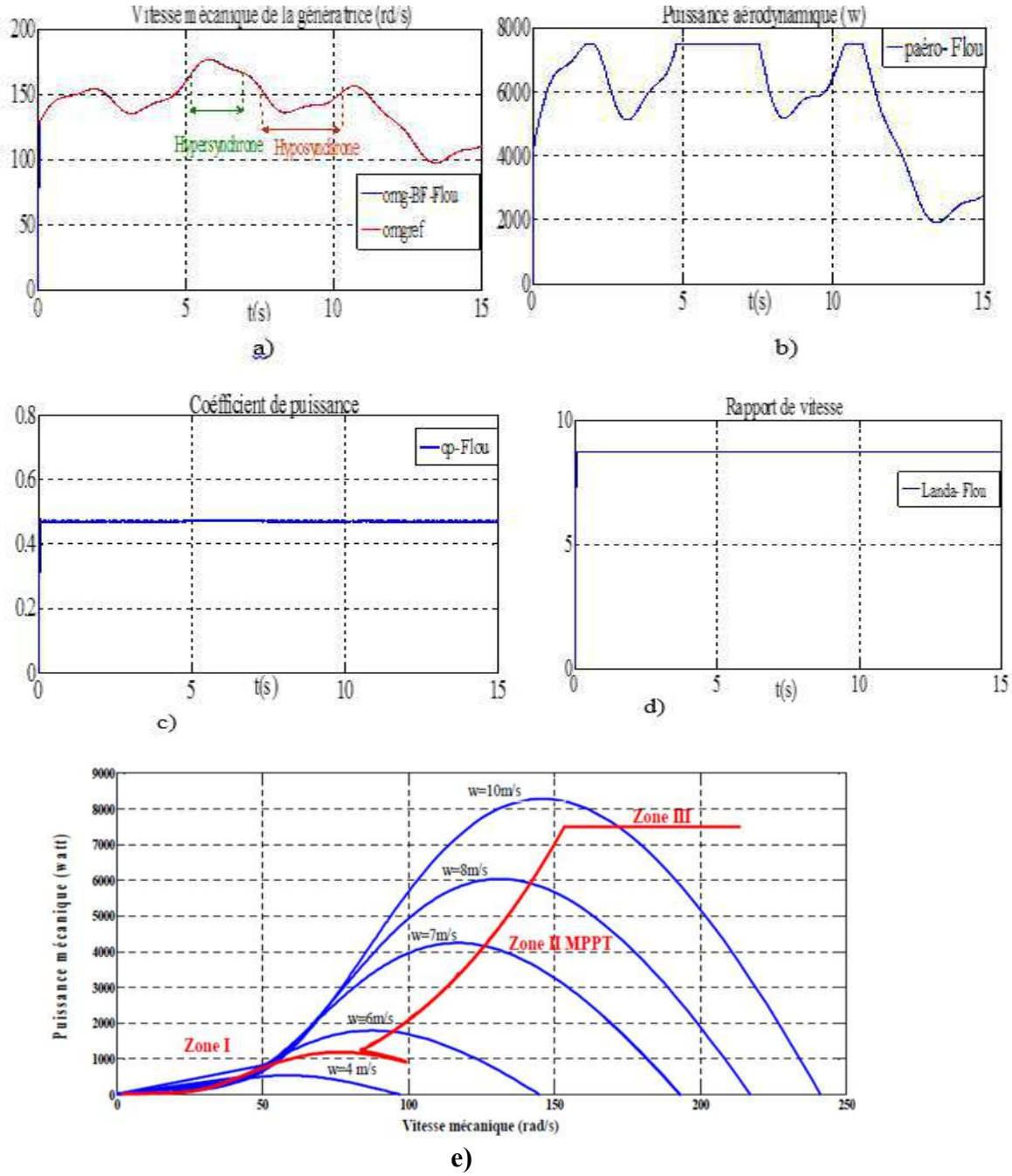


Figure II.23: a)- Vitesse mécanique de la génératrice. b)- Puissance aérodynamique. c)- Coefficient de puissance. d)- Rapport de vitesse, asservissement de vitesse avec le régulateur flou. e)- Caractéristique de la puissance générée.

- la zone I, zone de démarrage de la machine où la vitesse du vent est inférieure à la vitesse de démarrage *VD* de l'éolienne. Dans ce cas, la turbine ne fonctionne pas et ne produit donc pas d'énergie (*Pturbine*=0);
- la zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent *V*.
- la zone III, où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance *Pturbine* fournie reste sensiblement égale à *Pn*;
- la zone IV, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie, lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse maximale admissible par l'éolienne V_{max}. Il faut donc limiter la puissance captée par l'aérogénératrice lorsque le vent devient trop important.

II.5.6.3. Etude comparative

La figure montre la comparaison entre deux stratégies avec la commande par mode glissant et les techniques d'amélioration de cette commande avec le régulateur flou, la turbine est soumise au même profil du vent de la figure II.13

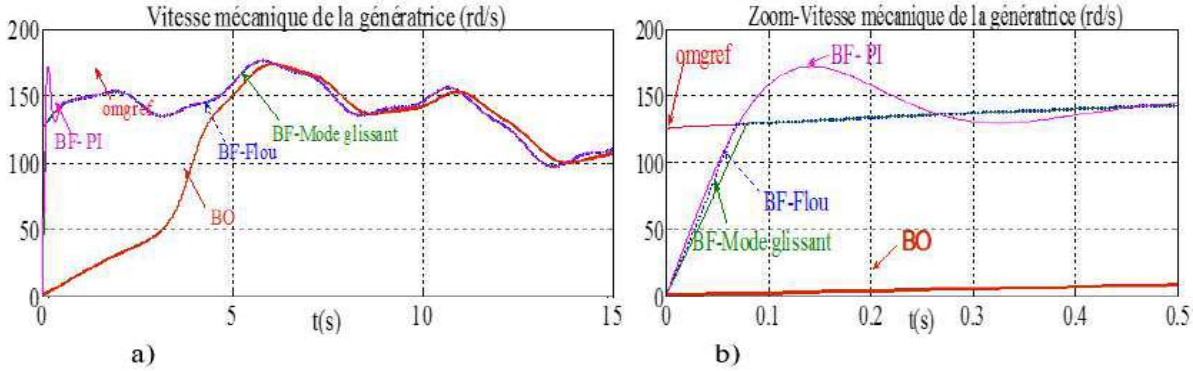


Figure II.24 : a)- Comparaison de la vitesse mécanique entre le régulateur PI, mode glissant et le régulateur flou. b)- Comparaison avec ZOOM.

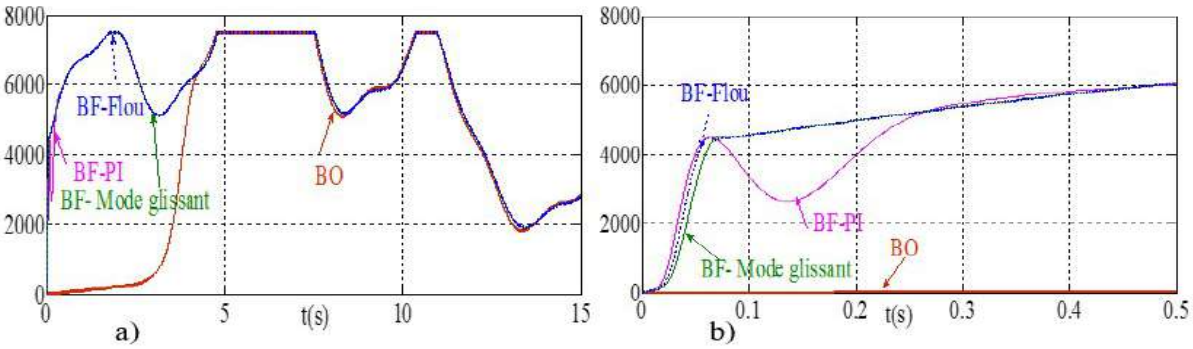


Figure II.25 : a)- Comparaison de la puissance aérodynamique entre le régulateur PI, mode glissant et le régulateur flou. b)- Comparaison avec ZOOM.

Les résultats obtenus par la structure de MPPT avec asservissement de vitesse, dans cet algorithme, l'asservissement de vitesse est réalisé à l'aide des trois types des régulateurs (PI, logique floue et le mode glissant). Les résultats de simulation pour les trois types des régulateurs inhérents à cet algorithme sont montrés respectivement sur les figures II.21, II.22, II.23, ces résultats montrent qu'un meilleur contrôle en boucle fermée de la vitesse est obtenu en régime transitoire et en régime permanent.

Ce contrôle est très dynamique et la puissance aérodynamique obtenue en régime transitoire est donc plus importante. Le coefficient de puissance et le rapport de vitesse sont ajustés à leurs valeurs optimales. Les résultats obtenus montrent les meilleures performances statiques et dynamiques, meilleurs poursuite de la consigne contrôlée (vitesse) et un temps de réponse souhaitable offerts par les trois régulateurs.

Afin de résumer ces résultats obtenus avec l'une ou l'autre des stratégies de contrôle de vitesse (MPPT), les figures II.24.a et b montrent la vitesse mécanique ainsi que sa référence avec les trois régulateurs (B.F) et celle de la stratégie sans asservissement (B.O). Ceux des figures II.25-a, b présentent la puissance aérodynamique.

II.5.6.4. Robustesse vis-à-vis l'inertie

- ✓ ***Avec l'inertie : J=-50%Jn= 0.1563***

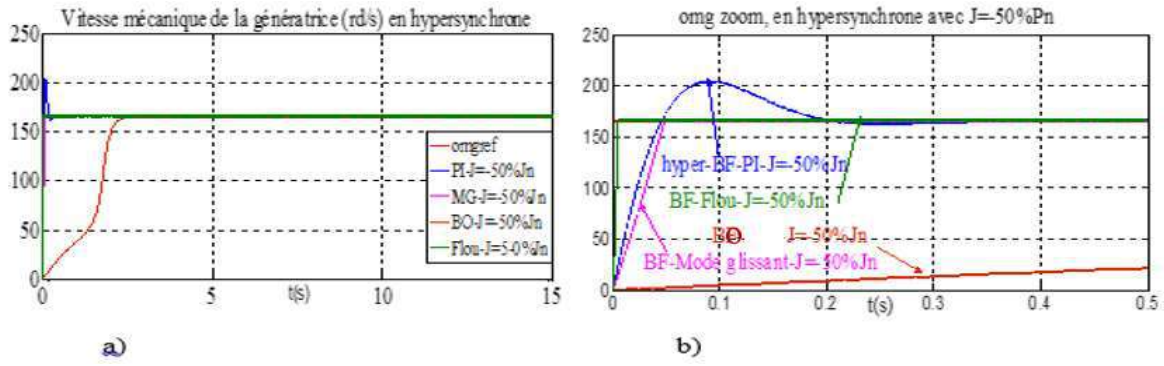


Figure II.26 : a)- Comportement de la vitesse mécanique réglée par trois régulateur, test avec J= -50% Jn b)- Comparaison avec ZOOM

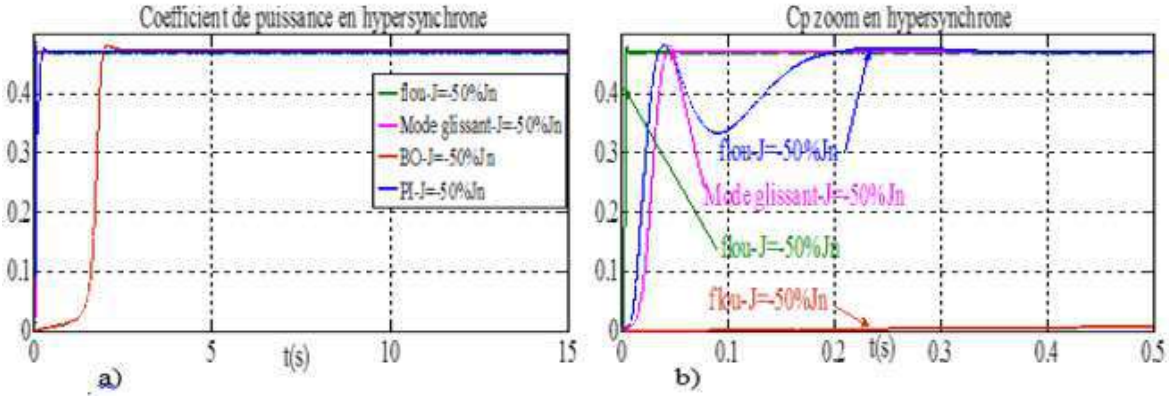


Figure II.27: a)- Coefficient de puissance avec J= -50% Jn b)- Comparaison avec ZOOM

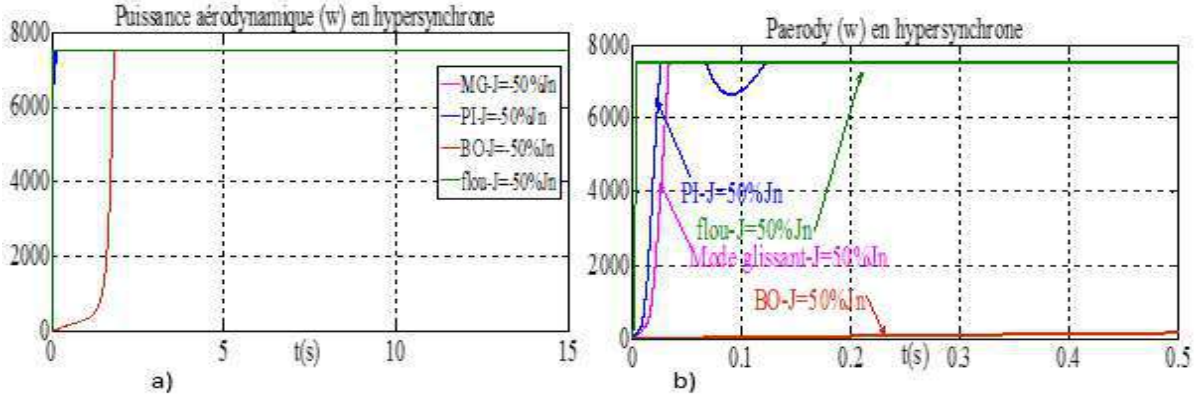


Figure II.28 : a)- Puissance aérodynamique avec J=+-50% Jn b)- Comparaison avec ZOOM.

- ✓ ***Avec l'inertie : J=100%Jn= 0.6250***

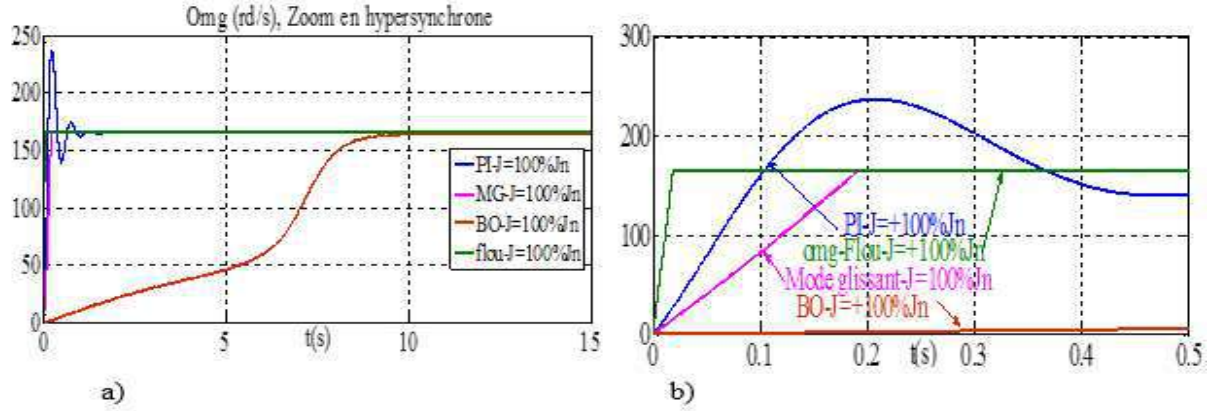


Figure II.29 : a)- Comportement de la vitesse mécanique avec J=+100% Jn b)- Comparaison avec ZOOM.

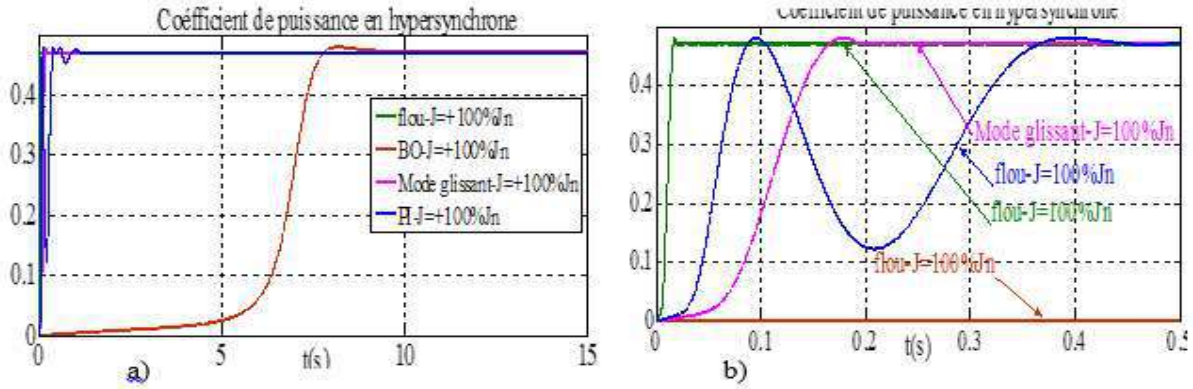


Figure II.30 : a)- Coefficient de puissance avec J=+100% Jn b)- Comparaison avec ZOOM.

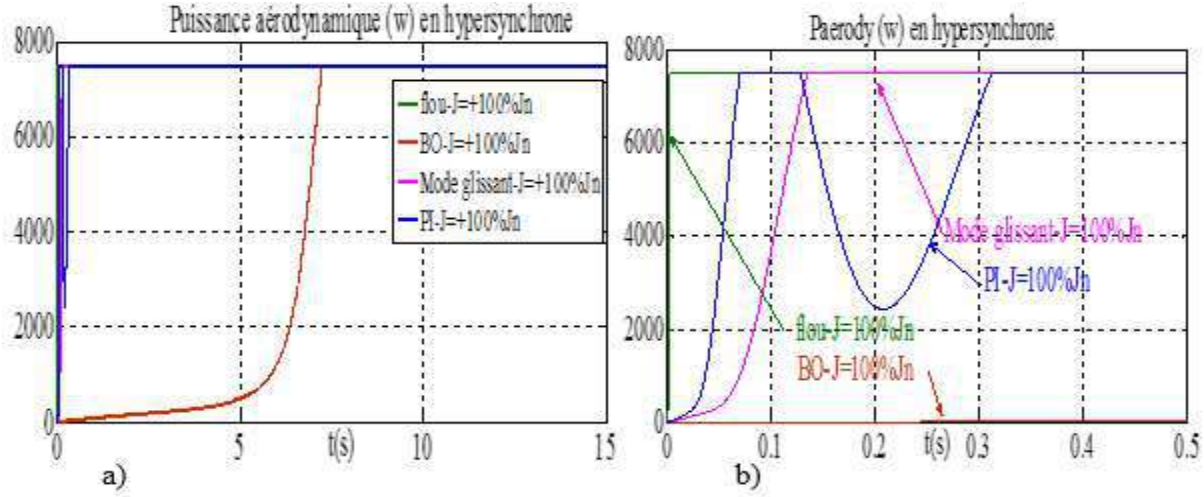


Figure II.30 : a)- Puissance aérodynamique avec J=+-100% Jn b)- Comparaison avec ZOOM.

