الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE **DR.Y**AHIA FARES DE **M**EDEA

FACULTE DES **S**CIENCES ET DE LA **T**ECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique
et de l'Informatique

Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du 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

Préparé et présenté par

Meghdour Mohamed

Année Universitaire 2014-2015

Remerciements

Au terme de ce travail :
Je souhaite adresser mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation de près ou de loin.

Je remercie chaleureusement, monsieur Moualdia Abdelhafidhe Pour ses encouragements et ses nombreuses remarques constructives tout au long de la direction de ce travail.

Je tiens à remercier également les membres de jury pour avoir accepté de juger ce travail.

Je tiens également à remercier chaleureusement.
L'équipe des enseignants du département de génie électrique et informatique qui ont contribué à notre encadrement pendant les deux années de master.

Dédicace

Je dédie ce travail à mes très chers parents, dont le sacrifice, la tendresse, l'amour,

La patience, le soutien, l'aide 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 mes chers frères et sœurs pour leurs soutien, leurs aides, leurs encouragements.

A mes grandes mères et grands-pères et toute ma famille.

A tous mes enseignants, du primaire au niveau supérieur.

A tous mes amis

Mohamed

ملخص

هذا العمل يتناول دراسة واستعمال مولدات غير متزامنة ذوات تزويد مزدوج للإنتاج بالطاقة الهوائية. من أجل هذا المقصد، نموذج لتربين هوائي قد تمت دراسته.

كما أن الهدف من هذه المذكرة هوالتحكم في تور بينات الرياح التي تغذيها محول ثلاثة مستويات قمنا باستعمال تقنية التحكم الشعاعي وتقنية التحكم المباشر للعزم الكهرومغناطيسي،لتحقيق هذا التحكم استخدمنا منظم PI

وتم في النهاية استخلاص بعض الأفكار عن طريق النتائج المتحصل عليها من التمثيل الرقمي عن طريق برنامج (MATLAB/SIMULINK).

كلمات المفاتيح:تقنية التحكم المباشر للعزم، الطاقة الهوائية، التحكم الشعاعي.

Résumé

Ce travail présente l'étude et l'utilisation de la génératrice asynchrone à double alimentation (MADA) dans la production de L'énergie éolienne. Pour ce faire, un modèle de la turbine éolienne a été établi.

L'objet de cette étude est commande d'aérogénérateur alimenté par un convertisseur à trois niveaux, Pour ce faire, un modèle a été établi pour la MADA. Une commande vectorielle et Commande direct de couple. Le réglage de cette commande a été effectué par la synthèse de régulateur linéaires PI.

Cette étude a été conclue par des résultats de simulation à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK.

Mots clé: La commande directe du couple (DTC). Énergie éolienne, commende vectoriel.

ABSTRACT

This work presents the study and the use of the twice feeding of asynchronous generator (MADA) in the wind energy production. For this intention, a model of the wind turbine was been established.

The purpose of this study is to control wind turbine fed by a three-level converter, To do this, a model was established for the MADA. Vector control and direct torque control. The setting of this control was carried out by the synthesis of linear PI controller.

This study was been concluded through results from simulation using MATLAB/SIMULINK software.

Keywords: the Direct Torque Control (DTC), wind energetic, vector comand.

Table des matières

LISTE DES FIGURE 8
LISTE DES TABLEAU 10
INTRODUCTION GENERAL 1

Chapitre I : *Etat de l'art des éoliennes*

I.1. INTRODUCTION 5
I.2 Estimation des ressources éolienne en Algérie 6
I.3 Définition de l'énergie éolienne 7
I.4 Les différents types d'éoliennes 8
I.4.1 Eoliennes à axe vertical 8
I.4.1.1 Le rotor Darrieus 8
I.4.1.2 Le rotor Savonius 9
I.4.2 Les éoliennes à axe horizontal 9
I.4.2.1. Eoliennes rapides 10
I.4.2.2. Eoliennes lentes 10
I.5 Principaux composants d'une éolienne 11
I.6. Modèle de la turbine 17
I.6.1. Loi de Betz 17
I.6.2. Modélisation de la turbine 19
I.6.2.1. La puissance d'une éolienne 19
I.6.2.2. La puissance aérodynamique 19
I.6.2.3. Modélisation du coefficient de puissance Cp 20
I.6.2.4. Modèle du Multiplicateur 21
I.6.2.5. Equation dynamique de l'arbre 21
I.7. Les éoliennes à vitesse fixe 21
I.8. Les éoliennes à vitesse variable basées sur une MADA 22
I.9. Régulation Mécanique de la Puissance d'une Eolienne 23
I.9.1. Contrôle par décrochage aérodynamique passif (passive stall) 24
I.9.2. Contrôle par décrochage aérodynamique actif 24
I.9.3. Contrôle par angle de calage variable (pitch control) 24
I.10. L'Etude d'une MPPT d'une éolienne 25
I.11. Intérêt de la vitesse variable 26
I.12. Stratégies de commande de la turbine éolienne 26
I.13. Optimisation de la conversion énergétique 28

I.14. Techniques d'extraction du maximum de la puissance 29
I.14.1. Maximisation de la Puissance avec asservissement de la vitesse 30
I.14.1.1. Conception du correcteur de vitesse 31
I.15.Simulations et Interprétations des Résultats 32
I.16. CONCLUSION 34

Chapitre II : *modélisation de l'ensemble MADA-Convertisseur*

II.1. Introduction 37
II.2. Description de la MADA 37
II.3.Applications des machines asynchrones à double alimentation 37
II.4. Avantages et inconvénients de la MADA 38
II.4.1. Avantages de la MADA 38
II.4.2. Inconvénients de la MADA 38
II.5. Mode de Fonctionnement de la MADA a vitesse variable 39
II.5.1 Cas moteur 39
II.5.1.1. Fonctionnement moteur hyposynchrone (g > 0) 39
II.5.1.2. Fonctionnement moteur hypersynchrone (g < 0) 39
II.5.2. Cas générateur 40
II.5.2.1. Fonctionnement générateur hyposynchrone (g>0) 40
II.5.2.2. Fonctionnement générateur hypersynchrone (g<0) 40
II.6. Modélisation de la Machine Asynchrone Double Aimantation (MADA) dans le plan ABC 41
II.6.1. Hypothèses simplificatrices 41
II.6.2. Les équations électriques 41
II.6.3. Les équations magnétiques 42
II.6.4. Equation mécanique 43
II.7. Modèle de la MADA dans le repère de PARK 43
II.7.1. Intérêt de la transformation de PARK 44
II.7.2. Modélisation de la MADA dans le repère de PARK 45
II.8. Référentiel lié au champ tournant 46
II.9. Mise sous forme d'équations d'états 46
II.10. Simulation des résultats 47
II.11.Onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC 50
II .12.Modélisation du fonctionnement de l'onduleur à trois niveaux 50
II.12.1. Structure de l'onduleur triphasé à trois niveaux 50
II.12.2. Modélisation du fonctionnement d'un bras de l'onduleur à trois niveaux 51

II.1.12.3. Différentes configuration d'un bras d'onduleur à trois niveaux 51
II.13. Modèle de connaissance à trois et de commande de l'onduleur 53
II.13.1. Commandabilité des convertisseurs statiques 53
II.13.2 Fonction de commande 53
II.13.3. Commande complémentaire 53
II.13.4. Fonction de conversion 54
II.14. Stratégie de commande de l'onduleur de tension à trois niveaux à structure NPC 55
II.14.1 Commande par modulation vectorielle 56
II.14.2 Choix des porteuses 56
II.15. Résultats de simulation et interprétation 56
II.16. Conclusion 59

Chapitre III : *Commande vectorielle de la puissance*

III.1 INTRODUCTION: 61
III .2. La Commande Vectorielle de la MADA 61
III.3. Principe de la commande vectorielle 61
III.4. Procédé d`orientation du flux 63
III.5. Commande vectorielle de la MADA par des puissances 63
III.5.1. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique 64
III.5.2. Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques 64
III.5.3. Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques 65
III.5.4. Commande indirecte de la MADA 67
III.6. Simulation et Interprétations des Résultats 69
III.7. CONCLUSION 72

Chapitre IV

IV.1. INTRODUCTION 74
IV.2. PRINCIPE DE LA COMMANDE DIRECTE DU COUPLE 74
IV.3. La commande directe du couple (DTC) appliqué à la DFIG 76
IV.4.Contrôle du flux rotorique 77
IV.5.Contrôle du couple électromagnétique 80
IV.6. Estimation du flux rotorique et du couple électromagnétique 82
IV.8. Cas d'une alimentation par un onduleur à trois niveaux 82
IV.9. Résultats de la simulation et interprétation 84
IV.10. CONCLUSION 86
CONCLUSION GÉNÉRALE 87

Annexe 1 : correcteur de la vitesse.....89
BIBLIOGRAPHIE .....**Erreur ! Signet non défini.**

LISTE DES FIGURE

Figure I.1. Croissance mondiale de puissance installée d'énergie éolienne dans le monde. 5
Figure I.2: Carte annuelle de la vitesse Moyenne du vent à 10m du sol (m/s). 7
Figure I.3: Conversion de l'énergie cinétique du vent. 7
Figure I.4. Eoliennes à axe vertical. 8
Figure I.5: Différentes déclinaisons des éoliennes de type Darrieus. 9
Figure I.6: éoliennes de type Savonius. 9
Figure I.7 : Les éoliennes à axe horizontal 10
Figure I.8 :l'influence de vent sur éolienne. 10
Figure I.9 :Principaux composants d'une éolienne.....10
Figure I.10: Montage d'un mât tubulaire 11
Figure I.11 : Tour en treillis métalliques 11
Figure I.12 :La Nacelle. 12
Figure I.13 :Les Pales 12
Figure I.14 :Le rotor.....13
Figure I.15 : Chaîne de fabrication de générateurs d'éoliennes. 13
Figure I.16 : Le multiplicateur.....14
Figure I.17 : L'arbre de transmission. 14
Figure I.18:Girouette 14
Figure I.19 : Anémomètre 15
Figure I.20 : Système d'orientation de la nacelle 15
Figure I.21: Système de contrôle (commande).....16
Figure I.22: La fondation en béton 16
Figure I.23 :principe de la théorie de Betz.....17
Figure I.24:Schéma de la turbine éolienne.....19
Figure I.25: système à vitesse fixe 21
Figure I.26: Eoliennes à vitesse variable.....22
Figure I.27:Méthodes de contrôle de la puissance captée par la turbine. 23
Figure I.28 :Schéma bloc du modèle de la turbine 25

Figure I.29 :La puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent. 26
Figure I.30 : Caractéristique de puissance vitesse d'une éolienne de grande puissance. 27
Figure I.31 : Influence de l'angle de calage β sur le coefficient de puissance. 28
Figure I.32 : Stratégie de commande de la turbine étudiée. 30
Figure I.33 :La maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse 32
Figure. I.35 :Le profil du vent 33
Figure I.36 : Puissance au niveau de la turbine.de la vitesse 33
Figure I.37 :la vitesse de rotation du rotor 33
Figure I.38 :Puissance de l'éolienne en fonction de la vitesse de la turbine du vent MPPT 34
Figure. II.1: Machine asynchrone à rotor bobiné avec des bagues collectrices. 37
Figure II.2 : Les différentes configurations de fonctionnement de la MADA. 40
Figure II.3: Représentation spatiale de la MADA. 41
Figure II.4: Repère référentiel de PARK 44
Figure II.5 : performances de la conduite de la MADA 48
Figure II.6 : performances de la conduite de la GADA 49
Figure II.7 : Structure Générale de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC 51
Figure II.8 : Les différentes configurations possibles d'un bras d'onduleur à trois niveaux 52
Figure II.9 : Les tensions porteuses et tensions de références 57
Figure II.10 : Les tensions simples Va et son spectre d'harmonique de l'onduleur à trois niveaux Commandé par la modulation vectorielle avec deux porteuses (r=0.8). 58
Figure III.1 : Principe de la commande vectorielle 62
Figure III.2 : position du référentiel par rapport au flux 62
Figure III .3 : Schéma bloc de la MADA. 66
Figure III .4 : Schéma bloc de la commande directe 67
Figure III.5 : schéma bloc de la commande indirecte. 68
Figure III.6. Schéma bloc de la régulation du courant 69
Figure III.7: Représentation le courant (iar) de la MADA par la commande vectrorielle en puissance active et réactive 70
Figure. IV.1: Structure de base de la commande directe du couple selon TAKAHASHI 75
Figure. IV.2: Représentation des flux statorique et rotorique 77
Figure. IV.3: Sélection des tensions correspondant au contrôle du flux 79
Figure.IV.4: Contrôleur à hystérésis a deux niveaux 80
Figure IV.5 : Comparateur a hystérésis a trois niveaux utilises pour le réglage du couple électromagnétique 81
Figure IV.6: Vecteurs des tensions et les états des interrupteurs d'un onduleur à trois niveaux 83
Figure IV.7: Correcteur à hystérésis: a)du flux statorique, b) du couple électromagnétique 84

Figure IV.8:les caractéristiques du MADA contrôlé par la DTC avec un fonctionnement Asymétrique de l'onduleur à trois niveaux.....86

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1. Grandeurs électriques correspondantes à chaque configuration d'un bras de l'onduleur à trois niveaux.....52

Tableau IV.1: Table de vérité de la DTC dans le cas d'un onduleur à trois niveaux.....84

NOTATIONS

m	: La masse de l'air traversant la surface balayée par le rotor en une seconde
ρ	: La densité de l'air qui est égale à 1.225kg /m3 a la pression atmosphérique a 15°C.
S	: La surface d'air en m² balayée par les pales
C_p	: Le coefficient de puissance de la turbine
λ	: La vitesse spécifique
β	: Angle de calage
G	: Gain du multiplicateur
P_{aero}	: Puissance aérodynamique
V	: La vitesse du vent en m/s
R	: Le rayon de la pale en m
$\Omega_{.turbine}$	: Vitesse de rotation de la turbine rad/s
C_{aer}	: Couple aérodynamique
C_g	: Couple issu du multiplicateur
J_t	: l'inertie totale qui apparait sur le rotor de la génératrice
C_{mec}	: Couple mécanique
C_{vis}	: Couple de frottement visqueux
f	: Coefficient de frottement visqueux
C_{em-ref}	: Couple électromagnétique de référence
$C_{aer-estime}$	: Couple aérodynamique estime
V_{estime}	: Vitesse du vent estimé
Ω_{mec}	: Vitesse de rotation mécanique
M.P.P.T	: Maximum Power Point Tracking
Ω_1	: Vitesse de rotation de la turbine avant multiplicateur
Ω_2	: vitesse de rotation de la turbine après multiplicateur
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
MAS	: Machine Asynchrone à Cage
MADA	: Machine Asynchrone à Double Alimentation
MCC	: Machine à Courant Continu
IGBT	: Insulate Gâte Bipolar Transistor

F.O.C : Field-Oriented-Control

MLI :Modulation de Largeurs d'Impulsions

s, r : Indice correspondants au stator et rotor

as, bs, cs : Indice des phases statorique

Ar, Br, Cr : Indice des phases rotorique

d, q : Les axes correspondant au référentiel lié au repère de PARK

p : Nombre de paire de pole

F : La fréquence du réseau

g : Le glissement

Ω_s : La vitesse synchrone

Ω_r : Vitesse de rotation mécanique

V_{as}, V_{bs}, V_{cs} : Les tensions des trois phases statoriques

$I_{as}, I_{bs,} I_{cs}$: Les courants des trois phases statoriques

$I_{ar}, I_{br,} I_{cr}$: Les courants des trois phases rotoriques

$\phi_{as,} \phi_{bs,} \phi_{cs}$: Les flux des trois phases statorique

$\phi_{ar}, \phi_{br,} \phi_{cr}$: Les flux des trois phases rotorique

R_a, R_b, R_c : Resistance statorique des trois phases abc

$R_A, R_{B,} R_C$: Resistance rotorique des trois phases ABC

R_s, R_r : Résistance statorique et rotorique

$[L_s], [L_r]$: Les matrices des inductances statoriques et rotoriques

l_s, l_r : Les inductances de fuites des statoriques et rotoriques

M_s, M_r : Les inductances de fuite mutuelle (stator, rotor)

$[M_{sr}]$: La matrice des inductances mutuelles entre le stator et rotor

θ : La position angulaire du rotor par rapport au stator

θ_s, θ_r : Angle électrique statorique, rotorique

ω : Pulsation du réseau

C_{em} : Couple électromagnétique

J : Le moment d'inertie de la machine

f : Le coefficient de frottement

C_r : Couple résistant

ω_r, ω_s : Les pulsations électriques respectivement du rotor et du stator

ω_a : Vitesse angulaire électrique

$[P(\theta)]$: La matrice de PARK

$[P(\theta)]^{-1}$: La matrice inverse de PARK

T_s, T_r : La constante de temps statorique et rotorique

L_m : Inductance mutuelle cyclique

$\phi_{dm}\ \phi_{qm}$: Les flux d'entrefer dans le référentiel (d, q)

X	: Vecteur d'état
V_{sdq}	: Tension statorique dans le référentiel (d, q)
I_{sdq}, I_{rdq}	: Courant statorique et rotorique dans le référentiel (d, q)
ϕ_{sdq}, ϕ_{rdq}	: Les flux statorique et rotorique dans le référentiel (d, q)
Fp	: La fréquence de la porteuse
$\cos \varphi$	: Facteur de puissance
M	: L'indice de modulation
PI	: Régulateur proportionnel-intégral
K_p	: Le gain proportionnel du régulateur PI (Proportionnel - Intégral)
K_i	: Le gain intégral du régulateur PI (Proportionnel Intégral)

INTRODUCTION GENERAL

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2 000 ans avant J.-C environ **[1].**

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

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

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones **[16].**

Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettent de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne. Le développement de la technologie des aérogénérateurs a permis à celle-ci de devenir une alternative aux sources traditionnelles. L'énergie éolienne est véhiculée par le vent, celle-ci est due indirectement à l'énergie solaire qui, en créant des différences de température entre les régions chaudes et les régions froides, provoque des vents. Un aérogénérateur (couramment appelé "éolienne") est une machine qui utilise l'énergie éolienne (l'énergie cinétique du vent) pour produire de l'énergie électrique. Le vent est une ressource propre et inépuisable qui peut produire d'électricité pratiquement sans l'émission des gaz polluants **[16]**.

Pour présenter ce travail, nous avons organisé notre mémoire de la manièresuivante :

Le premier chapitre est consacré à la modélisation des constituants de la turbine éolienne. Les modèles présentés permettent de simuler le comportement dynamiquede la turbineéolienne pour les différentes conditions de fonctionnement afin de développerune architecture qui permet un meilleur transfert d'énergie éolienne.on a essayé de voir l'intérêt de la vitesse variable dans l'extraction de puissancemaximal et les différentes techniques d'un MPPT (Maximum Power Point Tracking).Le but de ce contrôle est la recherchepermanente de ce maximum qui nous permet de réduirele cout du kWh produit.

Dans le deuxième chapitre, on a présenté la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) ainsi concerne la modélisation et la commande d'un onduleur a trois niveaux a structure NPC

Dans le troisième chapitre, on a présenté la commande vectorielle en puissance active et réactive de cette dernière qui est entrainé par une vitesse fixe. Les résultats de simulation par MATLAB-Simulink seront présentés.

Dans la dernière chapitre présenté la commande directe du couple et flux,et on terminera par une conclusion générale qui résume les principaux résultats auxquels nous avons abouti et quelque perspective de recherches envisagée

Chapitre I : Etat de l'art des éoliennes

I.1. INTRODUCTION

Parmi toutes les énergies renouvelables contribuant à la production d'électricité, l'énergie éolienne tient actuellement le rôle de vedette, elle est l'une des plus prometteuse, en terme d'écologie, de compétitivité, de champ d'application et de création d'emplois et de richesses. Le développement durable et les énergies renouvelables suscitent aujourd'hui l'intérêt de plusieurs équipes de recherches. Ainsi, le développement des éoliennes représente un grand investissement dans le domaine de la recherche technologique. Ces systèmes qui produisent de l'énergie électrique à partir du vent peuvent constituer une alternative technologique et économique aux différentes sources d'énergies épuisables. D'ailleurs, la croissance de l'industrie éolienne mondiale est de l'ordre de 30 % par an depuis le début des années 2001(Figure I.1)[1]. L'utilisation des aérogénérateurs présente des avantages importants. En effet, ils sont pour l'instant l'un des moyens les plus écologiques d'obtenir de l'électricité et cette source est inépuisable. Cependant le coût de l'énergie éolienne est encore trop élevé pour concurrencer les sources traditionnelles.