II.5.6.5. Interprétation des résultats :

Afin de tester la robustesse vis à vis la variation de l'inertie, les résultats obtenus avec les différents types de régulateur à savoir le régulateur PI, mode glissant et flou, on conclut, que la réponse en vitesse obtenue avec le régulateur flou et le mode glissant sont plus rapide que celle obtenue avec un régulateur classique PI. Certes, on remarque que les temps de réponse des différents régulateurs (figures II.25, 26, 27) sont nettement meilleurs que ceux donnés avec une inertie égale à 100% de l'inertie nominale. Aussi, La structure de MPPT commandée par le régulateur flou et le mode glissant sont plus robuste vis-à-vis la variation de l'inertie.

II.6. Conclusion:

Ce chapitre nous a permis de connaitre les différentes technologies des éoliennes et leurs structures. Ainsi, nous avons pu comprendre les systèmes de fonctionnement et de commande. Par la suite, nous avons évoqué le fonctionnement de la MADA dans ses différentes typologies et la modélisation de la machine dans un système éolien de production de l'énergie électrique.

Dans ce chapitre, on a présenté les résultats de simulation pour les différentes configurations de la stratégie de maximisation de puissance, Nous avons conçu une commande (un algorithme) qui nous a permis de maximiser la puissance captée.

Dans le chapitre suivant, on va voir la technique de commande vectorielle. Le choix de La méthode du flux orienté est appliquée depuis quelques années à la MADA et reste la méthode la plus répondue.

III. Modélisation de l'ensemble MADA-Convertisseur

III.1 Introduction

La machine asynchrone à double alimentation (MADA), avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte. De ce fait, La théorie générale a pour but de traiter une large gamme de machines de façon unifiée, en les ramenant à un modèle unique dit "machine primitive". Ce modèle est caractérisé par un système d'axes en quadratures indicé (d,q). La mise en équations nous impose certaines hypothèses simplificatrices, dans le but d'établir un modèle simple. [32, 33] .

III.2. Modélisation de la machine asynchrone double alimentation (MADA)

III.2.1. Modélisation côté machine

Le système éolien à vitesse variable étudié dans ce mémoire, basé sur une MADA, est illustré à la Figure III-4, La turbine, via un multiplicateur, entraine la MADA, laquelle est raccordée au réseau électrique directement par le stator mais également au travers de convertisseurs statiques triphasés à IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) par le rotor, Celui-ci est muni de systèmes bagues/balais. Ces Convertisseurs Côtés MADA et Réseau, notés respectivement CCM et CCR dans la suite de ce mémoire, sont commandés en Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI).

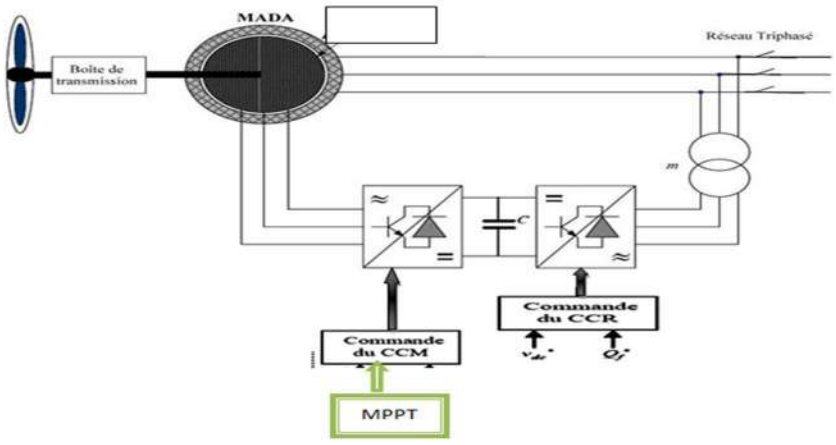


Figure III.1. Chaine de conversion éolienne.

➢ ***Hypothèses simplificatrices :***

- entrefer constant,

- effet d'encochage et pertes ferromagnétiques négligeables,
- l'influence de l'effet de peau et de l'échauffement négligeable,
- distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices dans l'entrefer,
- circuit magnétique parfaitement feuilleté et non saturé (perméabilité magnétique constante).Ceci entraîne [34] :
- un champ magnétique sinusoïdal,
- l'additivité vectorielle des flux,
- des inductances propres constantes.

La représentation schématique de la MAS dans l'espace électrique est donnée sur la figure III.2.

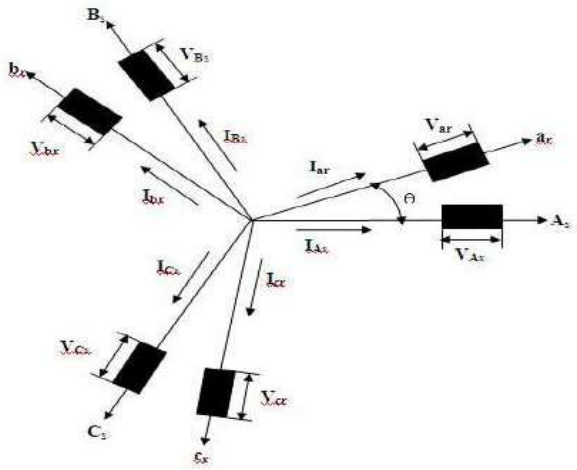


Figure III.2 Représentation schématique de la machine asynchrone.

➢ ***Mise en équations de la machine asynchrone triphasée***

En tenant compte des hypothèses simplificatrices et en adoptant la convention de signe moteur, les expressions générales de la machine exprimées en fonction des flux et des courants sont définies comme suit:

$$\begin{cases} V_S = [R_S][I_S] + \dfrac{d}{dt}[\varphi_S] = [R_S][I_S] + \dfrac{d}{dt}([I_{SS}][I_S] + [M_{Sr}][I_r]) \\ V_r = [R_r][I_r] + \dfrac{d}{dt}[\varphi_r] = [R_r][I_r] + \dfrac{d}{dt}([I_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s]) \end{cases} \quad \text{(III.1)}$$

Avec: Vs, Vr : Tensions statoriques et rotoriques ;

is, ir : Courants statoriques et rotoriques ;

Rs, Rr : Résistances des enroulements statoriques et rotoriques ;

φs, φr : Flux statoriques et rotoriques ;

Ls, Lr : Inductances de fuites des statoriques et rotoriques ;

Ms, Mr : inductances mutuelles.

Les relations entre flux et courants s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} [\boldsymbol{\varphi_s}] = ([\boldsymbol{I_{SS}}][\boldsymbol{I_S}] + [\boldsymbol{M_{Sr}}][\boldsymbol{I_r}]) \\ [\boldsymbol{\varphi_r}] = ([\boldsymbol{I_{rr}}][\boldsymbol{I_r}] + [\boldsymbol{M_{rs}}][\boldsymbol{I_s}]) \end{cases} \quad \text{(III.2)}$$

Sous forme matricielle on a :

$$[V_S] = \begin{pmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{pmatrix} ; \quad [I_S] = \begin{pmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{pmatrix} ; \quad [\varphi_S] = \begin{pmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{pmatrix} \quad \text{(III.3)}$$

$$[R_s] = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{pmatrix} ; \quad [L_s] = \begin{pmatrix} L_s & M_S & M_S \\ M_S & L_s & M_S \\ M_S & M_S & L_s \end{pmatrix} \quad \text{(III.4)}$$

$$[V_r] = \begin{pmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{pmatrix} ; \quad [I_r] = \begin{pmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{pmatrix} ; \quad [\varphi_r] = \begin{pmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{pmatrix} \quad \text{(III.5)}$$

$$[\mathrm{R_r}] = \begin{pmatrix} \mathrm{R_r} & 0 & 0 \\ 0 & \mathrm{R_r} & 0 \\ 0 & 0 & \mathrm{R_r} \end{pmatrix}; \quad [\mathrm{L_s}] = \begin{pmatrix} \mathrm{L_r} & \mathrm{M_r} & \mathrm{M_r} \\ \mathrm{M_r} & \mathrm{L_r} & \mathrm{M_S} \\ \mathrm{M_r} & \mathrm{M_r} & \mathrm{M_r} \end{pmatrix} \quad \text{(III.6)}$$

Si on désigne par θ l'écart angulaire compté dans le sens de rotation entre les phases du stator et du rotor, et M la mutuelle quand les axes des deux enroulements considérés coïncident [35] .

$$[M_{sr}] = [M_{sr}]^T = M_{sr} \begin{pmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3} & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3} & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3} & \cos\theta \end{pmatrix} \quad \text{(III.7)}$$

Le couple électromagnétique est donné par l'expression générale suivante [31].

$$\mathrm{C_{em}} = [\mathrm{I}]^{\mathrm{T}} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\theta}([\mathrm{M_{sr}}][\mathrm{I_{sr}}]) = \mathrm{P}(\varphi_{\mathrm{ds}}\mathrm{I_{qr}}) = \mathrm{P}\frac{\mathrm{M}}{\mathrm{L_S}}(\varphi_{\mathrm{ds}}\mathrm{I_{qr}} - \varphi_{\mathrm{qs}}\mathrm{I_{dr}}) \quad \text{(III.8)}$$

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

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J}(C_{em} - C_r - f_r\Omega) \quad \text{(III.9)}$$

Où : Ω : Vitesse de rotation de la machine ;

J : moment d'inertie de l'ensemble machine et turbine éolienne ;

fr : coefficient de frottement.

Nous aboutissons ainsi à un système de six équations différentielles et une expression du couple dont certains coefficients font intervenir des fonctions sinusoïdales dues au mouvement de rotation du rotor, d'où la complexité de la résolution analytique.

Afin de surmonter cette difficulté, nous sommes amenés à utiliser la transformation de variables de type de Park.

➢ ***Modèle de la MADA dans le repère PARK***

Afin de pouvoir travailler au niveau de l'algorithme de commande avec des grandeurs électriques constantes tout en réduisant leur nombre, on introduit une transformation de variables supplémentaires. Cette transformation est appelée transformation de Park [9]. La méthode consiste à transformer le système d'enroulements triphasés statoriques d'axes (a, b, c) en un système équivalent à deux enroulements biphasés sur les axes (*d*, q) ; en raison de la possibilité de créer une même force magnétomotrice indifféremment par des systèmes de courants diphasés ou triphasés d'espace [1].

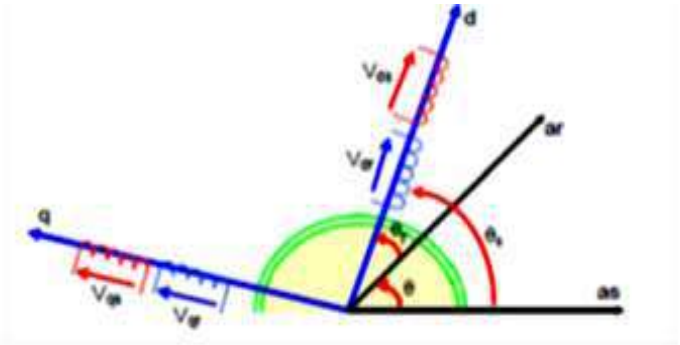


Figure III.3. Repère référentiel de Park

Le passage aux composantes de Park est donné par la matrice de rotation suivante :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} cos\,\theta & cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -sin\,\theta & -sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \qquad \text{(III.10)}$$

Les grandeurs (courants, tensions et flux) transformées, du système diphasé sont égales à la matrice de Park multipliée par les grandeurs du système triphasé :

$$\begin{cases} \left[V_S = [P(\theta_S)]\left[V_{S(abc)}\right]\right] \\ \left[V_{r(dq)} = [P(\theta_r - \theta)]\left[V_{r(abc)}\right]\right] \end{cases} \quad \text{(III.11)}$$

$$\begin{cases} \left[I_S = [P(\theta_S)]\left[I_{S(abc)}\right]\right] \\ \left[I_{r(dq)} = [P(\theta_r - \theta)]\left[I_{r(abc)}\right]\right] \end{cases} \quad \text{(III.12)}$$

$$\left.\begin{cases} \left[\varphi_S = [P(\theta_S)]\left[\varphi_{S(abc)}\right]\right] \\ \left[\varphi_{r(dq)} = [P(\theta_r - \theta)]\left[\varphi_{r(abc)}\right]\right] \end{cases}\right\} \quad \text{(III.13)}$$

Dans le repère (d, q) les équations du flux s'expriment par :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_S I_{ds} + M I_{ds} \\ \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \end{cases}; \qquad \begin{cases} \varphi_{ds} = L_S I_{ds} + M I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_S I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad \text{(III.14)}$$

Avec : $L_S = l_S M_S$: Inductance cyclique statorique ;

$L_r = l_r - M_r$: Inductance cyclique rotorique ;

$M = \frac{2}{3} M_{sr}$: Mutuelle cyclique entre rotor-stator.

En remplaçant les équations des flux dans les équations des tensions, on aura :

$$\begin{cases} \boldsymbol{V_{ds} = R_s . i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s . \Phi_{qs}} \\ \boldsymbol{V_{dr} = R_r . i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) . \Phi_{qr}} \\ \boldsymbol{V_{qs} = R_s . i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s . \Phi_{ds}} \\ \boldsymbol{V_{qr} = R_r . i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) . \Phi_{dr}} \end{cases} \quad \textit{(III.15)}$$

L'expression générale du couple électromagnétique dans le repère d-q devient :

$$j \frac{d}{dt} \Omega = C_{em} - C_r - f_r \Omega \quad \text{(III.16)}$$

Où : $$C_{em} = P \frac{M}{L_S} (\varphi_{ds} I_{qr} - \varphi_{qs} I_{dr}) \quad \text{(III.17)}$$

Les résultats de simulation sous MATLAB/SIMULINK, issus de ces transformations et caractérisant les performances de la turbine éolienne, sont montrés dans les graphes de la figure III.4.

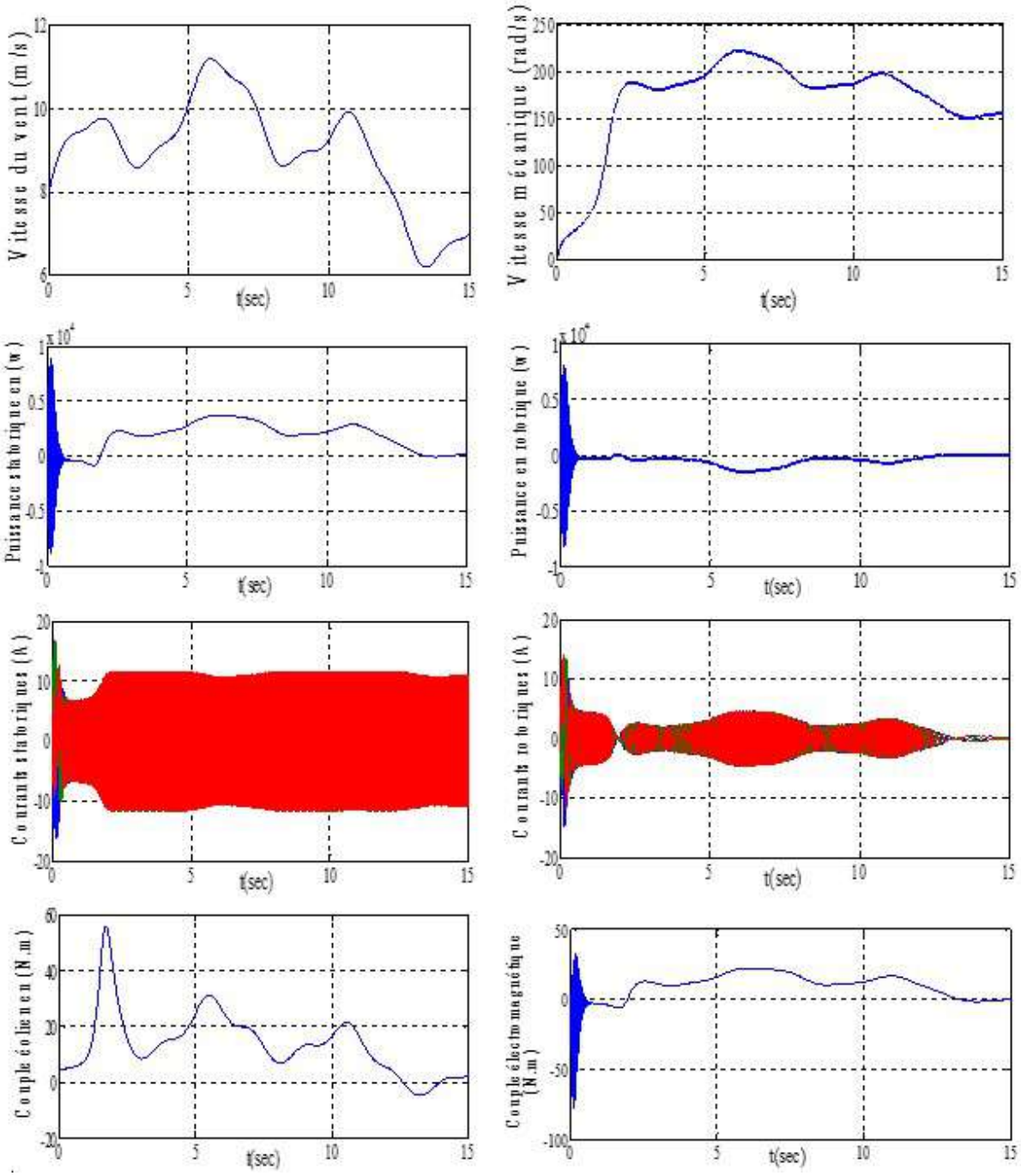


Figure III.4. Performances de la turbine éolienne

III.2.1.1. Principe de la commande vectorielle de la MADA

Afin de découpler la commande du couple et celle du flux de cette machine, plusieurs stratégies de commande ont été proposées pour obtenir des performances souhaitées. Ces

stratégies de commande consistent souvent à rendre le comportement électromagnétique de cette machine similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée. Cette similitude est rendue possible par l'emploi de la commande vectorielle élaborée à partir du modèle de Park.

La modulation vectorielle permet de suivre le vecteur de tension de référence et non pas chaque tension de référence de phase séparément [36]. Son principe est identique à celui de la stratégie triangulo–sinusoïdale à échantillonnage régulier avec injection de l'harmonique trois [37-39]».

Le principe de la commande vectorielle consiste à orienter une des composantes du flux statorique suivant un axe de référence tournant à la vitesse du synchronisme, c'est-à-dire sur l'axe « d » (Figure III.5.).

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

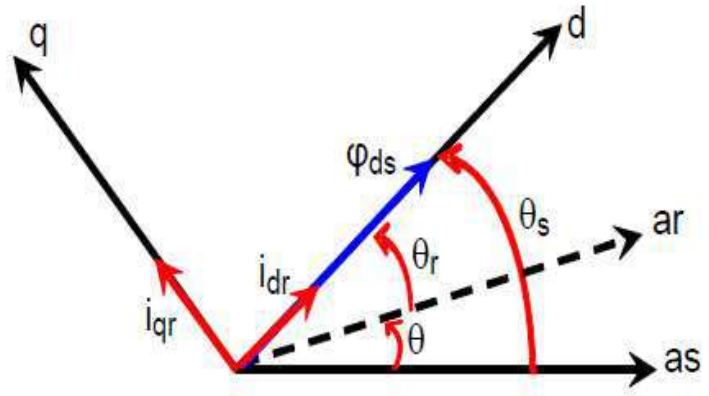


Figure III.5.Représentation spatiale de l'orientation du flux statorique

Procédé d'orientation de flux

La méthode du flux orienté est basée sur le choix du repère de référence. Par le choix du repère lié au champ tournant, il découle que le flux à orienter (statorique, rotorique ou d'entrefer) doit coïncider avec l'axe « d ». Afin d'obtenir un couple maximal, nous devons imposer l'une des conditions suivantes :

Orientation du flux rotorique :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \varphi_r \\ \varphi_{qr} = 0 \end{cases} \quad \text{(III.18)}$$

Orientation du flux statorique

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \varphi_s \\ \varphi_{qs} = 0 \end{cases} \quad \text{(III.19)}$$

Orientation du flux magnétisant

$$\begin{cases} \varphi_{dm} = \varphi_m \\ \varphi_{qm} = 0 \end{cases} \quad \text{(III.20)}$$

Le référentiel lié au champ tournant statorique est choisi dans notre travail.