De nombreux travaux de recherche sur la commande d'éoliennes ont été menés. Grâce à eux, les dernières générations d'éoliennes fonctionnent avec une vitesse variable et disposent d'une régulation pitch. Nous pouvons modifier ainsi la vitesse de rotation et l'angle de calage de chacune des pales, nous permettant ainsi d'améliorer la production de l'aérogénérateur. Néanmoins, il reste encore à introduire plus d'intelligence dans le fonctionnement des aérogénérateurs.

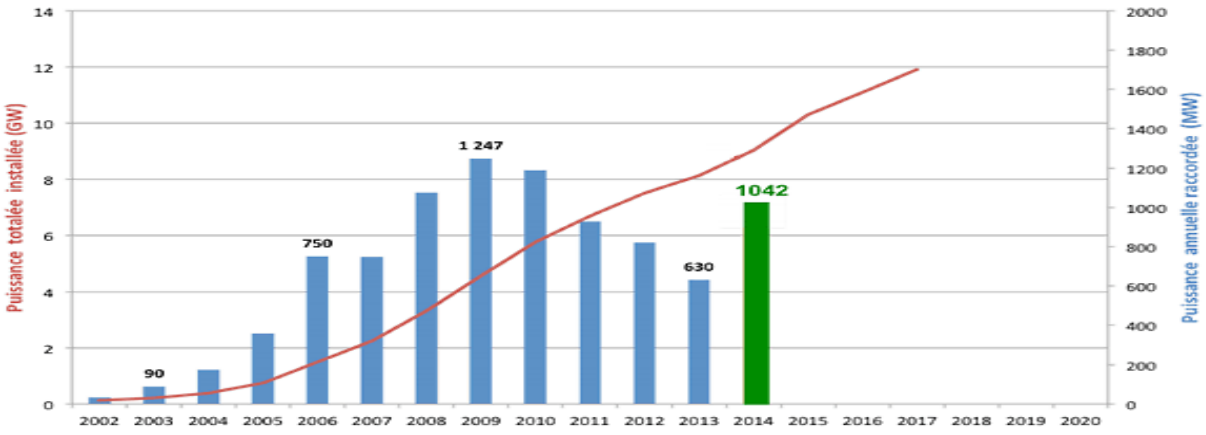


Figure I.1. *Croissance mondiale de puissance installée d'énergie éolienne dans le monde.*

I.2 Estimation des ressources éolienne en Algérie

L'estimation des ressources éoliennes d'un pays en constitue une importante étape, une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent, a permis de faire une première identification des régions ventées de l'Algérie. Cette représentation de la vitesse sous forme de carte a deux objectifs : le premier est d'identifier les vastes régions avec de bonnes promesses d'exploitation de l'énergie éolienne. Le second est de mettre en évidence la variation relative des ressources à travers l'Algérie. La carte représentée dans la (Figure I.2), montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement le Sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar.

Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne [2].La comparaison à l'aide de Cette carte à différentes périodes de mesure permet de déterminer les régions les mieux ventées.

- Au Sud les régions sont : Ain Salah, Timimoun, Bordj Badji Mokhtar, Tindouf, Adrar.
- Au Nord les régions sont : El Kala, Ghardaïa, M'sila, Barika, Biskra, Tiaret, El Kheiter[11].

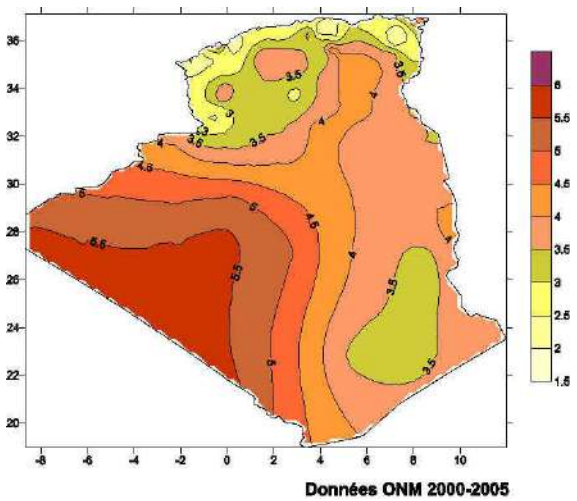


Figure I.2:*Carte annuelle de la vitesse Moyenne du vent à 10m du sol (m/s).*

I.3 Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure I.3).

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 de vitesse du vent est la plus élevée. De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [6].

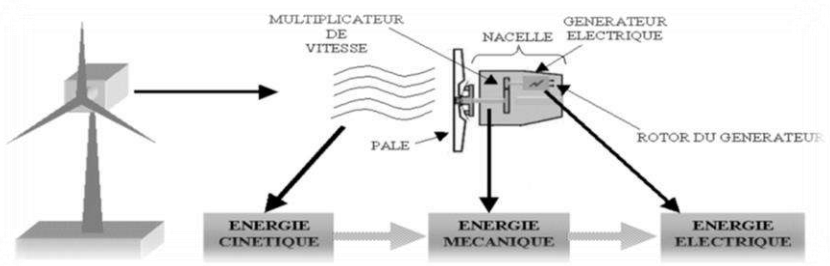


Figure I.3:*Conversion de l'énergie cinétique du vent.*

I.4 Les différents types d'éoliennes

Il y a deux types de turbines éoliennes;

I.4.1 Eoliennes à axe vertical

Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage le mat souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi le constructeur à abandonner pratiquement ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances)[4].



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

Figure I.4.*Eoliennes à axe vertical.*

Donc Plusieurs solutions d'éoliennes à axe vertical ont été expérimentées comme montre la (Figure I.4).

I.4.1.1 Le rotor Darrieus

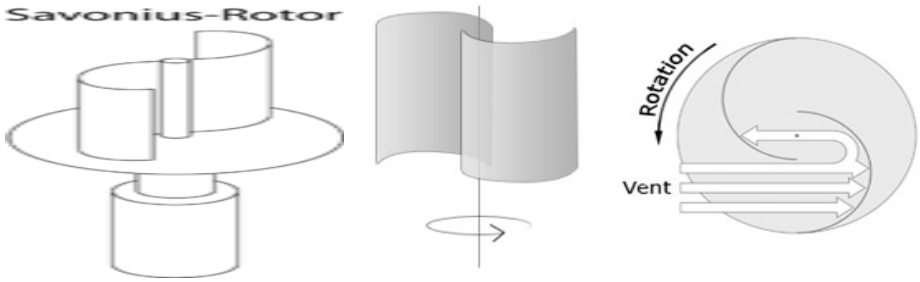
D'après l'ingénieur français Georges Darrieus qui en breveta la conception en 1931, il est constitué de deux ou trois pales en forme de « C ». On distingue plusieurs déclinaisons autour de ce principe, depuis le simple rotor « H » à deux profils, jusqu'au rotor parabolique où les profils sont recourbés en troposkine et fixés au sommet et à la base de l'axe vertical, en passant par le rotor hélicoïdal [3] (Figure I.5).



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

I.4.1.2 Le rotor 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)[5].



a) savonius-Rotor b) demi-cylindres c) sphérique

Figure I.6:*éoliennes de type Savonius.*

I.4.2 Les éoliennes à axe horizontal

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues car leur rendement est supérieur à celui de toutes les autres éoliennes. Elles sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent dont les premiers spécimens apparurent en Egypte antique et en Perse. Ces éoliennes captent le vent à des hauteurs loin du sol, là où il est nettement plus fort. Elles comportent un nombre variable de pales profilées aérodynamique ment comme les ailes d'un avion (Figure I.7).



a) multipales. b)tripales. c) bipales.

Figure I.7 :*Les éoliennes à axe horizontal*

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).

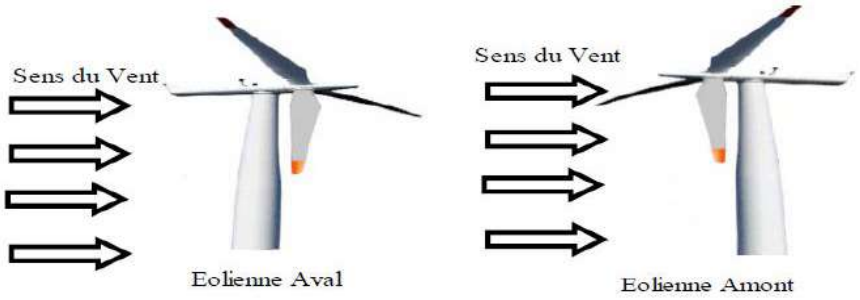


Figure I.8 :*l'influence de vent sur éolienne.*

I.4.2.1. Eoliennes rapides

Les éoliennes rapides (Figure I.7.b) et (Figure I.7.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 [7].

I.4.2.2. Eoliennes lentes

Les éoliennes lentes (Figure I.7.a) sont munies d'un grand nombre de pales entre (20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8m. 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 [4].

I.5 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.

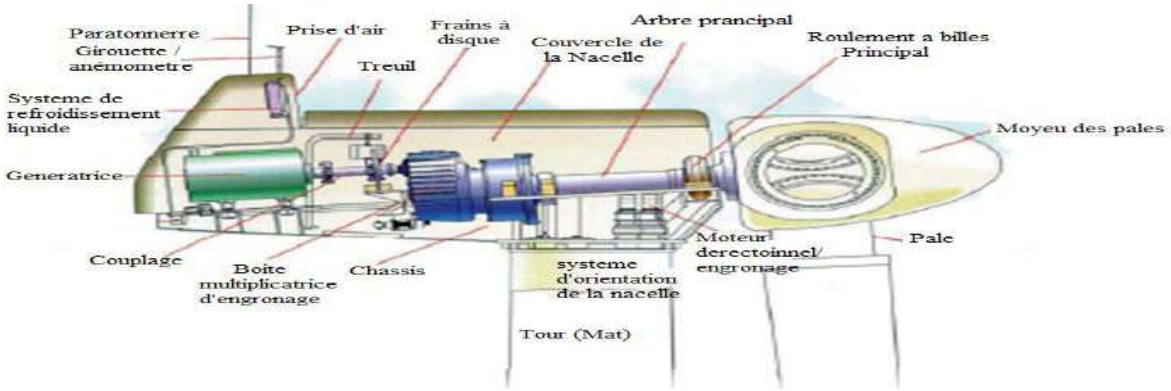


Figure I.9. *Principaux composants d'une éolienne.*

- ✓ La tour (mat)

C'est un élément porteur, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, il doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol (entre 60 et 100 mètres) [7]. La tour à une forme d'un tronc en cône où à l'intérieur est disposée 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.10:*Montage d'un mât tubulaire*



Figure I.11 :*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.

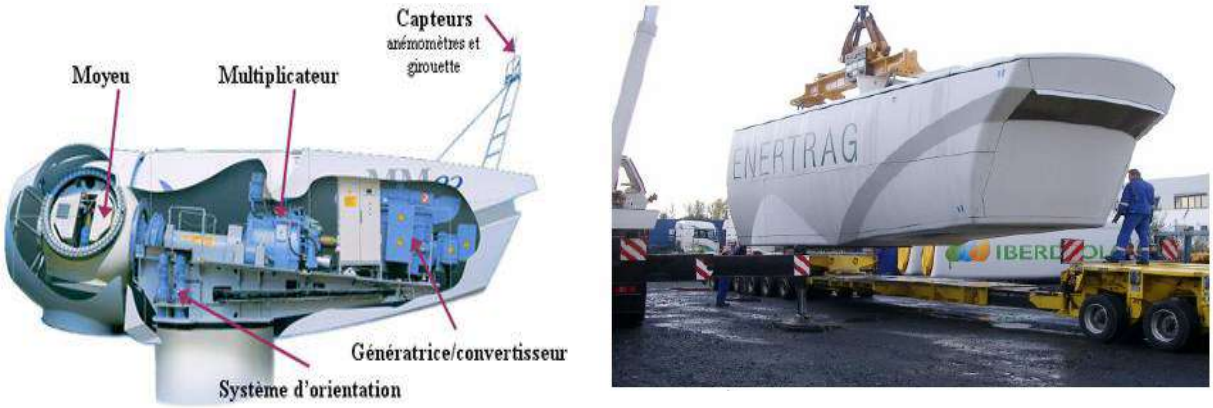


Figure I.12 :*La Nacelle.*

✓ Les pales

Les pales sont généralement en fibre de verre, Leur diamètre varie en fonction de la puissance désirée (entre 7m et 72m)[6].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.13 :*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.14 :*Le rotor*

✓ La génératrice

La génératrice est un alternateur qui transforme l'énergie mécanique en énergieélectrique. Elle peut être synchrone ou asynchrone.

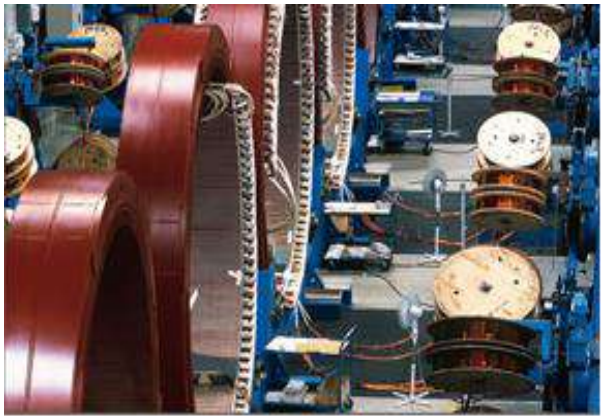


Figure I.15 :*Chaîne de fabrication de générateurs d'éoliennes.*

✓ 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.

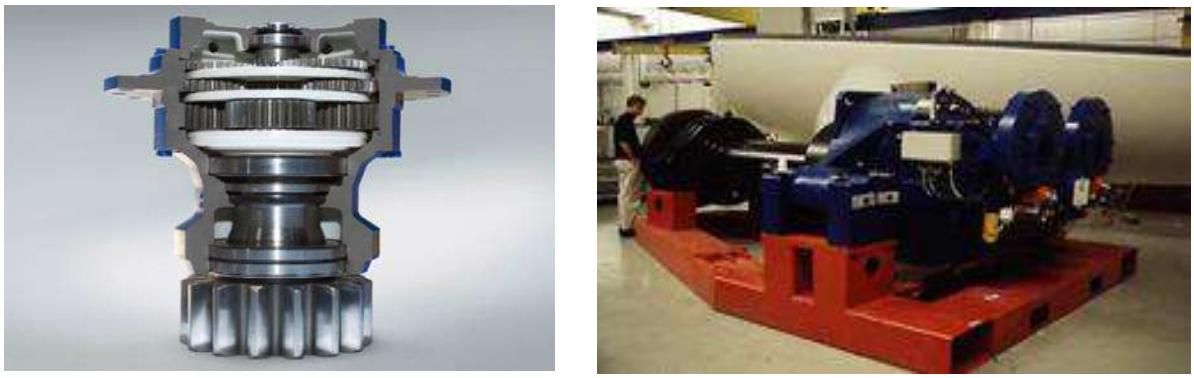


Figure I.16 : ***Le multiplicateur***

✓ L'arbre de transmission

Il est composé de deux arbres:

• L'arbre primaire: cet arbre transmet l'effort fourni par le rotor au multiplicateur. Il est dit arbre lent, car il tourne à des vitesses comprises entre (20 - 40 tr/min)[7].

• 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.17) [6].

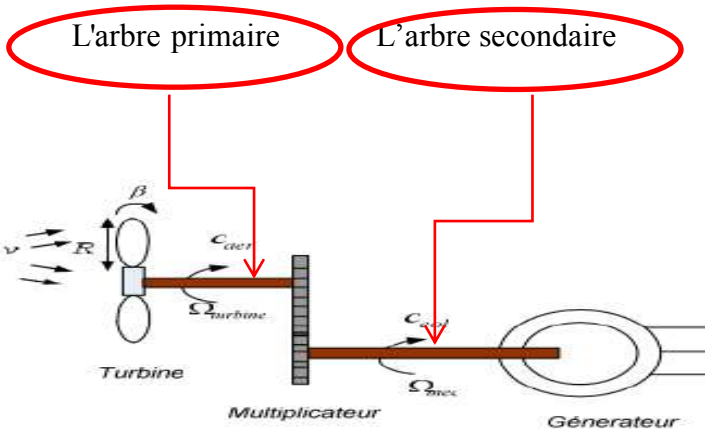


Figure I.17 :*L'arbre de transmission***.**

✓ Le système de refroidissement

Il comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur qui encaisse les efforts mécaniques d'un arbre à l'autre.

✓ Les outils de mesure du vent

Nous avons deux types : une girouette (Figure I.18) pour évaluer la direction du vent et un anémomètre (Figure I.19) pour en mesurer la vitesse.

✓ Anémomètre

Les signaux électriques émis par l'anémomètre sont utilisés par le système de control 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 est supérieure à 25m/s pour assurer la protection de l'éolienne [8].



Figure I.18:*Girouette*



Figure I.19 :*Anémomètre*

✓ Système d'orientation de la nacelle

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

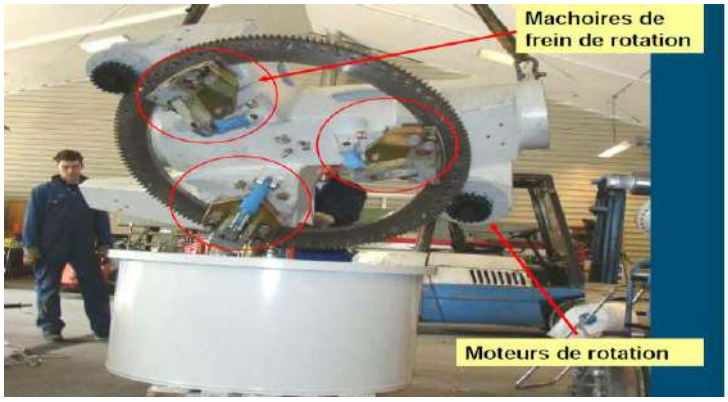


Figure I.20 :*Système d'orientation de la nacelle*

✓ Système de contrôle (commande)

Il comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation. En cas de surchauffe du multiplicateur ou de génératrice le système arrête automatiquement l'éolienne, et le signale à l'ordinateur de l'opérateur via un mod**em téléphonique [7].**



Figure I.21:*Système de contrôle (commande).*

✓ 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.22:*La fondation en béton*

I.6. Modèle de la turbine

I.6.1. Loi de Betz

Les types de modèles utilisés dans le domaine de l'énergie éolienne sont aussi nombreux que les objectifs fondamentaux pour les quels ces modèles sont développés.

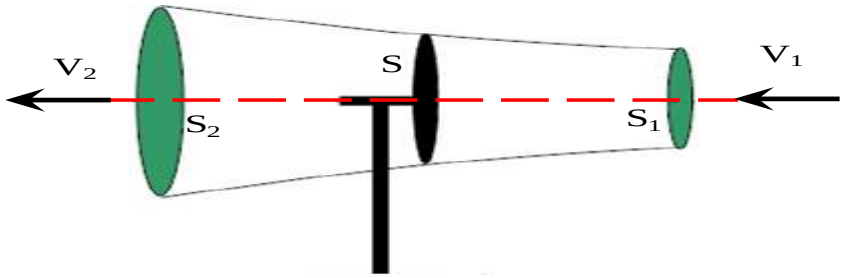


Figure I.23 :*principe de la théorie de Betz*

Pour capter de l'énergie, la vitesse du vent V_2 traversant la section S_2, en aval du disque est nécessairement inférieur à la vitesse V_1 traversant la section S_1 en amont du disque. Il en résulte une perte de quantité de mouvement axiale dans le sillage (en aval du disque). Le débit d'air doit cependant rester constant, le tube de courant doit donc s'élargir après le passage du disque [3].