➢ *Modèle de la GADA avec orientation de flux statorique*

Le modèle de la GADA s'écrit dans le repère de Park lié au champ tournant comme suit :

- Equation du flux statorique

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad \text{(III.23)}$$

- Equation du couple électromagnétique

$$C_{em} = P \frac{M}{L_s} \varphi_{ds} I_{qr} \quad \text{(III.24)}$$

Le courant *Iqr* sera rendu variable par action sur la tension *Vqr***,** le flux peut être contrôlé par le réglage du courant *Idr*. Ce dernier est rendu variable par action sur la tension Vdr [40].

L'hypothèse réaliste des machines de moyenne et forte puissance utilisées dans l'énergie éolienne suppose la résistance du bobinage statorique Rs négligeable, les équations des tensions statoriques deviennent alors:

$$\begin{cases} V_{qs} = V_s = \omega_s \varphi_{ds} \\ 0 = V_{ds} \end{cases} \quad \text{(III.25)}$$

A partir de l'équation (III-23), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} I_{ds} = -\frac{M}{L_s} I_{dr} + \frac{\varphi_s}{L_s} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad \text{(III.26)}$$

➢ *Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques :*

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

$$\begin{cases} P = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q = V_{qs} I_{ds} + V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad \text{(III-27)}$$

En appliquant les hypothèses simplificatrices à l'équation on obtient

$$\begin{cases} P = V_s I_{qs} \\ Q = V_s I_{ds} \end{cases} \quad \text{(III.28)}$$

Ou à partir de glissement :

$$\begin{cases} P_r = g.P_S \\ Q_r = g.Q_S \end{cases} \quad \text{(III.29)}$$

En remplaçant *ids* et *iqs* par leurs expressions données nous obtenons :

$$\begin{cases} P = -V_S \dfrac{M}{L_S} I_{qr} \\ Q = -V_s \dfrac{\varphi_S}{L_s} - V_s \dfrac{M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad \text{(III.30)}$$

En remplaçant $\varphi_s = \frac{V_S}{\omega_S}$ dans l'équation (III.30), l'expression de la puissance réactive Q devient alors :

$$Q = \frac{1}{\omega_s L_s} V_S^2 - V_S \frac{M}{L_S} I_{dr} \quad \text{(III.31)}$$

Compte tenu du repère choisi et des approximations faites et si l'on considère l'inductance magnétisante *M* comme constante, le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe *q* et la puissance réactive au courant rotorique d'axe *d* à la constante *Vs /ωss L* près imposée par le réseau.

- *Relation entre tension statorique et courant rotorique*

En remplaçant les courants statoriques par leur expression dans l'équation (III-30) on obtient:

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_S}\right) I_{dr} + \dfrac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{qr} = \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_S}\right) I_{qr} \end{cases} \quad \text{(III.32)}$$

La relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliquées à la machine s'écrivent :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s}\right) \dfrac{d}{dt} I_{dr} - g\omega_s \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s}\right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s}\right) \dfrac{d}{dt} I_{qr} + g\omega_s \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s}\right) I_{dr} + g\omega_s \dfrac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad \text{(III-33)}$$

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

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - gW_s\left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s}\right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + gW_s\left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s}\right) I_{dr} + gW_s \dfrac{MV_s}{w_s L_s} \end{cases} \quad \text{(III-34)}$$

Où : *Vdr* et *Vqr* sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus.

$L_r - \frac{M^2}{L_s}$ est le terme de couplage entre les deux axes ;

$gW_s \frac{MV_s}{w_s L_s}$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation.

Le schéma bloc du système électrique à réguler (Figure III.6).

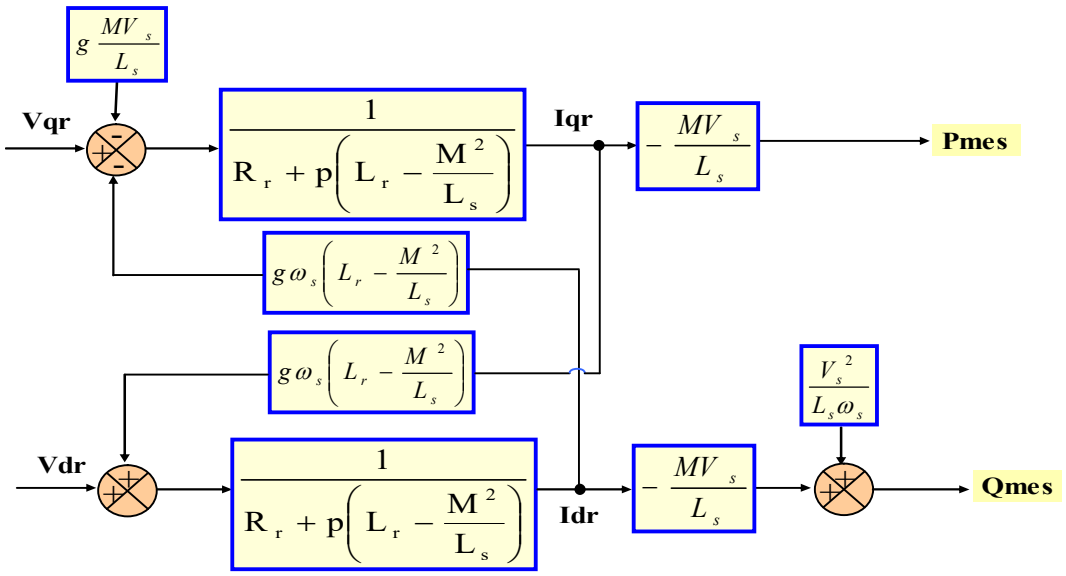


Figure III.6. Schéma bloc de la MADA à réguler

Ce schéma fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactive statoriques. Ce qui nous permet de mettre en place une commande vectorielle étant donné qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe q rotorique et la puissance réactive pour l'axe d rotoriques. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator, de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimale [41]. Ainsi, il apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine.

III.2.1.2. Commande vectorielle directe.

Cette méthode consiste à négliger les termes de couplage et de mettre en place un régulateur (PI) indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive (Figure III.7.). Cette méthode est dite méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.

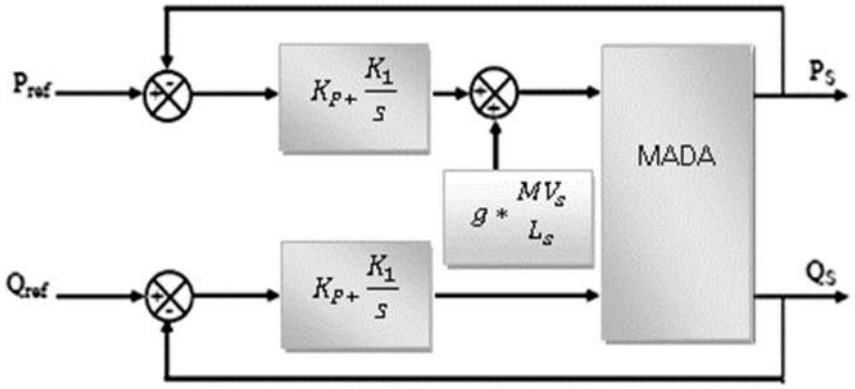


Figure III.7.Schéma bloc de la commande de puissance directe

III.2.1.3. Commande vectorielle indirecte.

Cette méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en utilisant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. En combinant les différentes équations des flux, des tensions rotoriques, des courants et des puissances, nous pouvons exprimer les tensions en fonction des puissances. On reproduit ainsi le schéma bloc du système en sens inverse en aboutissant à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens et qui contient tous les éléments du schéma bloc de la *MADA*. On part donc de la puissance statorique en fonction des courants rotoriques et des expressions des tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques, on trouve ainsi:

$$\begin{cases} V_{dr} = g\omega_s \dfrac{(L_r \dfrac{-M^2}{L_S})}{\dfrac{MV_S}{L_S}} p - \left(\dfrac{R_r + (L_r \dfrac{-M^2}{L_S})}{\dfrac{MV_S}{L_S}} p \right). Q + \left(\dfrac{R_r V_s}{\omega_s M} + \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_S} \right) \dfrac{V_S}{\omega_s} \right. \\ V_{qr} = -\left(\dfrac{R_r + (L_r \dfrac{-M^2}{L_S})}{\dfrac{MV_S}{L_S}} p \right) P - g\omega_s \dfrac{(L_r \dfrac{-M^2}{L_S})}{\dfrac{MV_S}{L_S}} Q + g\omega_s \left(\left(L_r - \dfrac{M^2}{L_S} \right) \dfrac{V_S}{\omega_s l} \right. \end{cases} \quad \text{(III.35)}$$

Pour obtenir 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 (Figure III.8.).

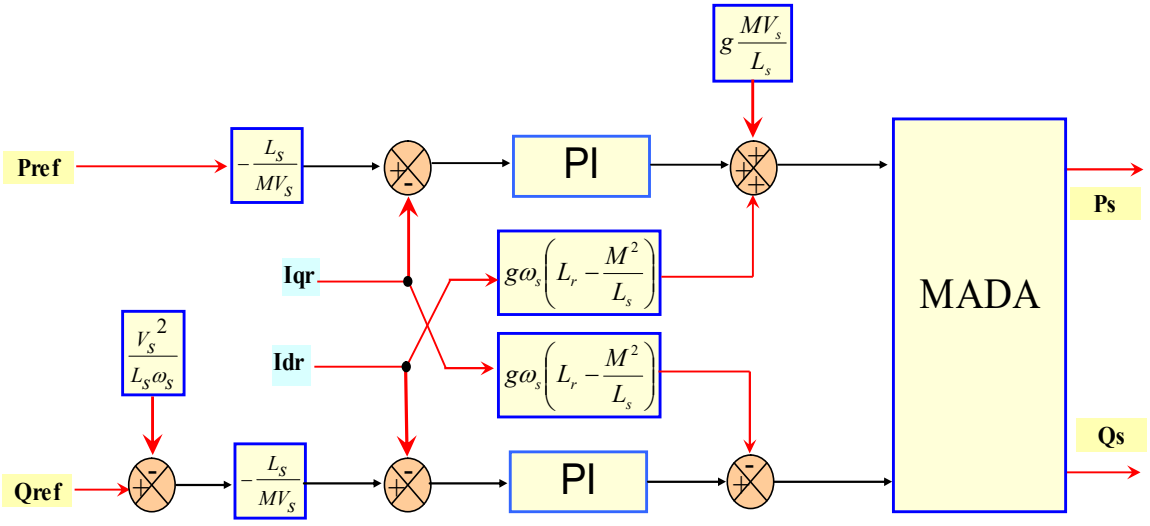


Figure III.8. Schéma bloc de la commande de puissance indirecte.

III .2.1.4. Modélisation du fonctionnement de l'onduleur à deux niveaux

Le rotor de la MADA est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux constitué de trois bras indépendants, équipé de dispositifs semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. Les commandes des interrupteurs d'un bras sont complémentaires. Chaque interrupteur comprend un transistor IGBT et une diode montée en antiparallèle. Pour faciliter la modélisation du convertisseur de puissance, on suppose que les interrupteurs semi-conducteurs soient parfaits figure III.9.

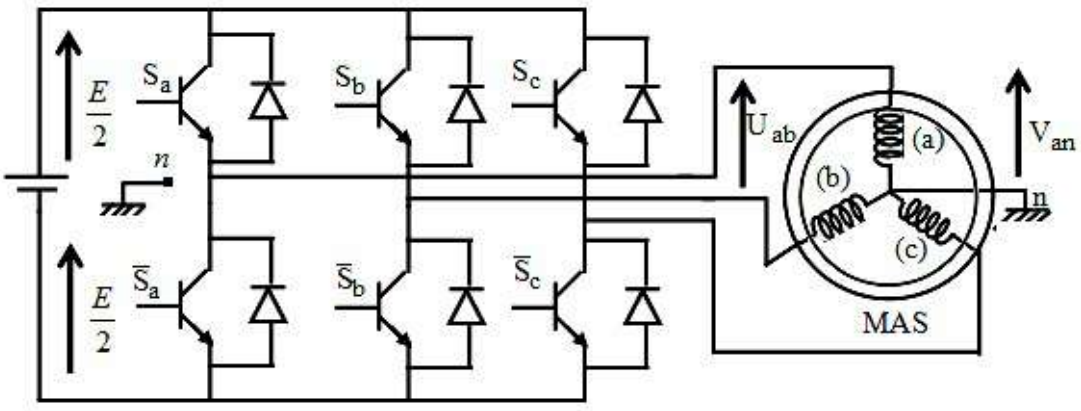


Figure III.9. Onduleur de tension 2-niveaux alimentant une charge triphasée.

Pour chaque bras, il y'a donc deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés comme une grandeur boolienne :

Sa, b, c =1 : Interrupteur du demi –bras haut (a, b ou c) fermé.

Sa, b, c = 0 : Interrupteur du demi –bras bas (a, b ou c) fermé.

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 cela les variables Sa, Sb, Sc en fonction de l'état des commutations dans les trois branches du convertisseur.

- **Bras1** Sa= 0 $siS1\ estenpositionoffetS4\ està\ \ on$
  Sa= 1 $siS1\ estenpositiononetS4\ està\ \ off$
- **Bras2** Sb= 0 $siS2\ estenpositionoffetS5\ està\ \ on$
  Sb= 1 $siS2\ estenpositiononetS5\ està\ \ off$
- **Bras3** Sc= 0 $siS3\ estenpositionoffetS6\ està\ on$
  Sc= 1 $siS3\ estenpositionon\ etS6\ està\ off$

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

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{dc}(S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{dc}(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{dc}(S_c - S_a) \end{cases} \quad \text{(III.36)}$$

Si on prend en compte l'équilibre des tensions :

$$Ua + Ub + UC = 0 \quad \text{(III.37)}$$

On en déduit les expressions des tensions simples par rapport aux tensions composées comme suit :

$$\begin{cases} U_a = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{cb}) \\ U_b = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ U_c = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad \text{(III.38)}$$

D'où on obtient :

$$\begin{cases} U_a = \frac{V_{dc}}{3}(2S_a - S_b - S_c) \\ U_b = \frac{V_{dc}}{3}(S_a - 2S_b - S_c) \\ U_c = \frac{V_{dc}}{3}(S_a - S_b - 2S_c) \end{cases} \quad \text{(III.39)}$$

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

- *Principe de la MLI.*

La technique MLI consiste à former chaque alternance de la tension de sortie de l'onduleur par un ensemble d'impulsions sous forme de créneaux rectangulaires de longueurs modulées de telle sorte à rapprocher cette tension à la sinusoïde. La MLI permet de reconstituer ces tensions, ou courants à partir d'une source de fréquence et à tension fixe. Le réglage est effectué par les durées d'ouverture ou de fermeture des interrupteurs et par les séquences de fonctionnement. Cette stratégie est caractérisée par deux paramètres :

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 :

$$m = \frac{f_p}{f} \tag{III.40}$$

$f_p = fréquence\ de\ porteuse.$

$f = fréquence\ de\ la\ tension\ de\ référence.$

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

Le choix d'un indice de modulation « m » multiple de trois nous permet d'éliminer les

$$r = \frac{V_{ref}}{V_p} \tag{III.41}$$

harmoniques d'ordre trois qui représente un handicap de cette technique. Cependant, le taux de modulation « r » varie suivant la référence imposée.

- *Stratégie de commande MLI triangulo-sinusoïdale :*

Le principe de cette stratégie consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante généralement sinusoïdale, et une onde de modulation ou porteuses, généralement triangulaire ou en dent de scie, d'où l'appellation triangulo–sinusoïdale.

• L'indice de modulation « *m* » défini comme étant le rapport de fréquence de la porteuse (f_p)à celle de la tension de référence (f) : [m=$\frac{f_p}{f}$]

• Le taux de modulation ou coefficient de réglage en tension « *r* » est défini comme étant le rapport de l'amplitude de la référence (*Vm*) à celle de la porteuse: (V_{pm}) : [r $=\frac{V_m}{U_{pm}}$]

La modulation est dite *synchrone* quand « *m* » est entier, et *asynchrone* dans le cas contraire. En modulation synchrone, si l'indice de modulation *m* est impair le développement en série de fourrier de la tension de sortie ne comporte alors que des harmoniques impairs. Si l'indice *m* est pair, on trouve la composante continue ainsi que les harmoniques pairs et impairs. Si le maximum de la référence correspond à un pic de la porteuse, on dit que le calage est optimal et la tension bénéficie d'une double symétrie par rapport au quart et au milieu de la période.

$$\begin{cases} V_{ref1} = V_m \sin(wt) \\ V_{ref2} = V_m \sin\left(wt - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{ref3} = V_m \sin\left(wt - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad \text{(III.42)}$$

$$V_p(t) = \begin{cases} U_c\left(2\frac{t}{T_p} - 1\right) & 0 \le t \le T_p \\ U_c\left(-2\frac{t}{T_p} + 3\right) & 0 \le t \le T_p \end{cases} \quad \text{(III.43)}$$

L'algorithme de commande de cette stratégie est comme suit :

$$\begin{cases} V_{ref\,k} \ge U_{p1} \Longrightarrow V_{k1} = U_c \\ V_{ref\,k} \ge U_{p1} \Longrightarrow V_{k1} = -U_c \end{cases} \quad \text{(III.44)}$$

Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse, $f_p = m.f$. En triphasé, les trois références sinusoïdales sont déphasées de $\frac{2\pi}{3}$ à la même fréquence f.

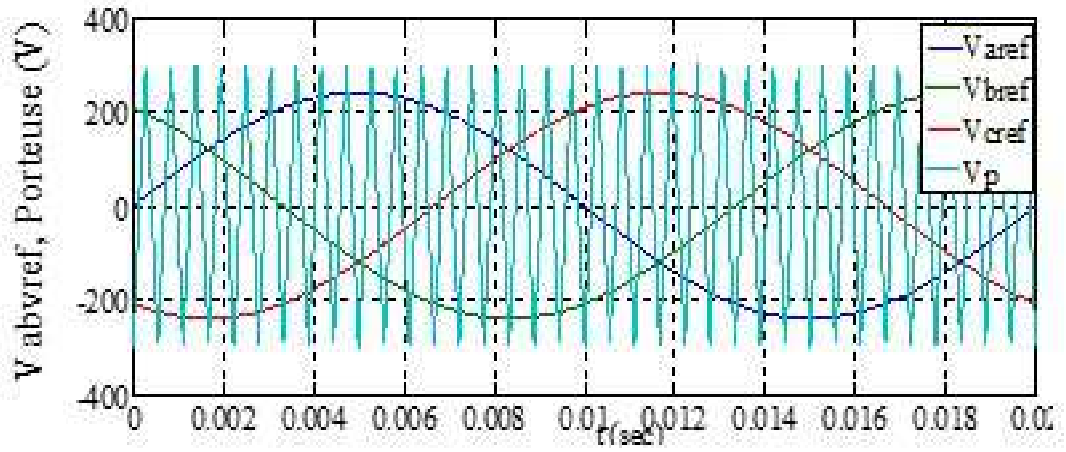


Figure III.10. Différents signaux de la stratégie triangulo-sinusoïdale.

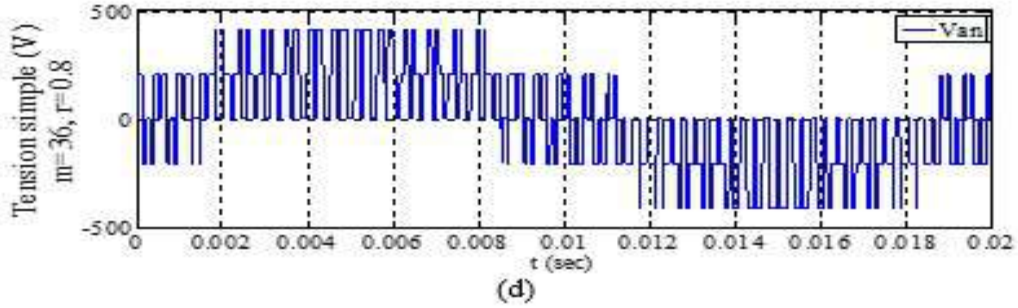


Figure III.11. Tension simple de l'onduleur à deux niveaux commandé par la stratégie triangulo-sinusoïdale.

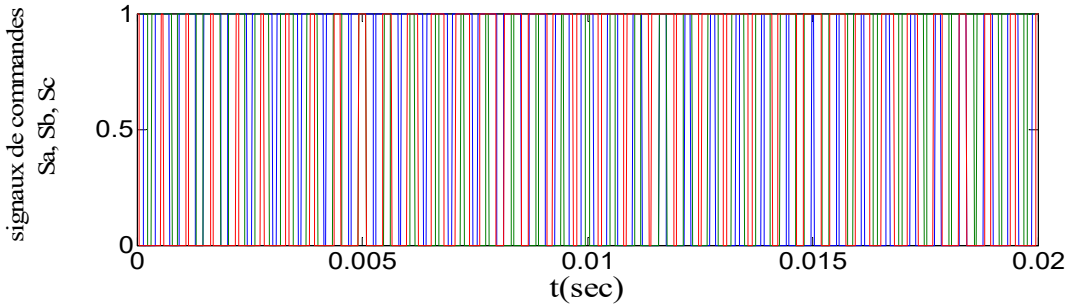


Figure III.12. Signaux de commandes de l'onduleur pour m=36 , r=0.8

III.2.1.5. Modèle du bus continu

La tension aux bornes du condensateur du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant circulant dans le condensateur Figure III.13.

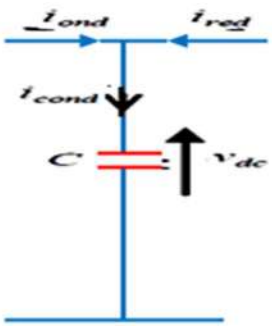


Figure III.13. Modèle de bus continu

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} i_{ond} \qquad \text{(III.45)}$$

Le courant dans le condensateur est issu d'un nœud à partir duquel circulent deux courants modulés par le CCM et le CCR:

icond= ired– iond (III.46)

Simulation et interprétation des résultats :

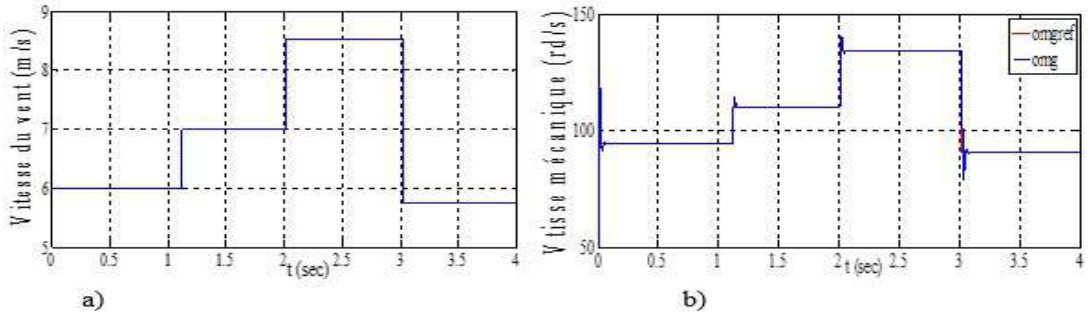


Figure III.14. : a) Vitesse du vent, b) Vitesse mécanique de la MADA.

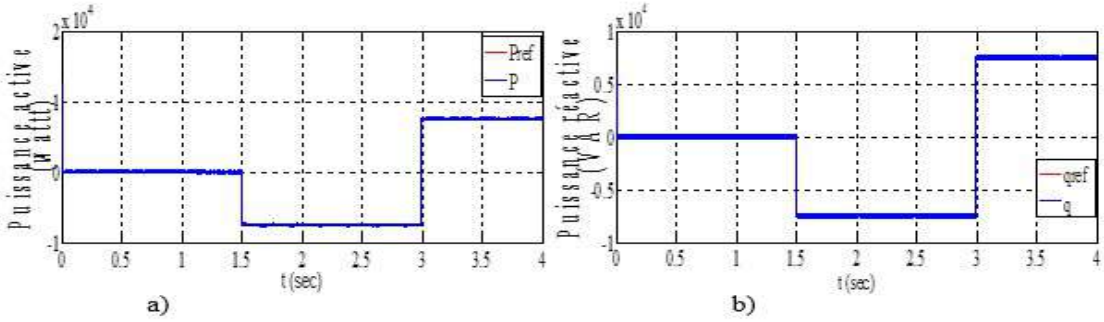


Figure III.15. **:** a) Puissance active de la MADA, b) Puissance réactive.

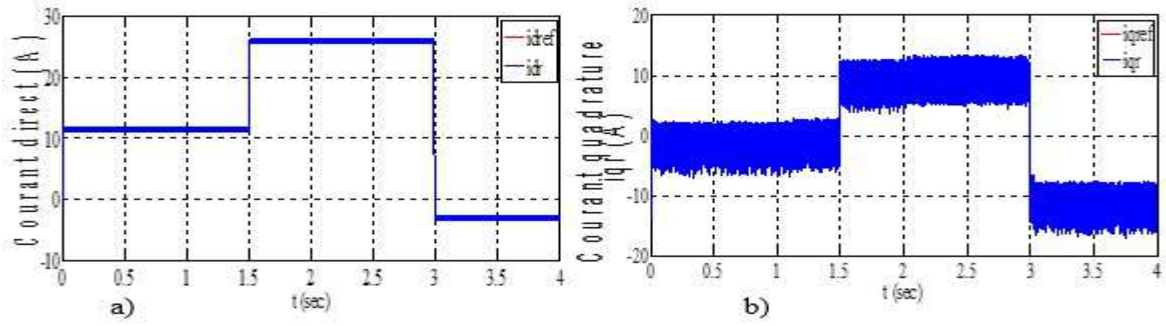


Figure III.16: a) Courant direct du rotor, b) Courant en quadrature rotorique.

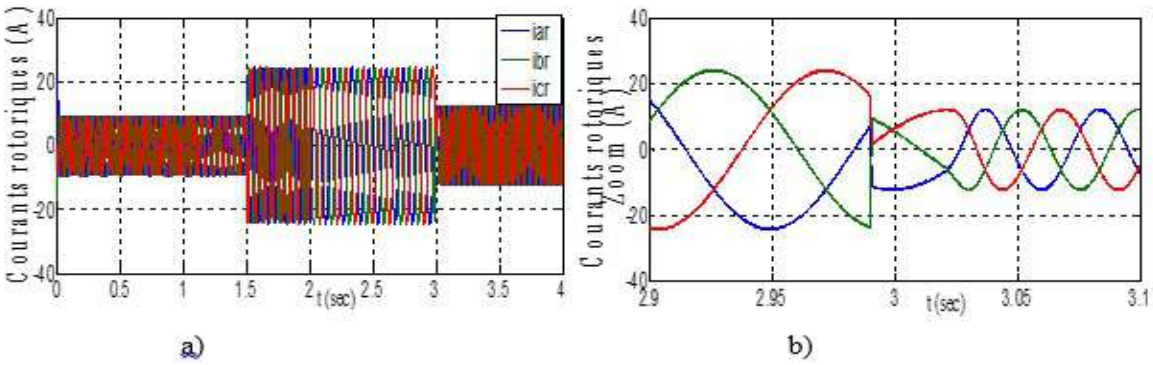


Figure III.17 : a) Courants de phases rotorique, b) Courants de phases zoom.

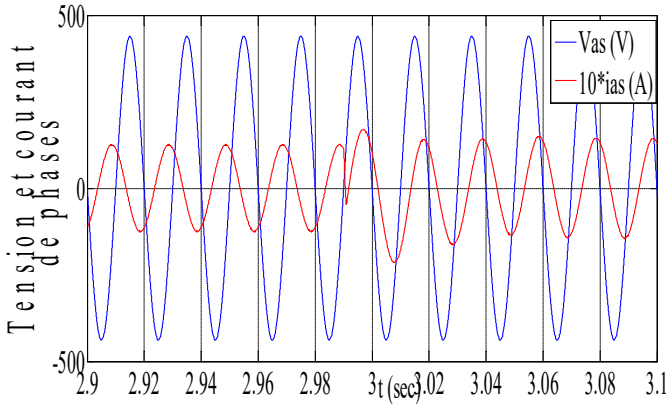


Figure III.18: Tension et courant de phase.

III.2.1.6 : Interprétation des résultats :

La simulation a été faite en imposant les puissances active et réactive de référence P_{ref},Q_{ref} Les résultats de simulation montrent le bon fonctionnement de l'algorithmes de commande. On constate que les puissances active et réactive suivent parfaitement leurs références avec moins de fluctuation lors de la variation de charge. La puissance réactive est toujours maintenue nulle. Le courant du réseau triphasé alimentant le redresseur de la chaîne,

suit bien sa référence imposée par la boucle de tension. Le facteur de puissance de ce réseau est pratiquement unitaire (tension et courant du réseau sont en phase).

III.2.2. Modélisation d'une chaine de conversion éolienne côté réseaux

Dans cette partie, nous nous intéressons à la modélisation de la connexion du CCR, avec le réseau électrique via le filtre RL. La Figure III.19 illustre l'ensemble de la liaison au réseau électrique, constituée du bus continu, du CCR et du filtre d'entrée.

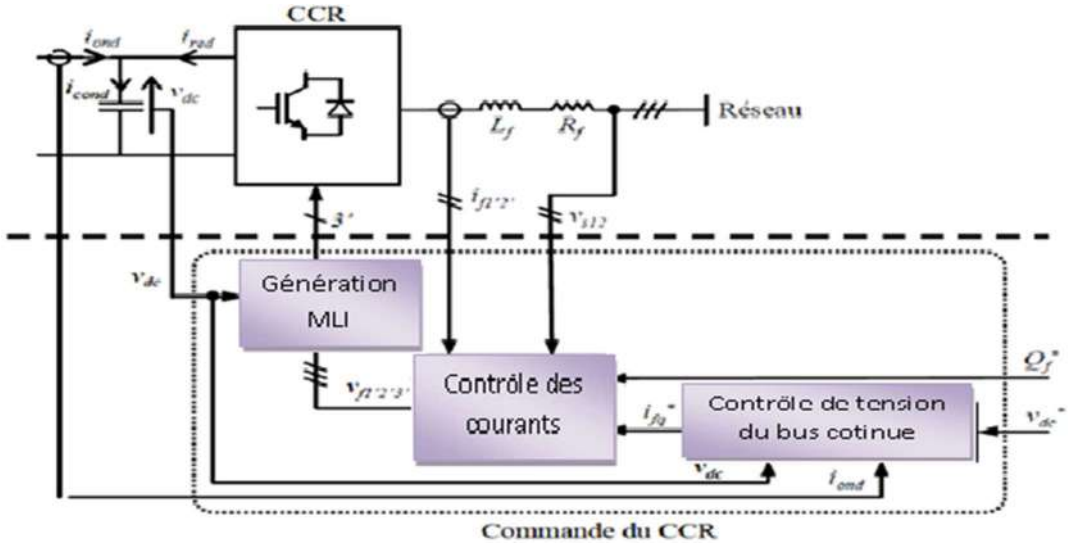


Figure III.19. Connexion du CCR au réseau électrique.

Avec :

- i_{ond}, i_{red}: respectivement les courants modulés par le CCM et le CCR,
- i_{cond}: le courant traversant le condensateur,
- V_{dc}: la tension du bus continu (tension aux bornes du condensateur),
- $R_f$et L_f: respectivement la résistance et l'inductance du filtre RL,
- V_{fk}': les tensions simples modulées par le CCR ($k \in \{1, 2, 3\}$),
- V_{sk}: les tensions simples du réseau électrique,
- i_{f1}', i_{f2}' : les courants circulant à travers le filtre RL.

III.2.2.1. Modèle de contrôle des courants transitant dans le filtre RL

Le CCR est connecté entre le bus continu et le réseau électrique via un filtre *(R_f)*. Ce convertisseur a deux rôles : maintenir la tension du bus continu constante, quelque soient les variations au rotor et maintenir un facteur de puissance unitaire au point de connexion avec le réseau électrique.

Le convertisseur est commandé de manière à contrôler les courants transitant dans le filtre RL. Une commande vectorielle dans le repère de Park est réalisée en utilisant la même orientation du repère dq que pour la commande vectorielle de la MADA.

Nous pouvons écrire dans le repère triphasé selon les lois de Kirchoff les expressions suivantes :

$$\begin{cases} V_{f1} = -R_f i_{f1} - L_f \dfrac{di_{f1}}{dt} + v_{s1} \\ V_{f2} = -R_f i_{f2} - L_f \dfrac{di_{f2}}{dt} + v_{s2} \\ V_{f3} = -R_f i_{f3} - L_f \dfrac{di_{f3}}{dt} + v_{s3} \end{cases} \quad \text{(III.47)}$$

Avec le repère *dq* lié au champ tournant statorique choisi, les équations deviennent :

$$\begin{cases} V_{fd} = -R_f i_{fd} - L_f \dfrac{di_{fd}}{dt} + e_{fd} \\ V_{fq} = -R_f i_{fq} - L_f \dfrac{di_{fq}}{dt} + e_{fq} \end{cases} \quad \text{(III.48)}$$

Avec :

$$\begin{cases} e_{fd} = W_s L_f i_{fq} \\ e_{fq} = -W_s L_f i_{fq} + V_{sq} \end{cases} \quad \text{(III.49)}$$

Le modèle de la liaison du CCR au réseau dans le repère dq suivant le champ tournant statorique nous montre que nous pouvons mettre en place un contrôle des courants circulant dans le filtre RL (figure III.19) étant donné, qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec pour chacun son propre régulateur. Les grandeurs de référence pour ces régulateurs seront les courants dans le filtre RL d'axes *dq*.

Nous modélisons le convertisseur par un gain Gc , avec Gc égal à 1. Le schéma bloc des boucles de régulation des courants dans le filtre d'axes dq est :

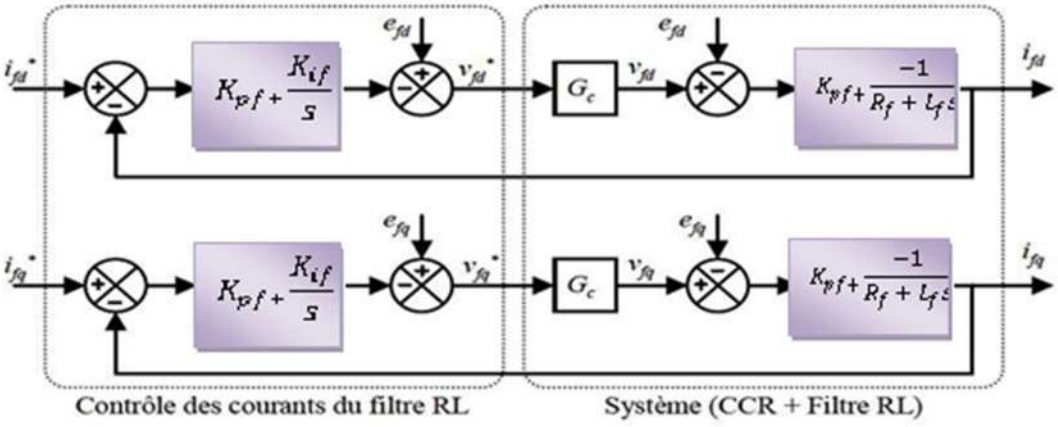


Figure III.20. Schéma bloc des boucles de régulation des courants dans le filtre d'axes dq

Les puissances active et réactive générées par le CCR sont définies par :

$$\begin{cases} P_f = V_{sd} i_{fd} + V_{sq} i_{fq} \\ Q_f = V_{sq} I_{fd} - V_{sd} i_{fq} \end{cases} \quad \text{(III.50)}$$

En tenant compte des hypothèses prises précédemment (Vsd=0) et en négligeant la résistance Rf nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} P_f = V_{sq} i_{fq} \\ Q_f = V_{sq} i_{fd} \end{cases}$$

$$I_{df}^{*} = \frac{Q_f^{*}}{V_{qs}} \quad \text{(III.51)}$$

$$I_{qf}^{*} = \frac{P_f^{*}}{V_{qs}} \quad \text{(III.52)}$$

La composante directe du courant est utilisée pour contrôler la puissance réactive au point de connexion du CCR avec le réseau électrique. La composante en quadrature, quant à elle, est utilisée pour réguler la tension du bus continu. Avec ce principe, une puissance réactive de référence nulle peut alors être imposée (Q_{f^*} = 0 VAr).

III.2.2.2. Contrôle du convertisseur coté réseau CCR par hystérésis

La stratégie de cette commande est basée sur l'asservissement de la valeur moyenne des tensions de sortie, le but de l'asservissement est de déterminer les courants de référence du réseau appliqués aux comparateurs à hystérésis, l'algorithme de cette stratégie est définie comme suite :

$if: \varepsilon_{ki} > 0\ alors\ S_k = 1 \implies F_{k1} = F_{k2} = 1\ et\ F_{k3} = F_{k4} = 0\ avec: k = \{a, b, c\}$

$else: \varepsilon_{ki} < 0\ alors\ S_k = 0 \implies F_{k1} = F_{k2} = 0\ et\ F_{k3} = F_{k4} = 1$

$\varepsilon_{ki} = i_{kf} - i_{kfref}$

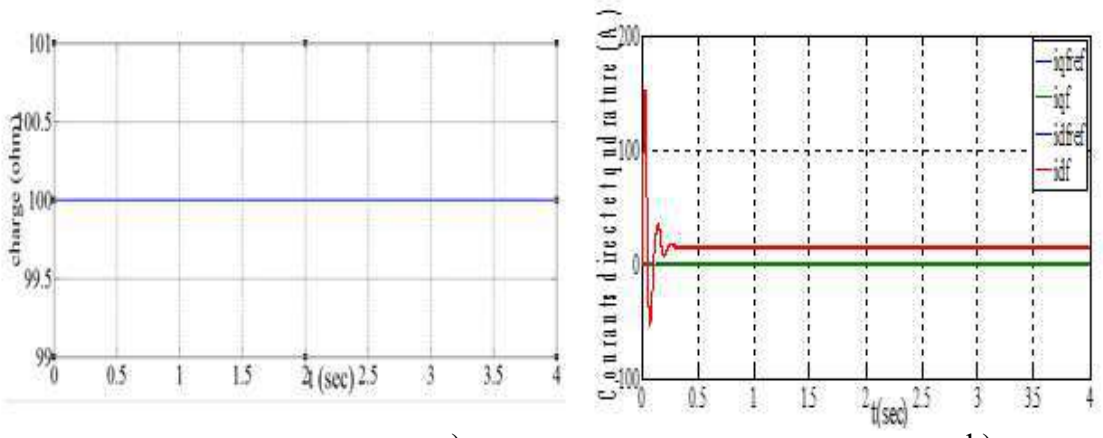
ε_{ki} : L'erreur du courant dans le bras k du convertisseur.

III.2.2.3. Simulation et interprétation des résultats

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats de simulation coté réseau, nous avons contrôlé les courants à l'aide des régulateurs flous tandis que la tension du bus continu est contrôlée par le contrôleur PI.

La machine asynchrone à double alimentation, est alimentée par un réseau triphasé équilibré, puis par des onduleurs de tensions à MLI.