La variation de l'énergie cinétique E_c de la masse d'air qui traverse par seconde le rotor de la turbine est :

$$\Delta \boldsymbol{E_c} = \frac{1}{2}(\rho . S_1 . {V_1}^3 - \rho . S_2 . {V_2}^3) \qquad \textbf{[I.1]}$$

La masse d'air M déplacée par seconde est:

M= $\rho . V_1 . S_1 = \rho . V_2 . S_2 = \rho$.V.S (théorie de la conservation de masse).

Donc : $S_1 = \frac{S\,V}{V_1}$ et : $S_2 = \frac{S\,V}{V_2}$

Alors;

$$\Delta E_c = \frac{1}{2}\rho \text{.S.V. } (V_1 + V_2) . (V_1 - V_2) \qquad \textbf{[I.2]}$$

D'autre part, d'après le théorème d'Euler, la force F exercée sur le moteur éolien par l'air est égale à la variation de la quantité de mouvement du fluide lors de la traversée de la surface

On a: $$F = M.V_1 - M V_2 = \rho S V (V_1 - V_2) \quad \textbf{[I.3]}$$

Le travail produit par cette force dont le point d'application se déplace avec une vitesse V en une seconde L=V.t (t=1s), par rapport aux molécules d'air en mouvement, est la puissance absorbée par le rotor éolien est:

$$P_a = F V = \rho s v^2 (V_1 - V_2) \quad \textbf{[I.4]}$$

La variation d'énergie cinétique E_c est donc égale à la puissance Pa (théorème d'Euler) d'où:

$$\frac{1}{2}\rho.s.v (V_1+V_2) . (V_1-V_2)=\rho S V_2 (V_1-V_2) \quad \textbf{[I.5]}$$

Cette dernière relation donne la vitesse V au niveau des pales:

$$V= \frac{1}{2}(V_1+V_2) \quad \textbf{[I.6]}$$

Remplaçant V par cette valeur dans l'expression de la puissance Pa:

$$P_a=\frac{1}{4}\rho S (V_1+V_2)^2 (V_1-V_2) \quad \textbf{[I.7]}$$

PuisqueV_2 est inférieure à V_1 on introduit un paramètre a qui est le facteur d'induction axiale compris entre 0 et 1.

Tel que : $V_2 = a V_1$

La puissance devient: $$P_a= \frac{1}{4}\rho s V_1^3(1+ a)^2 (1- a) \quad \textbf{[I.8]}$$

Elle est maximale pour $$\frac{d Pa_{max}}{d a} = 0$$

$$\frac{d Pa}{d a} = \frac{1}{4}\rho S V_1^3 [2 (1+ a) (1- a) - (1+ a)^2] =\frac{1}{4}\rho s V_1^3 (-3 a^2 -2 a+1) = 0$$

Donc: $a= \frac{1}{3}$

Dans ces conditions la formule de Betz est :

$$P_{a\,max}= \frac{16}{27}(\frac{1}{2}\rho s V_1^3) = \frac{1}{2}\rho Cp\ max .S.V_1^3 \quad [I.9]$$

Et ainsi le rendement théorique maximal est:$\eta_{max}= \frac{t . P_{a\,max}}{E_c}$

$\eta = \frac{16}{27}$ =0.593

I.6.2. Modélisation de la turbine

La turbine qui sera modélisé comporte trois pales de longueur R, fixées sur un arbre l'entraînement tournant à une vitesse turbine, qui entraînera une génératrice (MADA) à travers un multiplicateur de vitesse de gain G (Figure I.6).

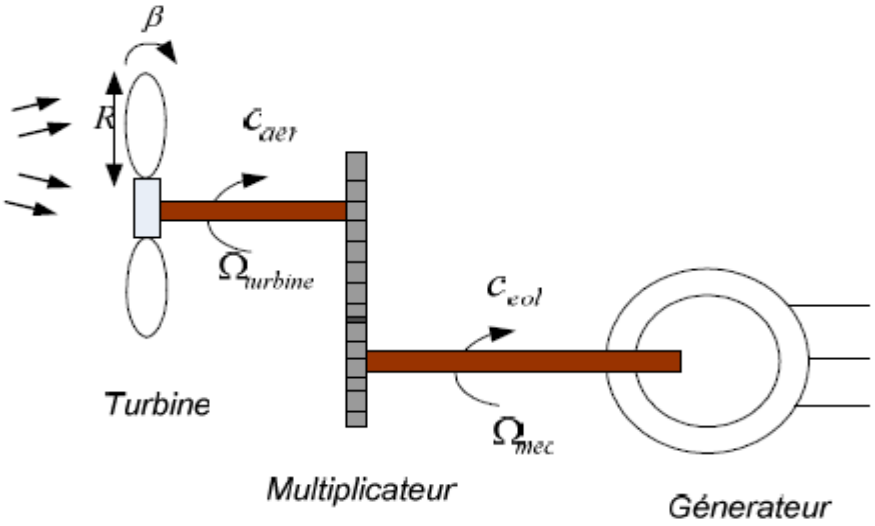


Figure I.24:*Schéma de la turbine éolienne*

I.6.2.1. La puissance d'une éolienne

La puissance cinétique du vent à travers un disque éolien de rayon R, est donnée par la relation suivante [5]:

$$Pv = \frac{1}{2}\rho.S.V_1^3 = \frac{1}{2}.\rho.\pi.R^2.V_1^3. \quad [I.10]$$

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

I.6.2.2. La puissance aérodynamique

Toutefois, toute l'énergie ne peut être captée, car la vitesse du vent n'est pas nulle après l'éolienne. On introduit alors un coefficient Cp appelé coefficient de performance, qui dépenddes

caractéristiques aérodynamiques des pales. Ce coefficient correspond au rendement du rotor de l'éolienne. La puissance sur l'arbre du rotor où la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit [3], [10]:

$$P_m = Cp.Pv = \frac{1}{2} C_P(\lambda, \beta).\rho.\pi.R^2.V^3 \quad [I.11]$$

I.6.2.3. Modélisation du coefficient de puissance Cp

La performance aérodynamique d'une turbine éolienne à axe horizontal s'exprime par le coefficient de puissance Cp. La valeur maximale théorique possible de ce coefficient, appelé limite de Betz est de 16/27 [I.9]. Il est variable et dépend de la caractéristique de la turbine et de la vitesse du vent. Il est souvent représenté en fonction du ratio de la vitesse λ qui est défini par cette expression:

$$\lambda = \frac{R\,.\,\Omega}{V}$$

La turbine à vent est un système aérodynamique complexe à modéliser, cependant des modèles mathématiques simples sont souvent utilisés.

Cp représente le rendement aérodynamique de la turbine et dépend de la vitesse spécifique λ et de l'angle d'orientation des pâles β.

Pour la turbine utilisée dans cette étude, le coefficient de puissance est approché par la formule suivante [6]:

$$C_P(\lambda, \beta) = C_1\left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 - C_4\right).\exp\left(\frac{C_5}{\lambda_i}\right) + C_6.\lambda \quad [I.12]$$

Avec: $\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08.\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$;C_1=0.5176,C_2=116,C_3=0.4,C_4=5,C_5=21, C_6=0.0068.

En utilisant C_p, P_m et Ω_t (la vitesse de la turbine), le couple C_T produit par cette éolienne est alors déduit:

$$C_T = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{1}{2\Omega}.C_P(\lambda).\rho.\pi.R^2.V_1^3 \quad [I.13]$$

I.6.2.4. Modèle du Multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice, elle est modélisée mathématiquement par les équations suivantes:

$$Cg = \frac{C_{aer}}{G} \quad [I.14]$$

Pour la vitesse, on aura : $\Omega turbine = \frac{\Omega_{mec}}{G}$ [I.15]

I.6.2.5. Equation dynamique de l'arbre

La modélisation de la transmission mécanique se résume comme suit:

$$Jt\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum des.couples = Cmec \quad [I.16]$$

Le couple résistant aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f par $C_{vis} = C_{mec}.f$

I.7. Les éoliennes à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau, sa vitesse Ωmec est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice [12].

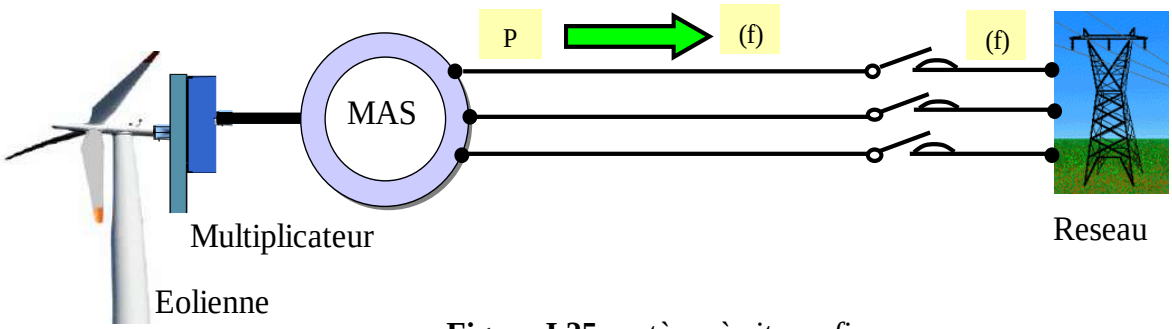


Figure I.25:*système à vitesse fixe*

Le couple mécanique entrainant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hypersynchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau. Pour une vitesse mécanique supérieure à la vitesse de synchronisme de la

génératrice il est nécessaire d'ajoute un multiplicateur pour adaptée la génératrice à celle du rotor de l'éolienne.

Parmi les avantages de fonctionnement a vitesse fixe:

- Système électrique plus simple;
- Plus grande fiabilité;
- Moins cher.

Néanmoins il possède les inconvénients suivants:

- Puissance extraite non optimisée;
- Pas de gestion de l'énergie réactive par le générateur;

I.8. Les éoliennes à vitesse variable basées sur une MADA

Des nombreuses études ont montrées l'intérêt des éoliennes à vitesse variable sur le plan énergétique et leur coût (du fait de l'évolution de l'électronique de puissance et de réglage supplémentaire) est compensé par le surplus de la production et même sur le plan de durée de vie [6].

Les éoliennes à vitesse variable permettent d'optimiser les conditions de fonctionnement de la turbine. La structure générale des éoliennes à vitesse variable basée sur une MADA est donnée par la (figure I.26):

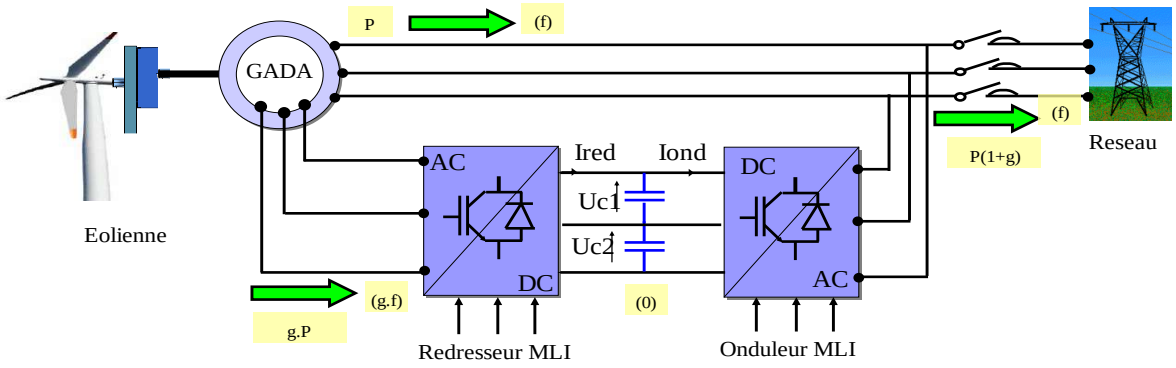


Figure I.26: *Eoliennes à vitesse variable*

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.

I.9. Régulation Mécanique de la Puissance d'une Eolienne

Les objectifs de la régulation permettent d'assurer la sécurité de l'éolienne par vents forts et de limiter la puissance mécanique. Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance dénommée puissance nominale P_n. La puissance P_n. est obtenue à partir d'une vitesse du vent V_n, dénommée vitesse nominale. Lorsque la vitesse du vent est supérieure àV_n. la turbine éolienne doit modifier ses paramètres afin d'éviter sa destruction mécanique, de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante.

Il existe trois méthodes de contrôle qui sont décrites sur la figure I.27. Elles servent principalement à limiter la puissance captée pour les vents forts mais certaines peuvent également intervenir pour faciliter la mise en rotation de la turbine [7].

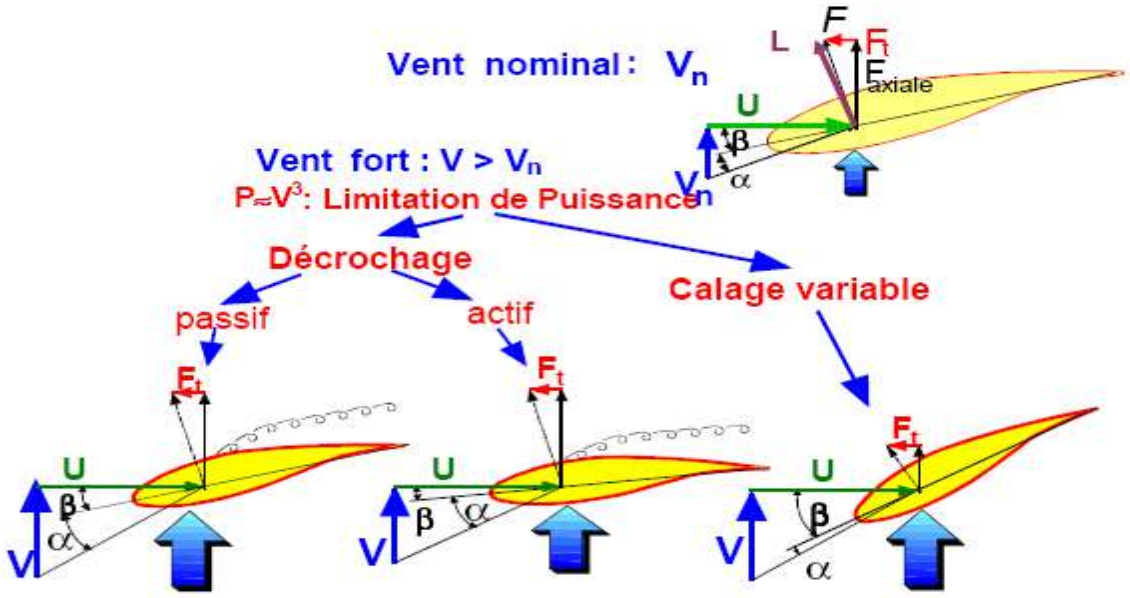


Figure I.27:*Méthodes de contrôle de la puissance captée par la turbine.*

I.9.1. Contrôle par décrochage aérodynamique passif (passive stall)

Ce concept simple et robuste parce qu'il ne fait pas 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 (coefficient C_D) 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 pas donc aucune possibilité d'adaptation.

I.9.2. 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.

I.9.3. 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 (si le générateur l'accepte) alors que la puissance transmise reste pratiquement constante.

La figure ci-dessous représente le schéma bloc de la turbine de l'éolienne .

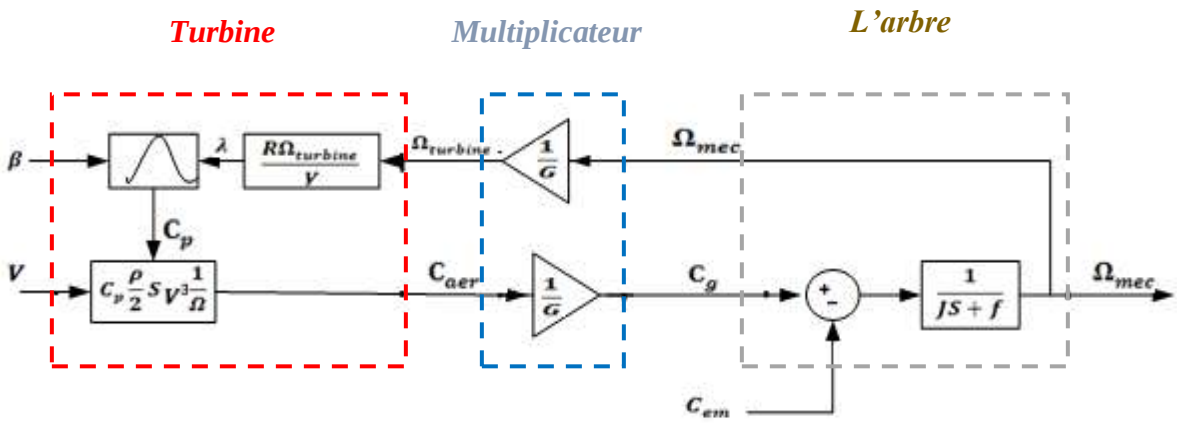


Figure I.28 :*Schéma bloc du modèle de la turbine*

Dans notre simulation d'une éolienne de 10kW, nous avons choisi un modèle tripale dont la longueur d'une pale est de 3m et le rapport du multiplicateur de vitesse est de 5,4.

La figure (I.35) présente le profil du vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne ainsi que l'allure de la vitesse du rotor. D'après cette figure, on remarque que la vitesse du rotor suit les variations du vent.

I.10. L'Etude d'une MPPT d'une éolienne

L'utilisation des turbines éoliennes à vitesse variable permet de régler la vitesse de variation de la génératrice. Ceci s'avère très utile pour extraire le maximum de puissance en charge partielle. Lorsqu'on trace les courbes donnant la puissance extraite en fonction de la vitesse de rotation de la génératrice, pour différentes vitesses de vent (Figure I.29), on s'aperçoit qu'elle passe chacune par un unique maximum. Le but de ce contrôle est la recherche permanente de ce maximum, technique que l'on retrouve sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking), ou la recherche du MPPT dans le plan courant - tension permet à terme de réduire le cout du kWh produit [5].

I.11. Intérêt de la vitesse variable

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse et représentée sur la figure I.29 :

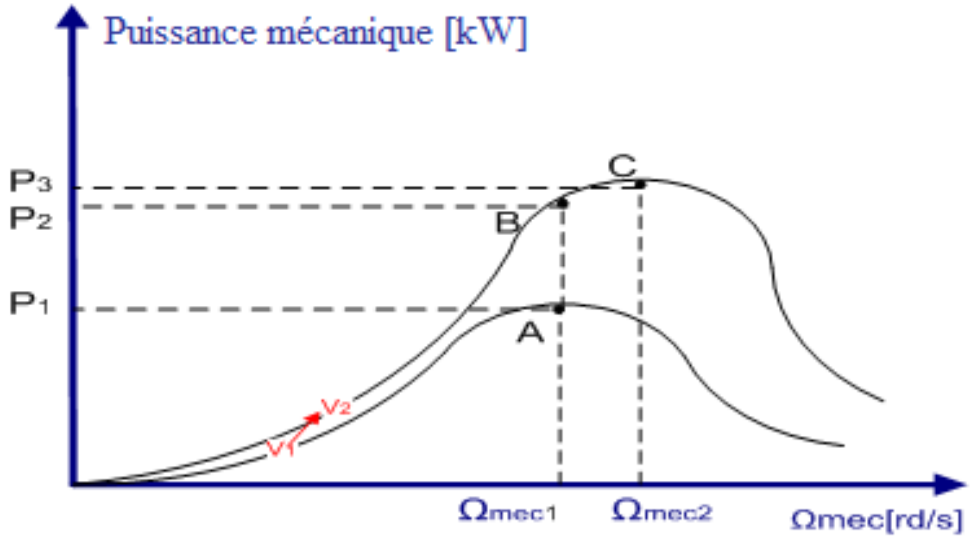


Figure I.29 :*La puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.*

Pour une vitesse de vent V_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ωmec1; on obtient une puissance nominal P1 (point A).si la vitesse du vent passe de V_1 a V_2 et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne a vitesse fixe), la puissance P2 se trouve sur la deuxième 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 (Ω_{mec2}).Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée [15].