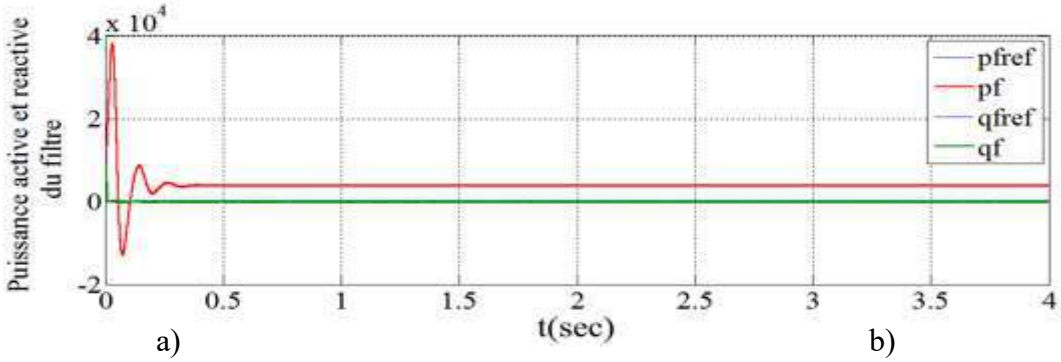
Afin de simuler le comportement de la MADA, nous avons opté pour le logiciel MATLAB/SIMULINK, les résultats de simulation obtenus sont donnés par les figures ci-après.



a) b)

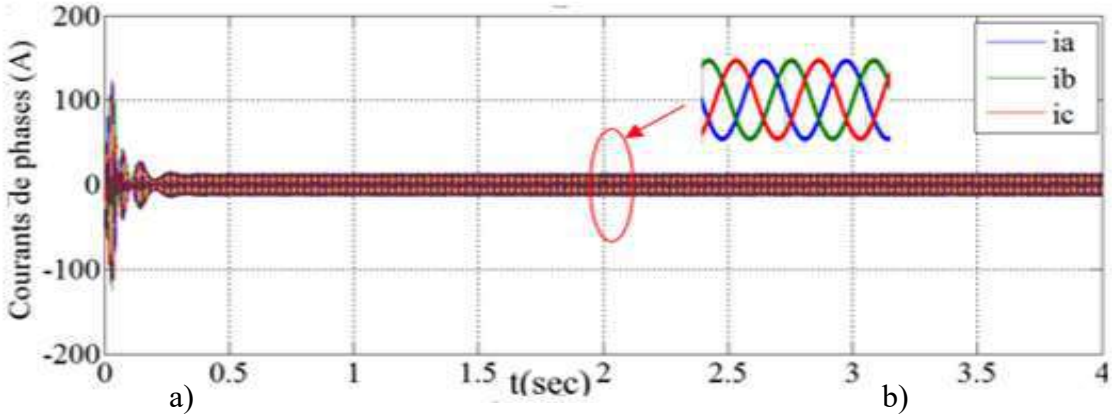
➢ Avec Résistance de charge=100 ohm

Figure III.21 : a) Charge, b) Courants direct etquadrature.



a) b)

Figure III.22 : puissances active et réactive du filtre.



a) b)

Figure III.23 : Courants de phases et Zoom.

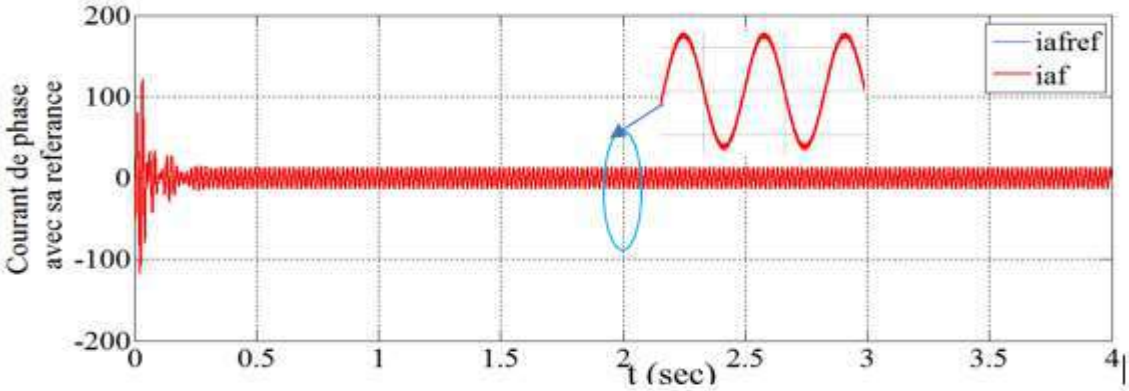
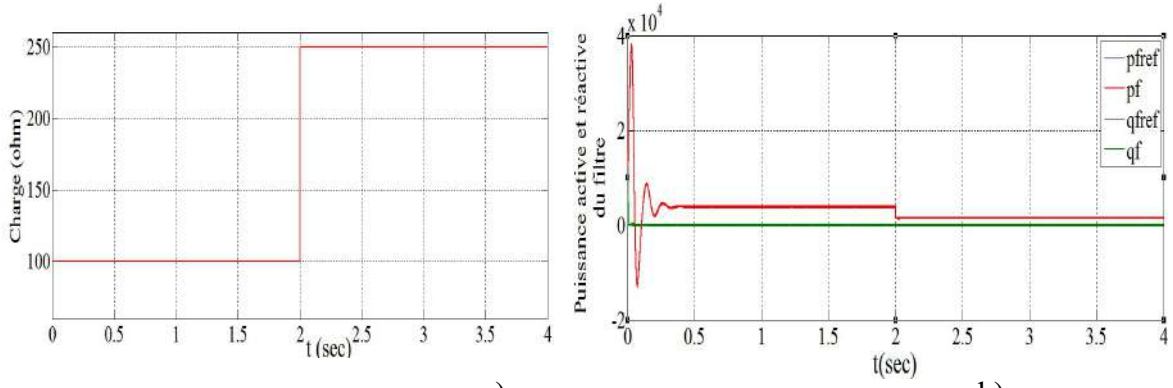


Figure III.24 : Courant d'une phase avec Zoom.

➢ Avec Résistance de charge variable.



a) b)

Figure III.25 : a) variation de la charge, b) variation des puissances active et réactive.

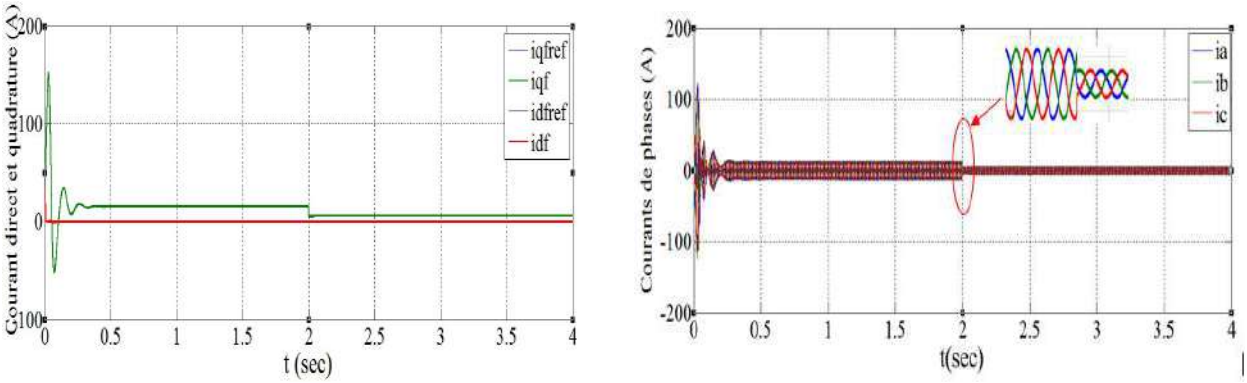


Figure III.26 :a) courant direct et en quadrature, b) courants de phases avec ZOOM

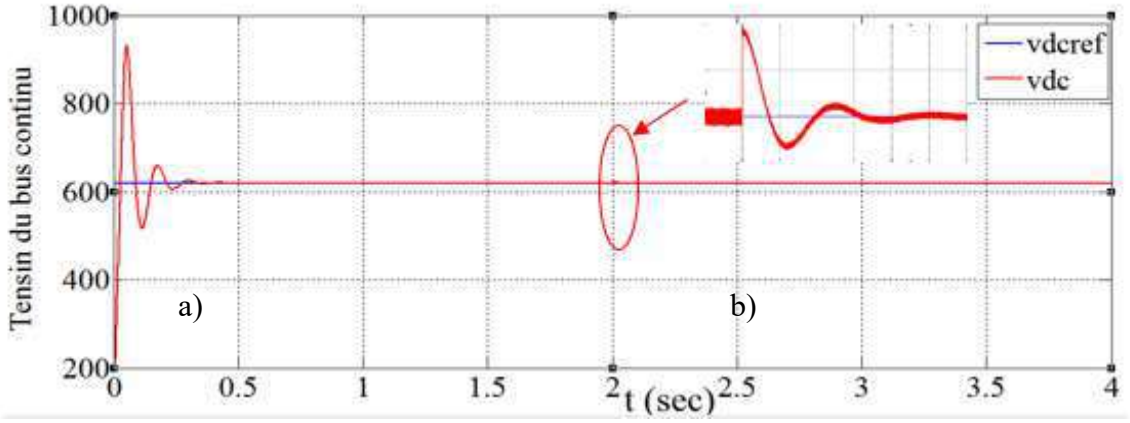


Figure III.27. Tension du bus continu avec un ZOOM.

➢ **Interprétation :**

La simulation du convertisseur coté réseau, en imposant une résistance de charge constante, nous a révélé que les différents paramètres électrique suivent parfaitement leurs valeurs de référence.

En deuxième lieu et en imposant au convertisseur une résistance de charge variable, on aperçoit que le régulateur fonctionne étroitement avec toutes les variations de la demande en courant ou en puissance active, la puissance réactive, quant à elle reste nulle satisfaisant à sa consigne ou valeur de référence. La tension du bus continu reste pratiquement constance, on aperçoit qu'un pic de l'ordre de un volt pour une tension de 620 Volts et une variation de résistance variant de 100 à 250 Ohms.

III.2.3. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons établi le modèle de la machine à l'aide de ses équations électriques dans le système d'axe d-q lié au synchronisme. Nous avons aussi développé la méthode de commande vectorielle en puissance de la machine à savoir la commande directe et indirecte. Effectivement, nous avons pu voir que la commande indirecte nous permet, en association avec le bouclage des puissances, d'avoir un système performant et robuste. Elle est certes plus complexe à mettre en œuvre, mais permettra d'avoir un fonctionnement optimal du système de génération électrique en minimisant les éventuels soucis liés aux variations des paramètres de la machine et du système éolien.

IV. La commande SVM de la MADA coté réseau

IV.1. Introduction :

Les redresseurs à diodes où à thyristors prennent aujourd'hui une place de plus en plus importante sur le marché. Ils sont utilisés généralement comme étage d'entrée des onduleurs dans les entrainements à vitesse variable utilisant des machines asynchrones à double alimentation comme générateurs. Cependant, le redresseur est une charge non linéaire par nature, donc il injecte des harmoniques de basses fréquences et d'amplitudes généralement non négligeables dans le réseau d'alimentation provoquant ainsi des problèmes. L'utilisation des filtres passifs peut résoudre ce problème, mais un filtre passif mal conçu provoque le phénomène de résonance, donc l'amplification des harmoniques. Pour cette raison cette solution est bien souvent écartée. L'apparition et le perfectionnement de nouveaux composants de puissance commandables à l'ouverture et à la fermeture tels que GTO et IGBT ainsi que les progrès accomplis dans le domaine de la microinformatique (DSP, microcontrôleurs puissants et rapides), ont permis la conception de nouveaux convertisseurs fiables, rapides et puissants utilisés comme étages d'entrée entre le réseau électrique et le convertisseur coté rotor. Ce genre de convertisseurs est connu sous le nom de redresseurs à absorption sinusoïdale ou redresseurs à MLI, qui font l'objectif de ce travail.

Le redresseur à MLI a le même principe de fonctionnement qu'un hacheur élévateur. La tension de sortie d'un redresseur à MLI est toujours supérieure à sa tension d'entrée, pour cela il faut régler cette tension de bus continu suite à la nécessité de la charge utilisée. Pour accomplir cette tâche, la tension du bus continu est mesurée et comparée avec une référence désirée, le signal d'erreur produit de cette comparaison est employé pour commuter les six interrupteurs du redresseur à la fermeture et à l'ouverture. La commande MLI vectorielle utilisée non seulement peut contrôler la puissance active, mais également la puissance réactive, ce type de redresseur permet la correction du facteur de puissance. En outre, les formes d'onde des courants cotés générateur peuvent être maintenu comme presque sinusoïdales, ce qui réduit la distorsion du réseau.

Comme la charge varie, la robustesse doit être une caractéristique très importante pour les régulateurs du redresseur. Toutefois, les variables contrôlées sont couplés les unes aux autres et la conception des régulateurs nécessite des connaissances empiriques. Plusieurs méthodes de découplage et de contrôle, similaires à l'orientation du champ (vecteur) dans les

machines à courant alternatif, offrent d'excellentes performances tant en réponse de tension et faibles distorsions harmoniques. Dans cette approche, les courants sont contrôlés, offrant un contrôle rapide et dynamique du facteur de puissance. Les résultats de simulation sont présentés pour des variations de charge. [45].

IV.2. Onduleur de Tension MLI Vectorielle (SVPWM):

Un onduleur triphasé à deux niveaux de tension possède six cellules de commutation donnant huit configurations possibles. Ces huit état de commutation peuvent s'exprimer dans le plan α-β par 8 vecteurs de tensions (notés de V0 à V7) ; parmi ces vecteurs, deux sont nuls, les autres étant équi-répartis tous les 60°.

Pour MLI vectorielle (SVPWM Space vector modulation en anglais), on représente par seul vecteur les trois tensions sinusoïdales de sortie que l'on désire. On approxime au mieux ce vecteur pendant chaque intervalle de modulation en agissant sur la commande des trois jeux d'interrupteur complémentaires. Cette MLI vectorielle ne s'appuie pas sur des calculs séparés pour chaque bras de l'onduleur mais sur la détermination d'un vecteur de contrôle global approximé sur une période de modulation *Te* [5-7].

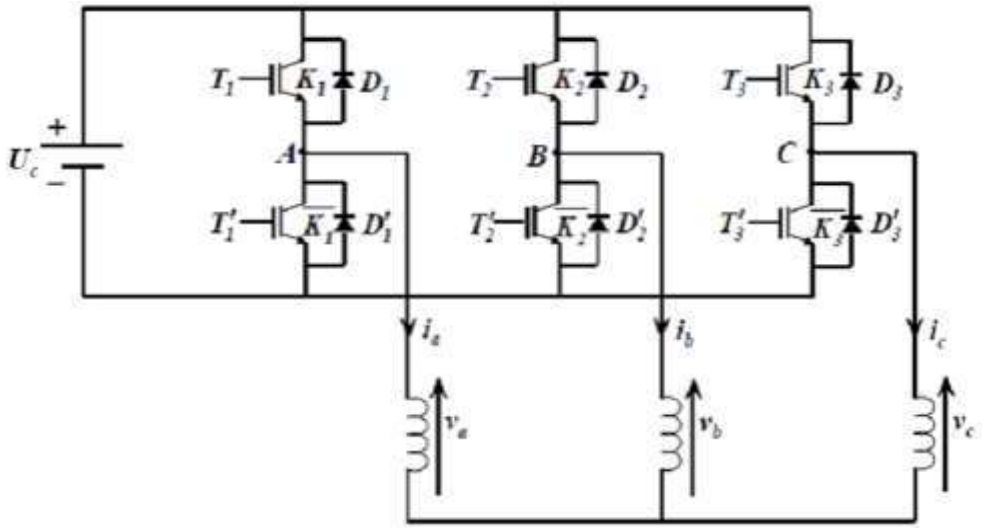
IV.3. Principe de la SVPWM :

Le principe de la MLI vectorielle consiste à reconstruire le vecteur tension Vsréf à partir de huit vecteurs tensions. Chacun de ces vecteurs correspond à une combinaison des états des interrupteurs d'un onduleur de tension triphasé.
Un vecteur tension de référence *Vsref* est calculé globalement et approximé sur une période de modulation *Te* par un vecteur tension moyen *Vsmoy* ; ce dernier est élaboré par l'application des vecteurs tensions adjacents et des vecteurs nuls V0 et V7.

IV.4. Technique de Modulation Vectorielle :

La technique de modulation vectorielle (SVPWM) consiste à reconstituer le vecteur tension de référence $\overrightarrow{V_s}$ pendant une période d'échantillonnage par les vecteurs tensions adjacentes $\overrightarrow{V_i}, \overrightarrow{V_{i+1}}, \overrightarrow{V_7}, \overrightarrow{V_0}$ (i = 0,1,...5) correspondant aux huit états possibles de l'onduleur.

Dans la (Figure IV.2), il est évident que la commutation des deux interrupteurs d'un même bras en même période de temps provoque un court -circuit, donc pour éviter cette situation



un seul interrupteur par bras doit être commuté par période de temps. Il existe huit états de commutation des interrupteurs T1,…T6.

Figure IV.1 : Schéma équivalent de l'onduleur de tension.

Ces 8 états sont codés de S0 à S7 (Figure II.2), la modulation 'SVPWM' consiste à piloter les commutateurs PWM pour passer progressivement d'un état au suivant. Les 3 sorties a, b et c alimentent les 3 phases du moteur qui créent des champs magnétiques déphasées de 120º.

On peut alors représenter l'orientation du champ magnétique pour chacun des 8 états, ces états se transforment alors en vecteur de tension $\overrightarrow{V_0}$ à $\overrightarrow{V_7}$ sur le tableau (VI.1) ci-dessous. Les secteurs S0 et S7 ne créent pas de champs magnétique, les vecteur $\overrightarrow{V_0}\ et \overrightarrow{V_7}$ ont donc une longueur nulle. Les autres vecteurs ont une longueur de 1 et respectent les relations suivantes [45]:

$$\begin{cases} \overrightarrow{V_1} = -\overrightarrow{V_4} \\ \overrightarrow{V_2} = -\overrightarrow{V_5} \\ \overrightarrow{V_3} = -\overrightarrow{V_6} \\ \overrightarrow{V_1} + \overrightarrow{V_3} + \overrightarrow{V_5} = \vec{0} \\ \overrightarrow{V_0} = \vec{0} \\ \overrightarrow{V_1} = \vec{0} \end{cases} \qquad \text{(II.1)}$$

Etats	Transistors on	Transistors off	vecteurs
000	T_2, T_4, T_6	T_1, T_3, T_5	$\overrightarrow{V_0}$
0001	T_2, T_4, T_5	T_1, T_3, T_6	$\overrightarrow{V_5}$
010	T_2, T_3, T_6	T_1, T_4, T_5	$\overrightarrow{V_3}$
011	T_2, T_3, T_5	T_1, T_4, T_6	$\overrightarrow{V_4}$
100	T_1, T_4, T_6	T_2, T_3, T_5	$\overrightarrow{V_1}$
101	T_1, T_4, T_5	T_2, T_3, T_6	$\overrightarrow{V_6}$
110	T_1, T_3, T_6	T_2, T_4, T_5	$\overrightarrow{V_2}$
111	T_1, T_3, T_5	T_2, T_4, T_6	$\overrightarrow{V_7}$

Tableau IV.1: Les différentes combinaisons des transistors.

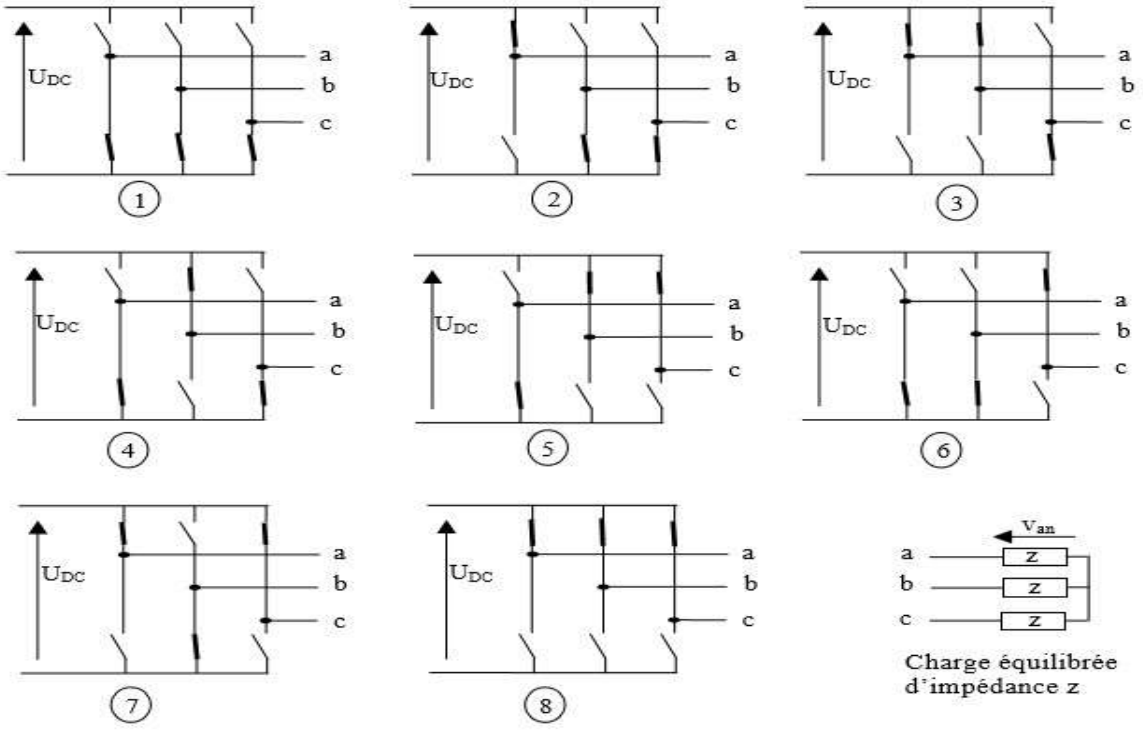


Figure IV.2 : Les différentes combinaisons des transistors.

Il est intéressant d'exprimer les différents états du tableau comme des vecteurs spéciaux. Les six vecteurs actifs ainsi que les deux vecteurs nuls sont représentés sur la figure IV.2. Pour obtenir des tensions sinusoïdales sur les phases A, B et C une rotation complète du vecteur $\overrightarrow{V_s}$ doit être effectuée. [46]

Dans la modulation conventionnelle le vecteur$\overrightarrow{V_s}$ doit être dans le cercle, par contre dans le cas de SVPWM, un vecteur $\overrightarrow{V_s}$ peut être généré à l'intérieur de l'hexagone par combinaison des vecteurs de références qui délimitent le secteur où se trouve le vecteur $\overrightarrow{V_s}$. La symétrie du système triphasé, nous permet de réduire l'étude au cas général d'un secteur de 60 degrés. On se place alors dans le cas où le vecteur de référence $\overrightarrow{V_s}$ est situé dans le secteur 1. Dans ce cas, la tension de référence $\overrightarrow{V_s}$ dans le repère est reconstituée en faisant une moyenne temporelle des tensions adjacentes $\overrightarrow{V_1}; \overrightarrow{V_2}, \overrightarrow{V_7} et\ \overrightarrow{V_0}$, voir la figure IV.4.

Après, il suffit de déterminer la position du vecteur de référence $\overrightarrow{V_s}$ dans le repère (α,B) et le secteur i dans lequel il se trouve. Pour une fréquence de commutation *Ts* suffisamment élevée le vecteur d'espace de référence $\overrightarrow{V_s}$ est considéré constant pendant un cycle de commutation. Tenant compte que $\overrightarrow{V_1}$ et $\overrightarrow{V_2}$ sont constants et $\overrightarrow{V_0} = \overrightarrow{V_7} = 0$, il s'en suit pour un cycle de commutation:

$$T_s\overrightarrow{V_s} = T_1\overrightarrow{V_1} + T_2\overrightarrow{V_2} + T_0\overrightarrow{V_7} + T_0\overrightarrow{V_0} \qquad \text{(IV.2)}$$

Avec :

T_1: Temps alloué au vecteur $\overrightarrow{V_1}$

T_2 : Temps alloué au vecteur $\overrightarrow{V_2}$

T_0 : Temps partagé entre les 2 vecteurs nuls $\overrightarrow{V_7}$ et $\overrightarrow{V_0}$

τ1, τ2 et τ0 : sont les largeurs des impulsions.

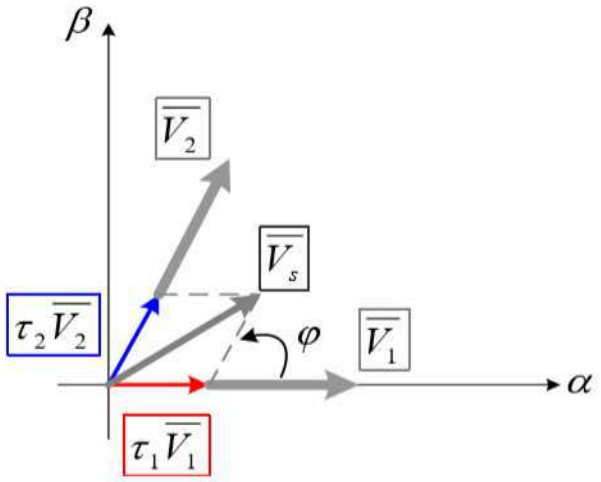


Figure IV.3: Principe de construction du vecteur de tension $\overrightarrow{V_s}$

La résolution de cette équation, après décomposition sur les deux axes du plan α,β complexe donne:

$$T_1 = \frac{V_s\sqrt{2}}{V_{dc}} T_O \sin\left(\frac{\pi}{3} - \varphi\right)$$
$$T_2 = \frac{V_s\sqrt{2}}{V_{dc}} T_0 \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \quad \text{(IV.3)}$$
$$T_0 = \frac{1}{2}(T_s - T_1 - T_2)$$

Avec : $\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{V_\alpha}{V_\beta}\right)$; $0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{3}$

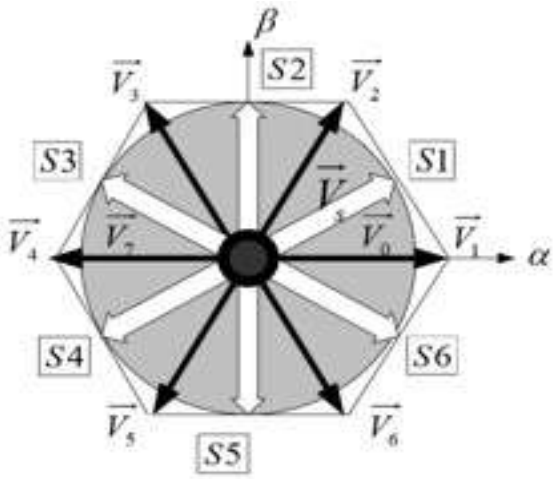


Figure IV.4 : vecteur d'espace V_s , de l'onduleur de tension.

Les mêmes règles s'appliquent pour le secteur 2 jusqu'à 6. Ceci résulte dans l'ordre de commutations défini suivant la figure IV.4. La valeur efficace maximale correspond au cas où $\left\|\vec{V_s}\right\|^2$ atteint le cercle inscrit dans l'hexagone et de rayon :

$$r = \frac{\sqrt{3}}{2} V_{dc} \sqrt{\frac{2}{3}} = \frac{V_{dc}}{\sqrt{2}} \quad \text{(IV.4)}$$

Si en compare à la MLI à intersection, la tension phase neutre maximale possible est :

$$V_\alpha = \frac{V_{dc}}{2\sqrt{2}} \quad \text{(IV.5)}$$

Et la tension entre phase sera :

$$U = \frac{\sqrt{3V_{dc}}}{2\sqrt{2}} \quad \text{(IV.6)}$$

Le rapport entre les deux types de MLI sera donc :

$$\frac{MLI\ vectorielle}{MLI\ \text{à}\ intersection} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1.1547$$

Pour équilibrer les commandes. Ainsi on réduit au minimum le nombre de commutations réalisées pour chaque composant, ce qui donne encore un autre avantage de la MLI vectorielle. Chaque zone (1 à 6) impose un ordre précis de conduction des interrupteurs de l'onduleur. On doit avoir une impulsion unique et centrée sur l'intervalle qui permet un écart minimum par rapport au cercle de référence déterminé par la succession des Vecteurs *Vi* , une diminution de la non linéarité due à la forme de l'impulsion et une diminution du taux d'harmonique. Sur la figure (IV.5), on observe deux combinaisons possibles pour le centrage de l'impulsion lorsque le vecteur de commande est placé dans la zone 1 et 3 limitée respectivement par l'ensemble des vecteurs de tension $(\overrightarrow{V_1}, \overrightarrow{V_2})$ *et* $(\overrightarrow{V_3}, \overrightarrow{V_4})$.

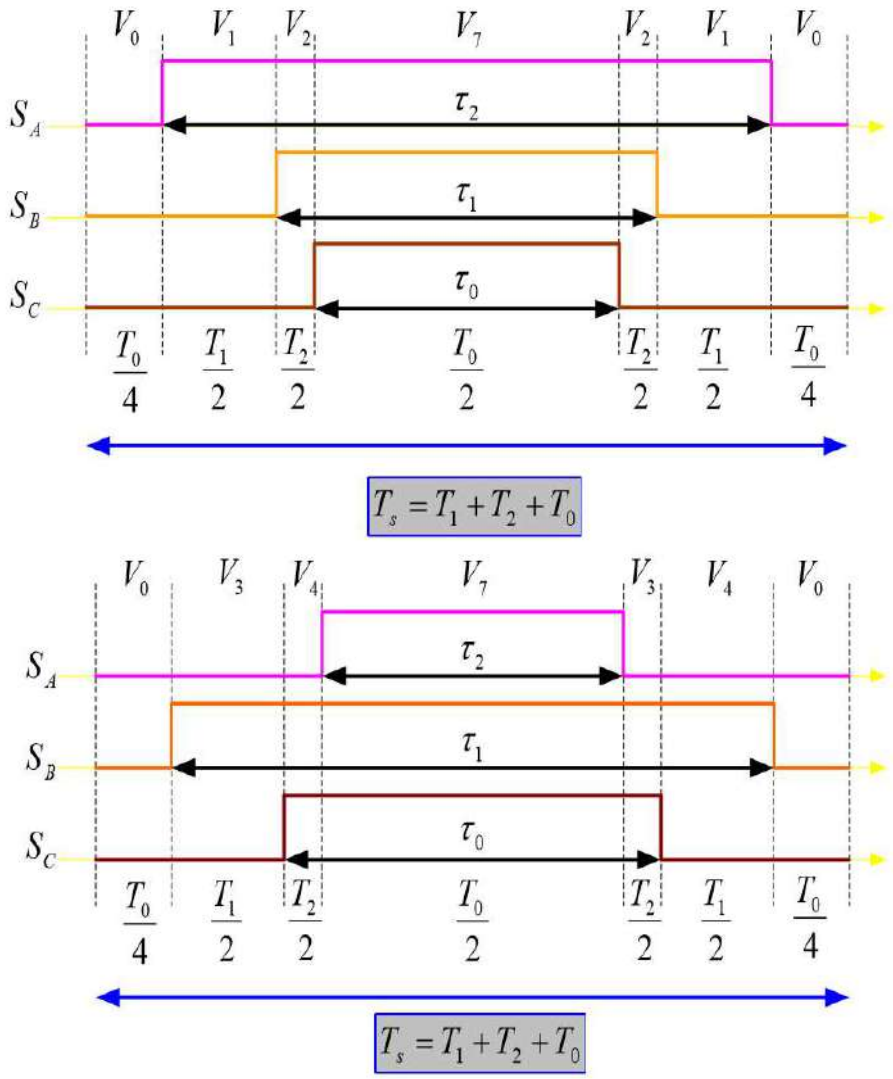


Figure IV.5. Séquence de vecteurs $(\vec{V}_1, \vec{V}_2)$et $(\vec{V}_3, \vec{V}_4)$

Le calcul des largeurs d'impulsions est donné par le système suivant :

$$\begin{bmatrix}\tau_1\\ \tau_2\\ \tau_0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}C_{1i} & C_{1i+1} & \frac{1}{2}\\ C_{2i} & C_{2i+2} & \frac{1}{2}\\ C_{3i} & C_{3i+3} & \frac{1}{2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}T_1\\ T_2\\ T_0\end{bmatrix} \qquad \text{(II.7)}$$

Secteur 1 $\{\ \mathbf{0} \le \boldsymbol{\varphi} \le \boldsymbol{\pi}\ \mathbf{3}\ \}$	Secteur 2 $\{\ \boldsymbol{\pi}\ \mathbf{3} \le \boldsymbol{\varphi} \le \mathbf{2}\boldsymbol{\pi}\ \mathbf{3}\ \}$	Secteur 3 $\{\ \mathbf{2}\boldsymbol{\pi}\ \mathbf{3} \le \boldsymbol{\varphi} \le \boldsymbol{\pi}\}$
$\tau_1 = \frac{T_1}{T_s} = \frac{V_s\sqrt{2}}{V_{sd}}\sin\left(\frac{\pi}{3}-\varphi\right)$	$\tau_1 = \frac{T_1}{T_s} = \frac{V_s\sqrt{2}}{V_{sd}}\sin\left(\frac{\pi}{3}-\varphi\right)$	$\tau_1 = \frac{T_1}{T_s} = \frac{V_s\sqrt{2}}{V_{sd}}\sin\left(\frac{\pi}{3}-\varphi\right)$
$\tau_2 = \frac{T_2}{T_s} = \frac{V_s\sqrt{2}}{V_{sd}}\sin(\varphi)$	$\tau_2 = \frac{T_2}{T_s} = \frac{V_s\sqrt{2}}{V_{sd}}\sin(\varphi)$	$\tau_2 = \frac{T_2}{T_s} = \frac{V_s\sqrt{2}}{V_{sd}}\sin(\varphi)$
$\tau_0 = \frac{T_0}{T_2} = \frac{T_s - T_1 - T_2}{2T_2}$	$\tau_0 = \frac{T_0}{T_2} = \frac{T_s - T_1 - T_2}{2T_2}$	$\tau_0 = \frac{T_0}{T_2} = \frac{T_s - T_1 - T_2}{2T_2}$
Secteur 4 $\{\pi \le \boldsymbol{\varphi} \le \frac{4\pi}{3}\ \}$	Secteur 5 $\{\frac{4\pi}{3} \le \boldsymbol{\varphi} \le \frac{5\pi}{3}\ \}$	Secteur 6 $\{\frac{5\pi}{3} \le \boldsymbol{\varphi} \le 2\pi\}$
$\tau_1 = \frac{T_1}{T_s} = \frac{V_s\sqrt{2}}{V_{sd}}\sin\left(\frac{\pi}{3}-\varphi\right)$	$\tau_1 = \frac{T_1}{T_s} = \frac{V_s\sqrt{2}}{V_{sd}}\sin\left(\frac{\pi}{3}-\varphi\right)$	$\tau_1 = \frac{T_1}{T_s} = \frac{V_s\sqrt{2}}{V_{sd}}\sin\left(\frac{\pi}{3}-\varphi\right)$
$\tau_2 = \frac{T_2}{T_s} = \frac{V_s\sqrt{2}}{V_{sd}}\sin(\varphi)$	$\tau_2 = \frac{T_2}{T_s} = \frac{V_s\sqrt{2}}{V_{sd}}\sin(\varphi)$	$\tau_2 = \frac{T_2}{T_s} = \frac{V_s\sqrt{2}}{V_{sd}}\sin(\varphi)$
$\tau_0 = \frac{T_0}{T_2} = \frac{T_s - T_1 - T_2}{2T_2}$	$\tau_0 = \frac{T_0}{T_2} = \frac{T_s - T_1 - T_2}{2T_2}$	$\tau_0 = \frac{T_0}{T_2} = \frac{T_s - T_1 - T_2}{2T_2}$

Tableau IV.2 Calcul des largeurs d'impulsions

On constate que les calculs donnent des résultats identiques dans chaque secteur, ce qui simplifie la réalisation du modulateur.

IV.5. Les Etapes De La Réalisation Des Blocs De SVPWM :

- 1ere étape : Détermination des tensions de références Vα , Vβ.
- 2éme étape : Détermination des secteurs.
- 3éme étape : calcul des variables X, Y et Z.
- 4éme étape : calcul de T1 et T2 pour chaque secteur.
- 5éme étape : génération des signaux modulants : Ta on, Tb on et Tc on.

- 6éme étape : génération des séries d'impulsions Sa, Sb et Sc.

1ere étape: Détermination Des Tensions De Références $V\alpha$, $V\beta$:

Les tensions $V\alpha$, V_β sont déterminer par la projection des tensions triphasés (Va, Vb,Vc) dans le référentiel α-β en effectuant la transformation de Concordia. La table suivante présente le calcule de , V_β pour les différents états de l'onduleur :

S_a	S_b	S_c	V_{san}	V_{sbn}	V_{scn}	$V_{s\alpha}$	$V_{s\beta}$
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	$\frac{2U_{dc}}{3}$	$-\frac{U_{dc}}{3}$	$-\frac{U_{dc}}{3}$	$\frac{2U_{dc}}{3}$	0
1	1	0	$\frac{U_{dc}}{3}$	$\frac{U_{dc}}{3}$	$-\frac{2U_{dc}}{3}$	$-\frac{U_{dc}}{3}$	$\frac{U_{dc}}{\sqrt{3}}$
0	1	0	$-\frac{U_{dc}}{3}$	$\frac{2U_{dc}}{3}$	$-\frac{U_{dc}}{3}$	$-\frac{U_{dc}}{3}$	$\frac{U_{dc}}{\sqrt{3}}$
0	1	1	$-\frac{2U_{dc}}{3}$	$\frac{U_{dc}}{3}$	$\frac{U_{dc}}{3}$	$-\frac{2U_{dc}}{3}$	0
0	0	1	$-\frac{U_{dc}}{3}$	$-\frac{U_{dc}}{3}$	$\frac{2U_{dc}}{3}$	$-\frac{U_{dc}}{3}$	$-\frac{U_{dc}}{\sqrt{3}}$
1	0	1	$\frac{U_{dc}}{3}$	$-\frac{2U_{dc}}{3}$	$\frac{U_{dc}}{3}$	$\frac{U_{dc}}{3}$	$-\frac{U_{dc}}{\sqrt{3}}$
1	1	1	0	0	0	0	0

TableauIV.3: Le calcule de V_α, V_β pour les différents états de l'onduleur

La transformation d'un système triphasé en un système biphasé équivalent, est donnée par :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_{aref} \\ V_{bref} \\ V_{cref} \end{bmatrix} \quad \text{(IV.8)}$$

2éme étape: Détermination Des Secteurs :

Généralement, le secteur est déterminé selon la position du vecteur $Vsref$ dans le plan complexe (α β), tel que cette position présente la phase φv de ce vecteur définie comme suit:

$$\varphi_V = \tan^{-1}\left(\frac{V_{s\alpha}}{V_{s\beta}}\right) \quad \text{(IV.9)}$$

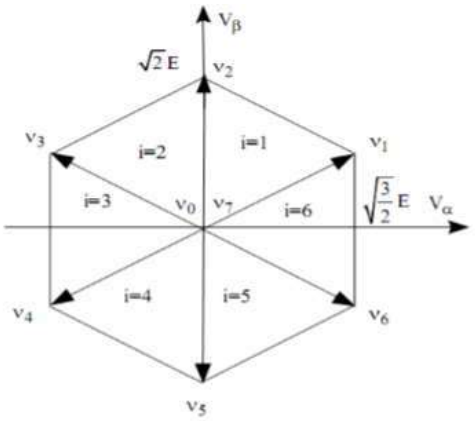


Fig-IV.6: Secteurs de position du vecteur $\boldsymbol{V}$ sref

La table suivante détermine le secteur Si (i=1, 2, 3, 4,5, 6) pour les différents angles φ_v

$\boldsymbol{\varphi v}$	$\{\mathbf{0}\leq\boldsymbol{\varphi}_v\leq\boldsymbol{\pi}/\mathbf{3}\}$	$\{\boldsymbol{\pi}/\mathbf{3}\leq\boldsymbol{\varphi}_v\leq\mathbf{2}\boldsymbol{\pi}/\mathbf{3}\}$	$\{\mathbf{2}\boldsymbol{\pi}/\mathbf{3}\leq\boldsymbol{\varphi}_v\leq\boldsymbol{\pi}\}$	$\{\pi\leq\boldsymbol{\varphi}_v\leq\frac{4\pi}{3}\}$	$\{\frac{4\pi}{3}\leq\boldsymbol{\varphi}_v\leq\frac{5\pi}{3}\}$	$\{\frac{5\pi}{3}\leq\boldsymbol{\varphi}_v\leq 2\pi\}$
Secteur	S1	S2	S3	S4	S5	S6

Tableau IV4: Le secteur (i=1,2, 3, 4, 5,6).