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 ($\Omega_{mec\ réf}$) calculée pour maximiser la puissance extraite.

I.12. Stratégies de commande de la turbine éolienne

Pour l'énergie des éoliennes à axe horizontal, le couple de démarrage est plus grand lorsque le nombre de pales est élevé mais le domaine des vents exploitables est plus restreint.

Dans la phase d'exploitation, compte tenu du caractère très fluctuant du vent et aussi de la résistance limitée de la structure, on est amené à opérer deux types de réglage. En effet, pour garantir un captage maximal (optimal) de l'énergie incidente, il faut ajuster en permanence la vitesse de l'éolienne à la vitesse du vent et l'angle d'incidence des pales.

La caractéristique puissance-vitesse d'une éolienne se décompose en quatre zones (Figure I.30) :

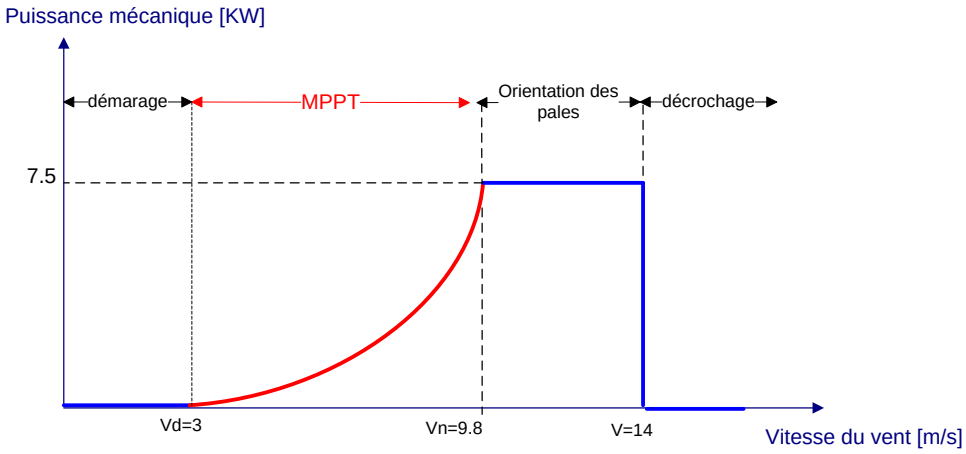


Figure I.30 :*Caractéristique de puissance vitesse d'une éolienne de grande puissance***.**

Il existe quatre zones principales peuvent être distingué :[5]

- la zone I: zone de démarrage de la machine où la vitesse du vent est inférieure à la vitesse de démarrage V_d de l'éolienne. Dans ce cas, la turbine ne fonctionne pas et ne produit donc pas d'énergie;
- la zone II: dont laquelle la vitesse vent est comprise entre $[V_d. V_n]$, correspond à la zone où il est possible d'extraire le maximum de la puissance.
- la zone III: où la puissance développée par l'éolienne est limitée à la puissance nominale P_n. à l'aide d'un système d'orientation des pales (pitch control).

En effet, au-delà de la «vitesse nominale» $V_n$du vent, le surcoût de dimensionnement (puissance du générateur, résistance mécanique des structures) ne serait pas amorti par le gain de production.

- la zone IV: lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse maximale admissible par l'éolienne V_M.. Dans ce cas, la turbine est arrêtée par le système d'arrêt d'urgence afin de protéger la partie mécanique de l'éolienne et d'éviter son endommagement.

En pratique, le passage de la zone 2 à la zone 3 est un peu particulier. En effet, la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique (Cem) dans la zone 2, et en zone 3, c'est la puissance qui est contrôlée par le dispositif d'orientation des pales.

I.13. Optimisation de la conversion énergétique

Le caractère aléatoire du vent pose le problème de la régulation de l'énergie fournie aux consommateurs par les aérogénérateurs.

L'optimisation de la puissance dans la charge, ou le réseau récepteur, peut s'effectuer par des commandes sur la turbine, sur la partie électrotechnique (générateur électrique lui-même et/ou paramètres de commande du convertisseur électronique de puissance).

Si la vitesse de rotation de l'éolienne est en permanence adaptée à la vitesse du vent, le lieu des points de fonctionnement à puissance maximale décrit la courbe de puissance de la zone II

L'objectif de la commande dans cette zone est de suivre la courbe de puissance maximale entre la vitesse du vent au démarrage et la vitesse du vent nominale, avec laquelle la vitesse de rotation est maximale et la puissance extraite est nominale.

Dans cette deuxième zone, afin d'avoir un Cp maximum donc une puissance maximale angle de calage des pales β est maintenu constant et définie d'après la figure suivante :

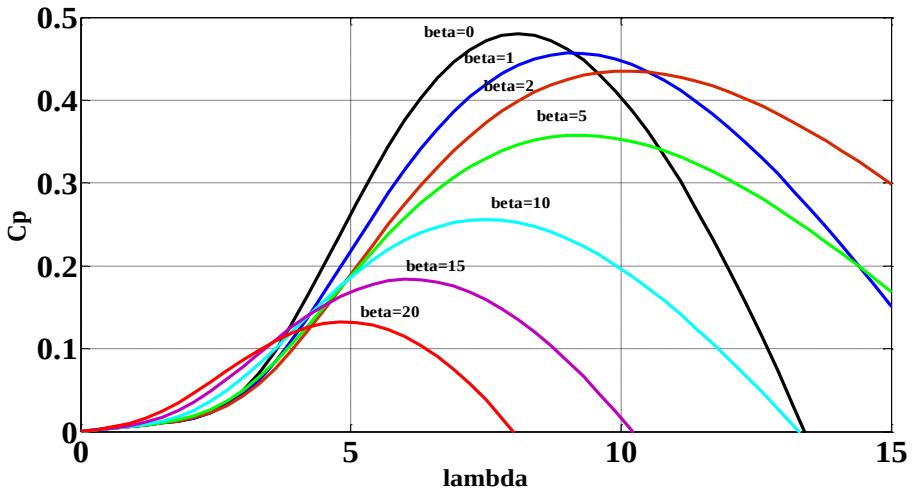


Figure I.31 : *Influence de l'angle de calage β sur le coefficient de puissance.*

La valeur maximale de Cp est atteinte pour $\beta = 0$ et $\lambda = 8.1$. Cette valeur particulière de λ est définie comme la valeur nominale λ_{nom}.

I.14. Techniques d'extraction du maximum de la puissance

L'équation [1.11] quantifie la puissance capturé par turbine éolienne peut être essentiellement maximisé en ajutant sur le coefficient Cp. Ce coefficient étant dépendant du ratio de vitesse λ et de l'angle de calage des pales β.

L'utilisation d'une éolienne a vitesse variable permet de maximiser cette puissance.il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance électrique générée (donc le couple) en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur référence générée quel que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice.

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

$$P_{mec} = C_{mec}.\Omega_{mec} \qquad [I.17]$$

Dans cette partie, nous présenterons différentes stratégies de commande pour contrôler le couple électromagnétique (et indirectement la puissance électromagnétique convertie) afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. Ce principe est connu sous la terminologie Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T) et correspond à la zone 2 de la caractéristique de fonctionnement de l'éolienne [15].

On distingue deux familles de structures de commande qui sont maintenant expliqué (Figure I.32) :

- ✓ Le contrôle avec asservissement de la vitesse mécanique.
- ✓ Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique

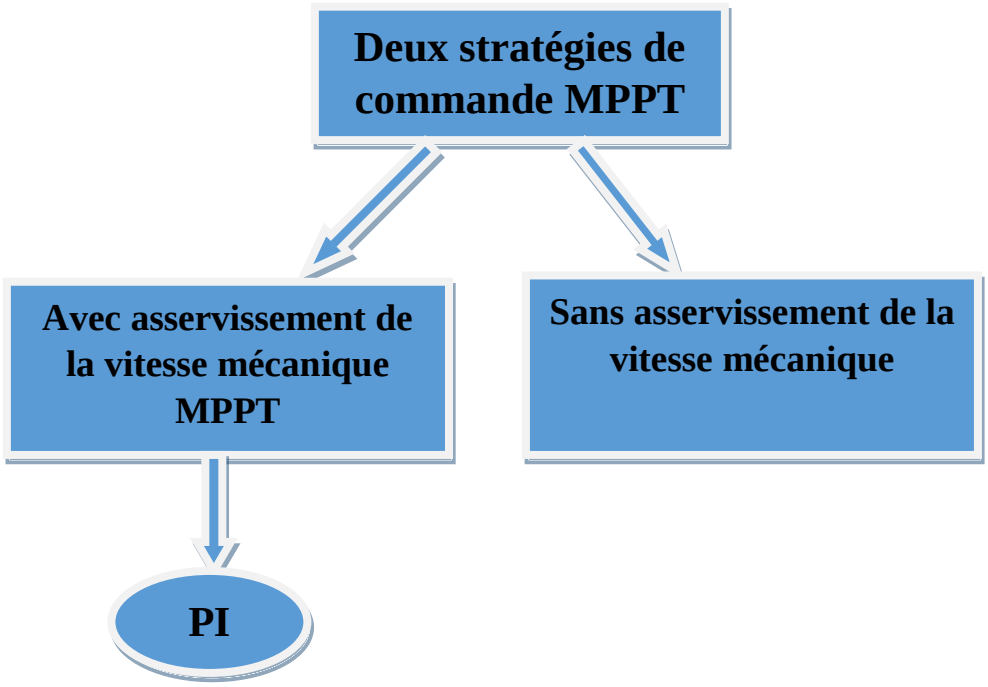


Figure I.32 : *Stratégies de commande de la turbine étudiée.*

I.14.1. Maximisation de la Puissance avec asservissement de la vitesse

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

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

$$C_{em} = C_{em-ref} \qquad [I.18]$$

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

La vitesse est influencée par l'application de trois couples: un couple éolien et 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 de multiplicateur C_g et le couple électromagnétique C_{em}:

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \frac{1}{J}(C_g - C_{em}) \quad [I.19]$$

La structure de commande consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence.