Nouvelle méthode de détermination des secteurs :

A2	A1	A0	Secteur S_i
0	0	0	S5
0	0	1	S4
0	1	0	S6
1	1	1	S1
1	0	0	S3
1	0	1	S4
1	1	0	S2
1	1	1	S1

Tableau IV.5: Détermination des secteurs

Cette méthode est employée par Bibhu [9], pour la détermination du secteur pour la DTC. Elle est basée directement sur les tensions $V\alpha, V\beta$. La détermination est faite comme dans le

tableau 1, ou A2 est le signe de $V\alpha$ et A1 est le signe de $V\beta$. On note que A2 égale à 0 si $V\alpha$ est négatif sinon A2 égale à 1. A1 égale à 0 si $V\beta$ est négatif sinon A1 égale à 1. A0 égale à 1 si la valeur absolue du rapport ($V\beta/V\ \alpha$) est supérieur ou égale à (tan60° =1.732) autrement A0 égale à 0.

3éme étape: Calcul Des Variables X, Y Et Z :

Dans le cas où le vecteur référence se trouve dans le secteur 1 Figure IV.7, la détermination de T1 et T2 est donnée par la projection du vecteur Vs sur les axes (α, β) :

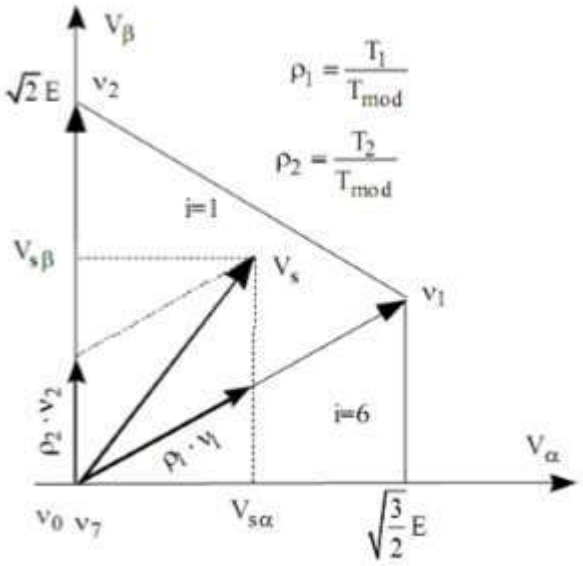


Figure IV.7: Projection du vecteur de référence pour le secteur $\boldsymbol{S1}$.

$$\begin{cases} V_{sa} = \dfrac{T_1}{T_e}\left|\overline{V_1}\right| + x.\cos 30^{\circ} \\ V_{s\beta} = \dfrac{T_2}{T_e}\left|\overline{V_2}\right| \\ x = \dfrac{V_{s\beta}}{\tan 60^{\circ}} \end{cases} \qquad \text{(IV.10)}$$

D' après le tableau (IV.4) les périodes d'application de chaque vecteur adjacent est donné par:

$$\begin{cases} T_1 = \dfrac{T_e}{2E}\left(\sqrt{6}.V_{s\alpha\,ref} - \sqrt{2}.V_{s\beta\,ref}\right) \\ T_2 = \sqrt{2}\dfrac{T_e}{E}V_{s\beta\,ref} \end{cases} \qquad \text{(IV.11)}$$

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

$$\begin{cases} X = \dfrac{T}{E}\sqrt{2}V_{s\beta\,ref} \\ Y = \dfrac{T}{E}\left(\dfrac{\sqrt{2}}{2}V_{s\beta\,ref} + \dfrac{\sqrt{6}}{2}V_{s\alpha}\right) \\ Z = \dfrac{T}{E}\left(\dfrac{\sqrt{2}}{2}V_{s\beta\,ref} - \dfrac{\sqrt{6}}{2}V_{s\alpha}\right) \end{cases} \quad \text{(IV.12)}$$

Pour le secteur 1, T1= -Z et T2=X.

4éme étape: Calcule Des $T1$ Et $T2$ Pour Chaque Secteur :

Les durées T1 et T2 d'application des vecteurs adjacents pour chaque secteur à partir des valeurs de X, Y et Z sont données par le tableau suivant :

secteur	1	2	3	4	5	6
T_1	-Z	Y	X	Z	-Y	-X
T_2	X	Z	-Y	-X	-Z	Y

Tableau IV.6: l'état des $T1$ et $T2$ pour chaque secteur

5éme étape: Génération Des Signaux Modulants $Taon$, $Tbon$ Et $Tcon$:

Les signaux modulants sont générés d'après les formules suivantes :

$$\begin{cases} T_{aon} = \dfrac{T_e - T_1 - T_2}{2} \\ T_{bon} = T_{aon} + T_1 \\ T_{con} = T_{bon} + T_2 \end{cases} \quad \text{(IV.13)}$$

6éme étape: Génération Des Séries D'impulsions Sa, Sb et Sc.

La détermination des signaux de commande (Sa, Sb, Sc) en fonction de Txon est donnée par le tableau suivant :

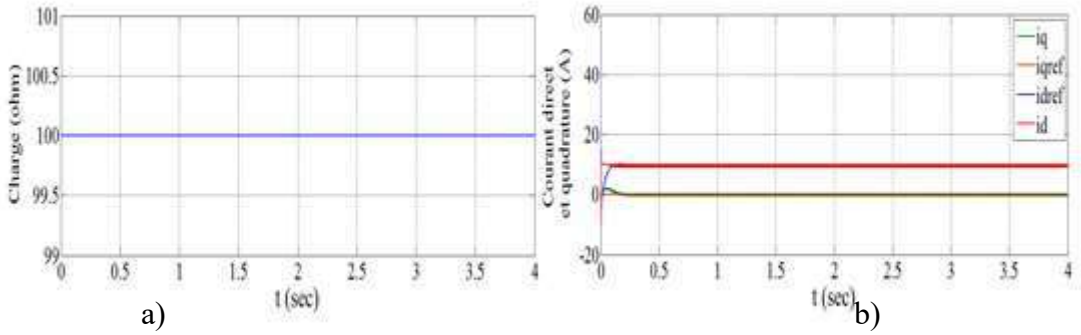
Secteur / signaux	1	2	3	4	5	6
Sa	T_{aon}	T_{aon}	T_{aon}	T_{bon}	Tc_{on}	Tc_{on}
Sb	T_{bon}	T_{aon}	T_{aon}	T_{bon}	Tc_{on}	Tc_{on}
Sc	Tc_{on}	Tc_{on}	T_{bon}	T_{aon}	T_{aon}	T_{bon}

Tableau IV.7: les signaux de commande (Sa,b,c) en fonction de $Txon$

IV.6. Simulation et Modélisation de l'Onduleur SVPWM à deux niveaux:

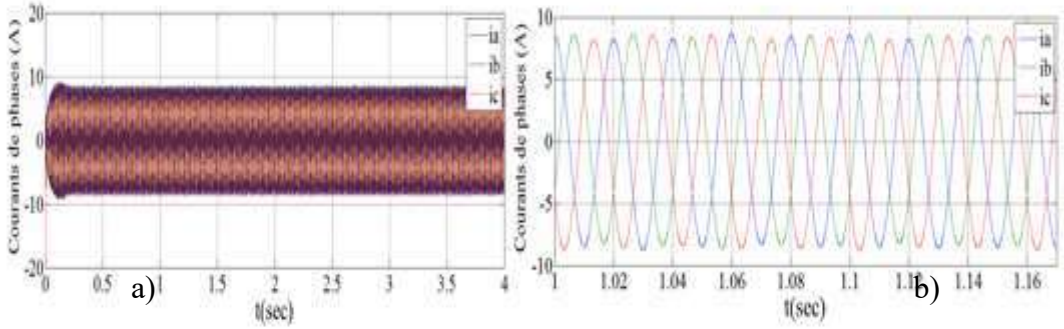
Pour vérifier les performances de cette technique (SVPWM), nous avons procédé à une simulation sur Matlab/Simulink d'un onduleur de tension à modulation vectorielle (SVPWM).

- ✓ *Pour résistance de charge Rc=100 ohm*



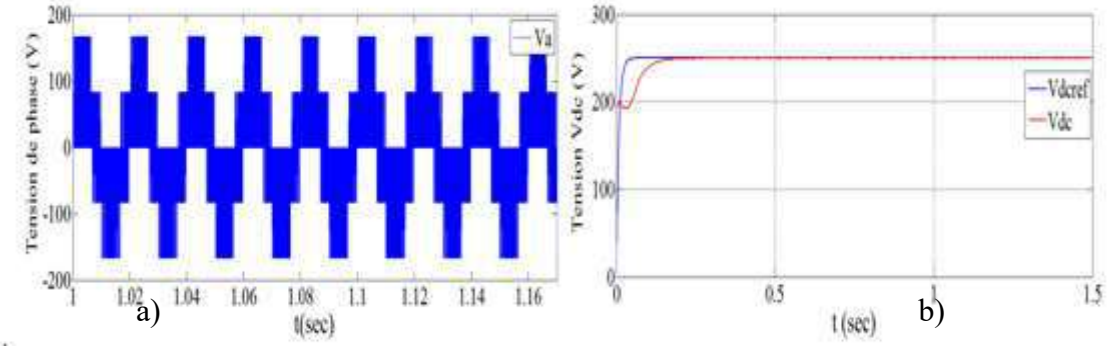
a) b)

Figure IV.8: a) charge Rch constante, b) courants direct et quadrature du filtre.



a) b)

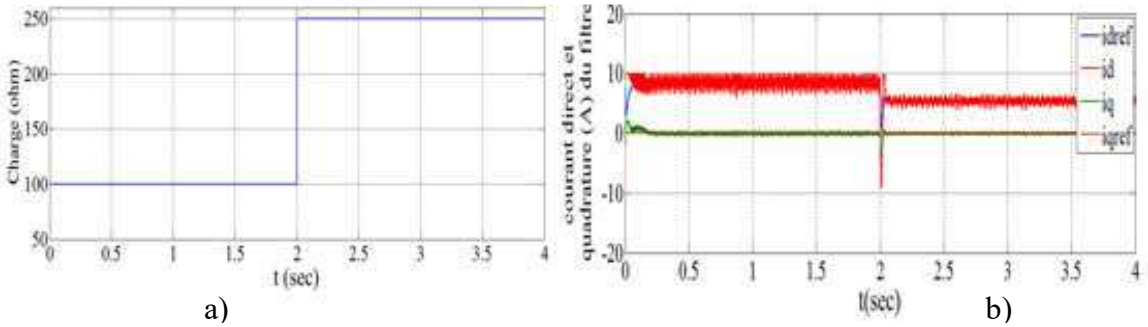
Figure IV.9: a) Courants de phases, b) zoom



a) b)

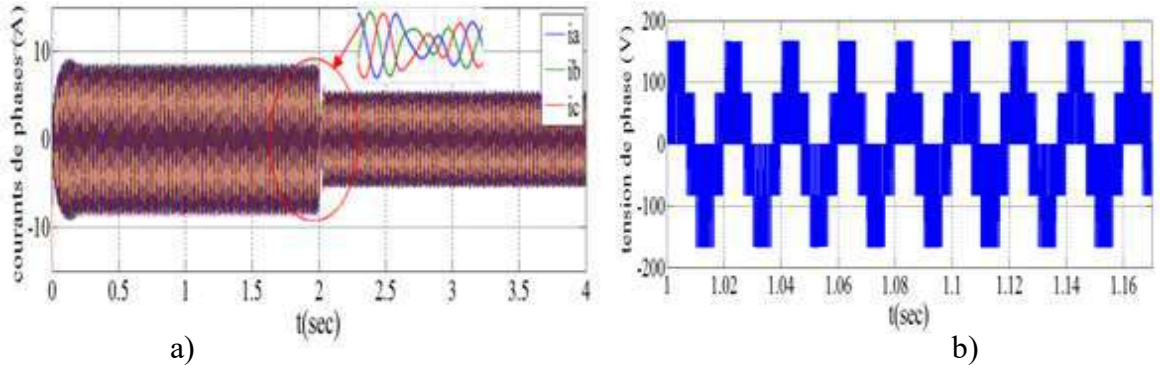
Figure IV.10: a) Tension de phase, b) tension du bus continu

✓ *Pour résistance de charge variable de 100 Ohm à 250 Ohm*



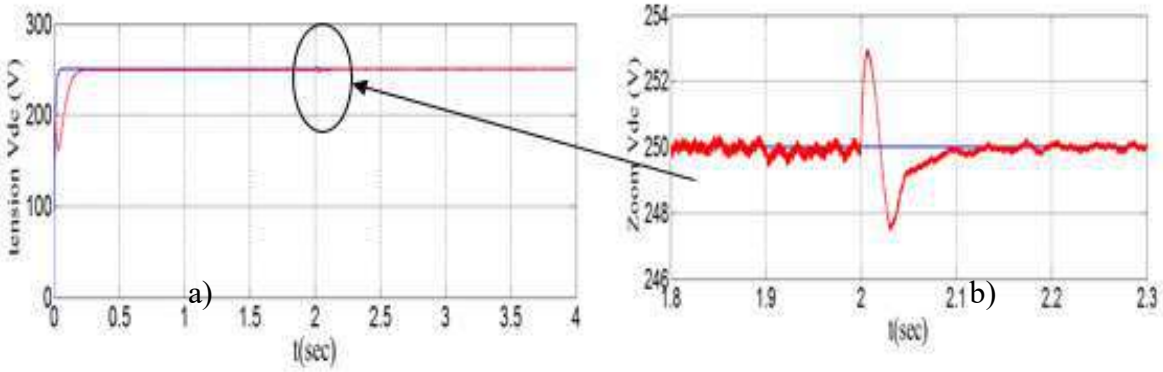
a) b)

Figure IV.11: a) charge Rch variable, b) courants direct et quadrature du filtre.



a) b)

Figure IV.12: a) Courants de phases, b) tension de phase



a) b)

Figure IV.13: Tension du bus continue b) Zoom

IV .7. Interprétation des résultats :

En utilisant l'outil Simulink/Matlab, on a établi un programme numérique permettant la simulation de l'évolution des caractéristiques du convertisseur coté générateur commandé par la stratégie MLI vectorielle (SVPWM).

La figure IV.8 b) présente l'évolution des courants direct et en quadrature *dq*, avec leurs références.

La figure IV.9, illustre les courants des phases abc, coté générateur avec un zoom entre l'instant 1s à 1.17s.

Les figures IV.10 a) et b), présentent la tension de phase et tension de bus continu respectivement.

La figure IV.11, Présente le teste de robustesse de la commande utilisée. (La variation des courants direct et en quadrature en fonction de la variation de la charge).

La figure IV.12, Présente la variation des courants de phases avec un ZOOM au point de la variation de la charge et la stabilité de la tension de phase.

La figure IV.13, montre la tension du bus continu avec un ZOOM au point de la variation de la charge, on remarque une fluctuation quasi- insignifiante, rattrapée par le régulateur en un temps assez réduit.

Dans le teste de robustesse on observe que la tension de bus continu reste constante malgré la variation de la charge. Cela confirme l'importance de la commande proposée et le l'avantage du IP. (Rejet de la perturbation).

IV.8. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a proposé une commande vectorielle pour le redresseur triphasé à MLI basé sur la stratégie MLI vectorielle. La régulation cascade présente l'avantage de pouvoir décomposer le système en deux boucles, l'une interne réaliser par le régulateur Flou pour régler les courant coté générateur, l'autre externe réaliser par un régulateur IP avec la stratégie de anti-windup pour maintenir la tension de bus continu à un niveau exigé. Les résultats des simulations montrent une bonne performance de la commande proposée au démarrage et lors des variations de charge. D'après ces résultats on peut dire que notre convertisseur à MLI fonctionne à facteur de puissance unitaire avec un courant absorbé du réseau possédant une forme sinusoïdale et une tension de bus continu coté DC réglable et constante.

Conclusions générales et perspectives

Dans ce travail, nous avons abordé les problématiques posées par la conception d'une chaîne de conversion d'énergie dédiée à une éolienne de petite puissance. Dans une approche de conception système, nous avons abordé de façon intégrée les questions d'architecture, de dimensionnement et de gestion optimisée de l'énergie.

Dans le contexte des énergies renouvelables un état de l'art de l'éolien est présenté dans le premier chapitre. La production de l'énergie éolienne est de plus en plus importante et alors de nouvelles constructions apparaissent. Cette évolution dynamique est surtout visible dans le domaine du grand éolien grâce au développement des nouvelles technologies dans le champ de matériaux de construction et de l'électronique de puissance. Le pouvoir politique est aussi dans une grande partie moteur du développement durable.

Notre étude s'est focalisée sur l'éolien de petite puissance, secteur dans lequel la rentabilité et loin d'être acquise et qui nécessite donc un fort degré d'optimisation de l'efficacité énergétique, mais qui impose simultanément de minimiser les coûts de production (équipements simples, minimum de capteur, simplicité de contrôle…), d'usage (fiabilité, « rusticité »,…) et de recyclage, aspects essentiels d'une « écoconception ». Dans ce contexte, de nouvelles solutions relevant d'une optimisation multi physique sont à l'étude, notamment dans l'intégration des systèmes éoliens dans l'habitat. Ces idées nouvelles nécessitent de mettre en adéquation les caractéristiques de la voilure (esthétique, acoustique, performances en gisement fortement turbulent,…) avec un positionnement favorable dans l'environnement urbain (recherche d'effets venturi). Ces propriétés liées aux domaines de la mécanique des fluides et des structures doivent aussi s'associer de façon cohérente aux caractéristiques de la chaîne mécano-électrique de conversion d'énergie.

On remarque que la vitesse de rotation optimale du point de vue de la puissance éolienne n'est pas forcement la même que la vitesse optimale déterminée du côté de la charge. Le système se place en juste milieu en retrouvant un optimum global du système. Malgré que le dispositif MPPT soit fiable dans tous les cas étudiés, on remarque les grandes différences en quantité d'énergie selon la configuration et le profil du gisement éolien.

Dans le deuxième chapitre, nous avons donné un rappelle sur les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. Ainsi, nous avons établi un modèle mathématique de la turbine éolienne à partir de ses équations caractéristiques.

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation. Cette modélisation nous a permis d'établir un modèle mathématique de cette machine. Afin de simplifier ce dernier, nous avons appliqué la transformation de Park liée au champ tournant.

Afin de pouvoir contrôler indépendamment le flux et le couple, et rendre le comportement de la MADA équivalent à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée, nous avons élaboré une commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de cette dernière. Ainsi, nous avons montré à travers une simulation numérique le découplage effectif entre le flux et le couple qui nous a permet d'obtenir des performances dynamiques plus élevées.

Dans le quatrième chapitre, nous avons abordé la modélisation et la commande du convertisseur coté réseau de la chaîne éolienne. Nous avons présenté le modèle de fonctionnement de l'onduleur triphasé à deux niveaux. L'étude des caractéristiques de la tension de sortie de l'onduleur, pour la stratégie SVM, a montré qu'elle présente une performance parfaite quant à la régulation des tensions et des courants de sortie.

L'objectif est d'appliquer cette commande pour contrôler indépendamment des puissances actives et réactives générées par la machine asynchrone découplée par orientation du flux. On peut donc conclure que cette technique de commande de la MADA a conduit à de bonnes performances.

En guise de perspective de recherche, nous envisageons l'étude d'un convertisseur coté machine et l'implémentation expérimentale des différents algorithmes de commande de la MADA.

Asservissement de vitesse par régulateur mode glissant

1. Introduction

Les systèmes physiques étant de nature non linéaire, leurs comportement est le plus souvent décrit par des équations différentielles non linéaire .Si le domaine de fonctionnement du système est limité et si la non linéarité est douce, le système est linéaire est représenté par un ensemble d'équations qui décrivent son comportement dynamique. Par contre l'analyse des systèmes non – linéaires, qui sont plus riches et plus complexes que les systèmes linéaires est plus difficile. Récemment des études avancées ont été faites dans le domaine de l'automatique et particulièrement le réglage des systèmes non linéaire pour lesquelles ont élaboré des algorithmes de commande qui prennent en cette propriété des systèmes, en effet lorsque l'organe de commande possède un comportement discontinu par commutation (action à deux positions).

Il est judicieux de faire appel à des méthodes de réglage non linéaire et discontinu qui s'adapte mieux au comportement particulier de ces organes de commande. Il s'agit en particulier du réglage par **Mode de Glissement**. Au début des années 80, la commande des systèmes à structure variable par le mode de glissement est devenue très intéressante et attractive, elle est considérée comme l'une des approches les plus simples pour la commande des systèmes ayant un modèle imprécis grâce aux avantages qu'elle présente (robustesse vis-à-vis des paramètres variables, très haute précision, une bonne stabilité et temps de réponse très faible).

2. Les systèmes Non Linéaires

Sachant que les systèmes non linéaires sont plus riches et plus complexe dans leur comportement par rapport aux systèmes linéaires, leurs analyses sont plus difficiles. Par contre il existe des moyens puissants d'analyse et de conception de ces systèmes, parmi lesquelles on peut citer : le plan de phase et la théorie de lyaponov.

La conception des systèmes non linéaires exige la prise en considération des éléments suivants :

- La stabilité : doit être garantie pour le modèle dans le sens local et global.
- Performances : représentent la précision, la qualité (écart statique, oscillation,…..etc.) ainsi que le temps de réponse du système.

☞ Invariance et robustesse : la réponse en boucle fermée doit être insensible et peut sensible respectivement à toute les perturbations extérieure, aux variations des paramètres et aux incertitudes sur le modèle.

Une bonne commande peut être obtenue sur la base d'un compromis en terme de (stabilités /robustesse, stabilités/performances …….. etc.) .

3. Conception de la commande par mode de glissement

La conception de cette commande peut être répartie en trois étapes principales très dépendantes.

d) Choix de la surface de glissement

e) L'établissement des conditions d'existences et de convergence

f) La détermination de la loi de commande

3.1. Choix de la surface de glissement

En général, pour un système défini par l'équation d'état suivante :

$$\dot{X} = AX + BU$$

Il faut choisir ¨m¨ surfaces de glissement, pour un vecteur U de dimension ¨m¨. J.J. Slotine nous propose une forme d'équation générale pour déterminer la surface de glissement qui assure la convergence d'une variable d'état x vers sa valeur de consigne x_{ref}.

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{r-1} e(x)$$

Avec :

x : variable à régler

e(x) : l'écart de la variable à régler ($x_{ref} - x$)

λ : Constante positif

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

- r=1 S(x)=e(x).
- r=2 $S(x)= \lambda.e(x) + \dot{e}(x)$

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

S(x)=0, est une équation différentielle linéaire autonome dont la réponse $\dot{e}(x)$ tend vers zéro pour un choix correct du gain. En d'autres termes, la difficulté revient à un problème de poursuite de la trajectoire dont l'objectif est de garder S(x) à zéro. Ceci est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart en représentant une condition de convergence.

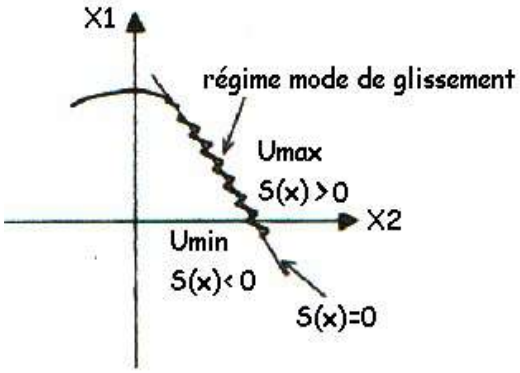


Figure 9. L'état de la trajectoire dans le régime mode de glissement

3.2. Condition d'existence et de convergence

Les conditions de convergence permettent à la dynamique du système, dans le plan de phase, de converger vers la surface de glissement. Il existe deux conditions :

La fonction directe de commutation : c'est la première condition de convergence, elle est sous la forme : $S(x)\dot{S}(x) < 0|$

La fonction de Lyaponov : $V(x) = \frac{1}{2}S^2(x)$

Son dérivé $\dot{V}(x) = S(x)\dot{S}(x)$ sera

Pour que la fonction de Lyaponov décroisse, il suffit $V(x) = S(x)\dot{S}(x) < 0$ d'assurer :

Cette fonction est utilisée pour estimer les performances de la commande, l'étude de la robustesse et de garantir la stabilité du système non linéaire.

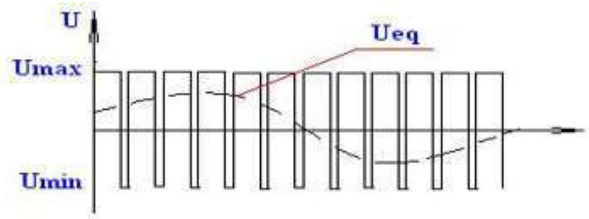
3.3. Calcul de la commande

Une fois la surface de glissement est choisie, ainsi que la vitesse de convergence, il reste à déterminer la commande nécessaire pour attitrer la variable a contrôlé vers la

surface et ensuite vers son point d'équilibre (origine du plan de phase) en maintenant la condition d'existence du mode de glissement

La structure du contrôleur comprend deux parties, une concernant la linéarisation exacte et l'autre stabilisante .Cette dernière est très importante dans la commande non linéaire car elle est utilisée pour estimer les effets d'imprécision du modèle et les perturbations extérieures, nous avons donc : $U=U_{eq}+U_n$

U_{eq} correspond à la commande de linéarisation proposée par Fillipov et Utkin (commande équivalente), il est possible d'interpréter cette grandeur de commande



équivalente comme valeur moyenne glissante que prend la grandeur de commande lors de la commutation rapide entre U_{max} et U_{min} . Cette interprétation permet immédiatement de tiré une condition pour l'existence de mode de glissement à savoir .$U_{min} \leq Ueq \leq U_{max}$

Figure 10 : Grandeur de commande équivalente Ueq comme valeur moyenne glissante

Elle consiste à trouver une commande linéarisante tels que la trajectoire de l'état reste sur la surface de glissement S(x)=0. La commande Un est déterminer pour garantir l'attraction de la variable à contrôler vers la surface et satisfaire la condition de convergence $S(x)\dot{S}(x) < 0$. En d'autres termes, définir le comportement dynamique du système durant le mode de convergence par $Un = \dot{S}(x)$. Le calcul de la commande équivalente se fait à partir des équations du système d'état suivant : $\dot{X} = A.X + BU$

Le vecteur U est composé de, Ueq et U_n auxquelles nous nous intéressons a déterminé leurs expressions analytiques. Nous avons :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial x}\left[AX + BUeq\right] + \frac{\partial S}{\partial x}BUn$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent l'expression de la surface est égale à zéro, sa dérivée est donc nulle, donc on aura : Un=0.

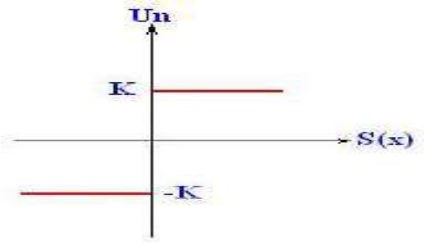
$$Ueq = -\left[\frac{\partial S}{\partial x}B\right]^{-1}\left[\frac{\partial S}{\partial x}AX\right]$$

Durant le mode de convergence, en remplacent le terme Ueq par son expression, nous obtenons la dérivé de la surface $\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x}BUn$

Le problème revient à trouver Un tel que $S(x)\dot{S}(x) < 0$

$S(x)\frac{\partial S}{\partial x}BUn < 0$ $S(x)\frac{\partial S}{\partial x}B$

Donc, il faut que le signe de Un, soit l'opposé de celui de . La forme la plus simple que peut prendre Un est celle d'un relais (figure 23).



$U_n = k$ Signe(S(x)).

Figure 11 : Fonction Un (relais)

Le choix de la constante K est très influent, en effet, si K est très petit, le temps de réponse sera très lent et si K est trop grande nous aurons des oscillations appelées "**chattering** " celle-ci nuit au fonctionnement et aux performances du système.

4. Elimination de l'effet de chattering.

Pour remédier à l'effet de chatte ring la fonction discontinu est remplacée par une fonction continue (figure B.4), ceci au voisinage de la surface de glissement et on procède à un lissage de la commande (commande adouci).

$$U_n = \begin{cases} \left(K/\xi\right)S(x) & Si\ |S(x)| \leq \xi 1 \\ KSigne(S(x)) & Si\ |S(x)| > \xi 1 \end{cases}$$

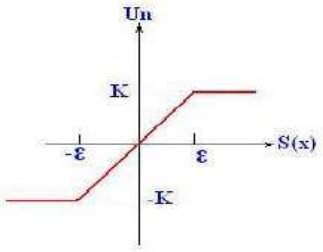


Figure 12 : Commande douce à un seul seuil.

Annexe 2

Paramètres de la Turbine Eolienne

Puissance nominale Pn=7.5kW

Nombre de pale=3

Rayon d'une pale R=3m

Gain du multiplicateur G=5.4

Inertie J=0.0017Kg.m2

Coefficient de frottements visqueux f=0.0024Nm.s/rd

PARAMETRES DE LA MADA

Valeurs nominales : 7.5KW ; 220/380V- 50Hz ; 15/8.6A ; 1440tr/min.

Résistance du stator Rs=1.2Ω

Résistance du rotor Rr=1.8Ω

Inductance stator Ls=0.1554H

Inductance rotor Lr=0.1568H

Inductance Mutuelle M=0.15H

Couple résistant Cr=15Nm

Moment d'inertie J=0.3126 Kg.m2

Coefficient de frottement fr=0.00673 Nm.s/rad

Nombre de paire de pôles P=2

Bibliographie

[1] P.W. Carlin, «The History and State of Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology », NREL/TP-500-28607, Février 2001.

[2] https://www.google.fr/search?biw=1280&bih=908&tbm=isch&sa=1&q=Croissance+mondiale+de+puissance+install.12/4/2017.17h00.

[3] Kasbadji Merzouk N. et H. Daaou, «Atlas Energétique Eolien de l'Algérie ». SIPE5, Béchar, 2000.

[4] KHATTACHE.L. «Etude et commande d'un système éolienne à base d'une machine électrique double alimentée». Mémoire de Magister .Université de Batna.2007.

[5] Stéphane CHOPIN Les éoliennes Dossier thématique n°1 . http://maths-sciences-lp.ac-amiens.fr/sites/maths-sciences-lp.ac-amiens.fr/IMG/pdf/eolienne_dossier thematique.pdf. 13/4/2017,23h33.

6] POITIERS.F. «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne». Thèses de Doctorat. L'école polytechnique de l'Université de Nantes.France.2003

[7] A. HAMID. et H. DJELFAOUI. « Etude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation alimentée par une source Hybride (éolien Photovoltaïque)». Mémoire d'Ingéniorat U.S.T.H.B Algerie.2009

[8] Tarak GHENNAM Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation doctorat delivre conjointement par l'ecole centrale de lille et l'ecole militaire polytechnique d'alger29/09/2011

[9] B.P.Panigrahi, Dinkar Prasad, S. SenGuptu, " A simple hardware realization of switching table based direct torque control of induction motor ", Electric Power Systems Research 77 (2007) 181-190.April2006.

[10] Kezerli. R « Alimentation et Commande d'une MADA connectée au réseau local, en utilisant les convertisseurs multiniveaux ». Mémoire de Magister. USTHB. Algerie.2009.

[11] C. Alonso, "Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie", Habilitation à diriger les recherches, Université Paul Sabatier Toulouse VI, 2003.

[12] A. Boyette, "Côntrole-Commande d'un Générateur Asynchrone à Double Alimentation avec un Système de Stockage pour la Production Eolienne", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.

[13] I. Hamzaoui, "Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur", Mémoire de Magister, ENP Alger, Janvier 2008.

[14] M. Cosan, H. Mao, D. Boroyevich, and F. C. Lee, "Space vector modulation of three – level voltage source inverter", VPEC Seminar, pp. 123–128, September 1996.

[15] HAKIM BENNANI machine asynchrone à double alimentation Les lois de commande en régime permanent. Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.) université laval québec 2011.

[16] Kezerli. R « Alimentation et Commande d'une MADA connectée au réseau local, en utilisant les convertisseurs multiniveaux ». Mémoire de Magister. USTHB.Algerie .2009.

[17] J. Martin, "Energies éoliennes", Techniques de l'Ingénieur, Traité de Génie Energétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21, 1997.

[18] Multon, X. Roboam, B. Dakyo, C. Nichita, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, Aérogénérateurs électriques", Techniques de l'Ingénieur, D 3960, pp. 1-18, Novembre 2004.

[19] P.Leeconte, M.Rapin, E.Szechenyi « éolienne »,Technique de l'ingénieur, BM 4640.

[20] R. Ghosn, "Contrôle vectoriel de la machine asynchrone à rotor bobine à double alimentation", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Octobre 2001.
[21] Mr. Telli Abderrahim. étude et commande d'une éolienne à vitesse variable intégrée au réseau mt. Mémoire en vue l'obtention du diplôme de magister en électrotechnique université des sciences et de la technologie d'Oran.
[22] S. Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998.
[23] S. El-Aimani, B. Francois, F. Minne, B. Robyns, "Modelling and Simulation of Doubly FedInduction Generators For Variable Speed Wind Turbines Integrated in a Distribution Network", EPE 2003,Toulouse, France, 2003.
[24] H. Camblong. «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable. Thése de doctorat en Automatique. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers. Centre de Bordeaux, 2003.
[25] P. Monjean, « Optimisation de l'architecture et des flux énergétiques de centrales à énergies renouvelables offshore et on shore équipées de liaisons en continu ». Thèse de Doctorat, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers 2012.
[26] S. Wen, F. Wang, « Sensorless Direct Torque Control of High Speed PMSM Based on Variable Structure Sliding Mode ». Proceedings of Electrical Machines and Systems, ICEMS-IEEE, International Conference on, pp. 995 – 998. 2008.
[27] V. COURTECUISSE, « Supervision d'une centrale multisources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique ». Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, le 20 novembre 2008.
[28] A. Luque, S. Hegedus, "Handbook of photovoltaic science and engineering", John Willey &Sons Ltd, pp. 61–113, 2003.
[29] D. Gourières, "Energie éolienne. Théorie, conception et calcul pratique des nstallations", Deuxième édition, Eyrolles Paris, 1982.
[30] I. Hamzaoui, "Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur", Mémoire de Magister, ENP Alger, Janvier 2008.
[31] Xin Jin. Construction d'une chaine d'outils numériques pour la conception aérodynamique de pales d''éoliennes. Mathématiques générales [math.GM]. Université de Bordeaux, 2014. Français. <NNT : 2014BORD0099>. <tel-01375980>
[32]. Medjber Ahmed1 , Moualdia Abdelhafidh2 Guessoum Abderrezak3, Mellit Adel4, control with neural network and pi of grid sid converter based on strategy svpwm in the wind energy conversion system university of medea ecres – 3. European Conference on Renewable Energy Systems, Antalya, TURKEY, **-** Oct. 2015
[33]. Meghdour Mohamed Diplôme De Master en Génie Électrique ; Option : Energies Solaire Et Eolienne ; theme ; Commande d'un aérogénérateur alimenté par un convertisseur à trois niveaux. Proposés et dirigés par M^r.Moualdia Abdelhafidh M^r.Medjber Ahmed **u**niversite **dr.y**ahia fares de **m**edea
[34] G.Gellet, G.Clerc, " Actionneur électriques à Principe /Modèle /Commande ". Edition Eyrolles, 1999.
[35] Carlos Canudas de wit, " Modélisation contrôle vectorielle et DTC ". Vol.1 Edition Hermes Sciences Europe Ltd 2000.
[36] Boufateh MESSAOUDI Utilisation du contrôle directe du flux statorique et du filtre de Kalman en vue du contrôle direct du couple d'un moteur asynchrone Mémoire Présenté pour obtenir le diplôme de Magister en Electrotechnique OPTION: Electricité industrielle. Soutenu le 13/11/2007

[37] Souad Chaouch, “ Commande Vectorielle Robuste d'une Machine à Induction sans Capteur de Vitesse” , Thèse de doctorat en science en électrotechnique l'université de Batna 03 Décembre 2005.
[38] E.M. Berkouk, "Contribution à la conduite des machines asynchrones monophasée et triphasée alimentées par des onvertisseurs directs et indirects. Application aux gradateurs et onduleurs multiniveaux", Thèse de Doctorat, CNAM, Paris, France, 1995.
[39] D. Beriber, F. Bouchafaa, M. S. Boucherit, "Stability of input voltages of a three-level inverter NPC fed by photovoltaic sources", IVième Congrès International sur les Energies Renouvelables et l'Environnement (CERE’2009), Monastir, Tunisia, 19 – 21 Mars, 2009.
[40] J. Bernard, "Energie solaire, calculs et optimisation", Ellips, pp. 193–212, 2004.
[41] F. Bouchafaa, "Etude et commande de différentes cascades de l’onduleur à neuf niveaux à structure NPC. Application à la conduite d’une MSAP", Thèse de Doctorat, ENP. Alger, 2006.
[42] S. EL-Aimani, "Modélisation de différentes technologies d’éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension", Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille (ECL), 2005
[43] F. Poitiers, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l’utilisation de l’énergie éolienne, machine asynchrone a cage autonome; machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau", Thèse de Doctorat de l’Université de Nantes, 2003
[44] K. Ameur, "Etude d’un système photovoltaïque muni d’un régulateur MPPT. Application à la conduite d’une MSAP", Mémoire de Magister, USTHB, 2009.
[45] Abdelhafidh Moualdia, Ahmed Medjber, A. Kouzou, A.Guessoum, A.Mellit Contrôle PI-Flou d’un Convertisseur Côte réseau Basé sur la SVPWM dans le Système de conversion Eolien – University of Medea 3. European Conferenceon Renewable Energy Systems,Antalya, TURKEY, 07-10Oct. 2015
[46] M. LARDJOUM Mohamed Youcef et Melle. KHORCHEF Imane. Commande d’un filtre actif parallèle de puissance par la méthode SVPWM fondu sur un réseau électrique basse tension. Diplôme de Master en Électrotechnique. Proposé et dirigé par,
M. MORSLI Abdelkader M. Pr. TLEMÇANI Abdelhalim Université de Médéa.2016.