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

$$C_{em-ref} = PI.(\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad [I.20]$$

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:

$$\Omega_{ref} = G.(\Omega_{turbine-ref}) \quad [I.21]$$

La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle correspondant à la valeur optimal de ration de vitesse λ_{Cpmax} (à β constant égal à 0°) permettant d'obtenir la valeur maximal du Cp.

Elle est obtenue à partir de l'équation :

$$\Omega_{turbine-ref} = \frac{\lambda_{cp-max}.V}{R} \quad [I.22]$$

I.14.1.1. Conception du correcteur de vitesse

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

- Il doit asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence.
- Il doit atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entré perturbatrice.

La représentation simplifiée sous forme de schéma blocs est présenté ci-dessous

(Figure. I.33):

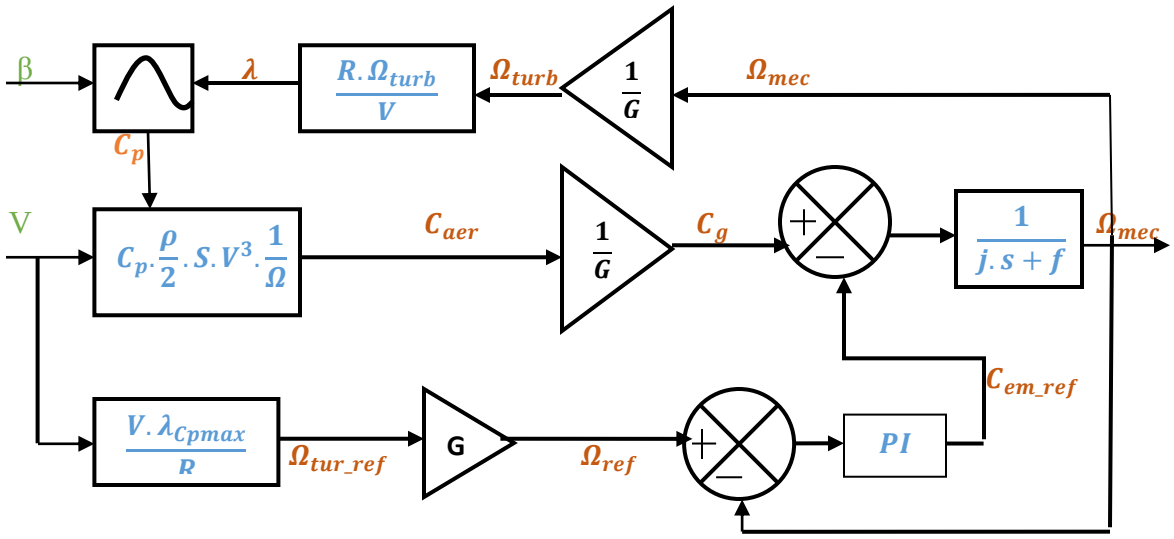


Figure I.33 :*La maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse*

Différentes technologies de correcteur peuvent être considérées pour l'asservissement de la vitesse, dans notre étude nous avons utilisé un régulateur proportionnel intégral (PI) (Annexe 1)

I.15.Simulations et Interprétations des Résultats

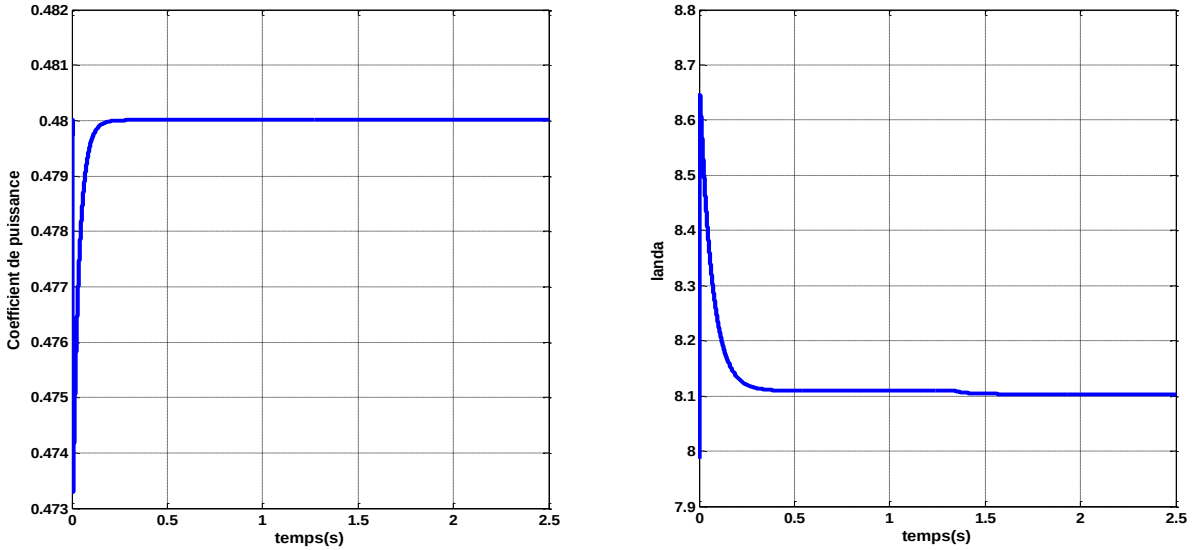


Figure I.34 :*Schéma de coefficient de puissance et landa*

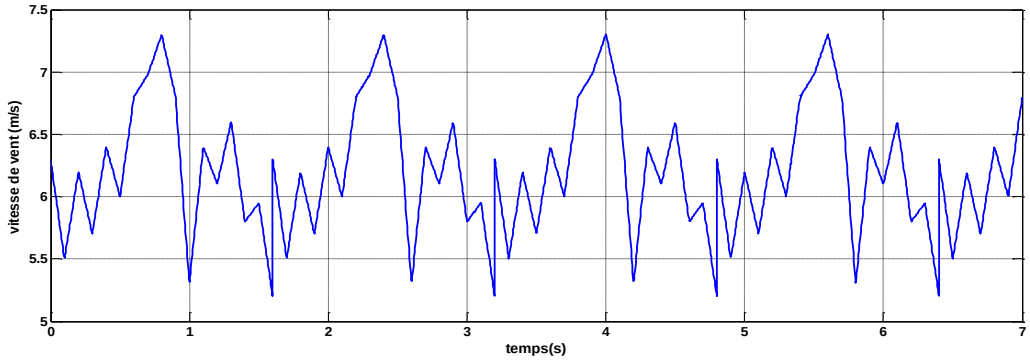


Figure. I.35 :*Le profil du vent*

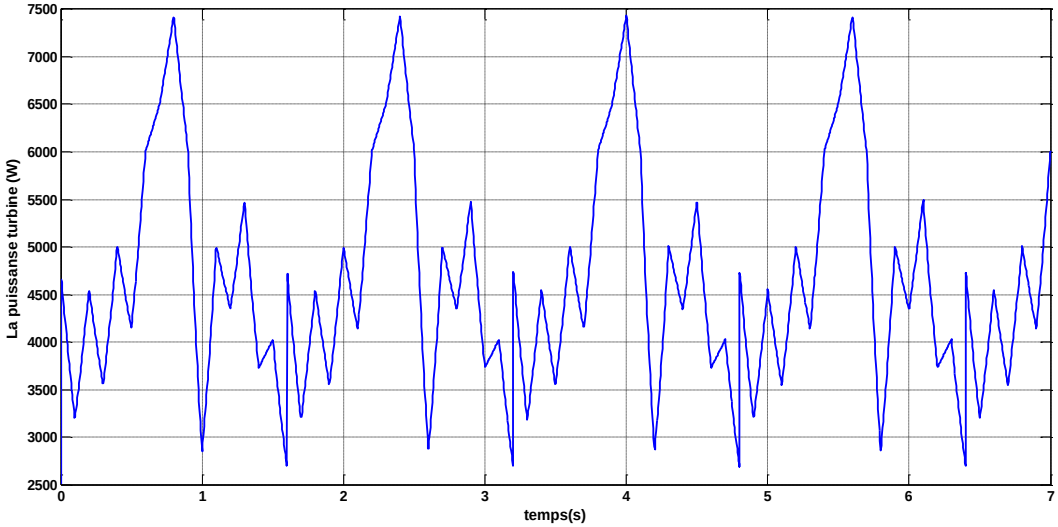


Figure I.36 :*Puissance au niveau de la turbine.de la vitesse*

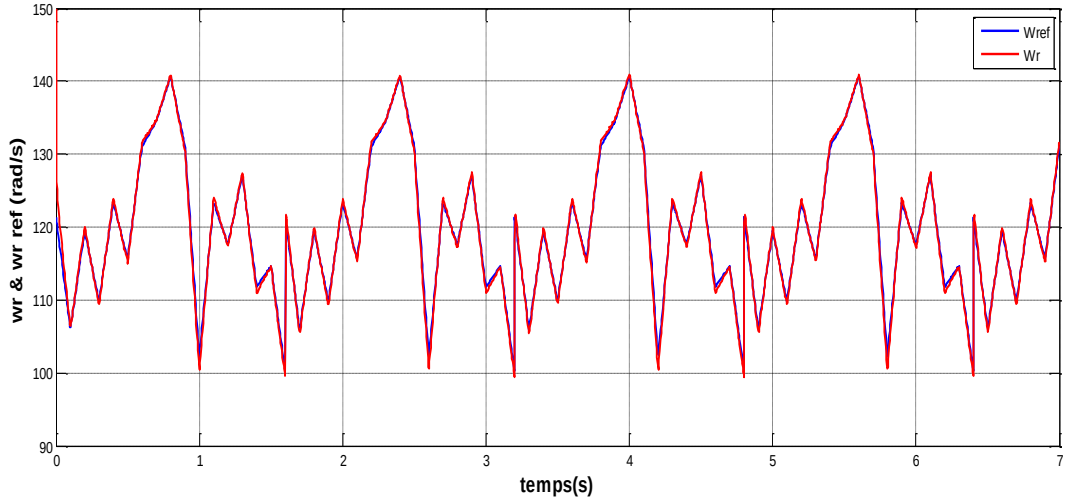


Figure I.37 :*la vitesse de rotation du rotor*

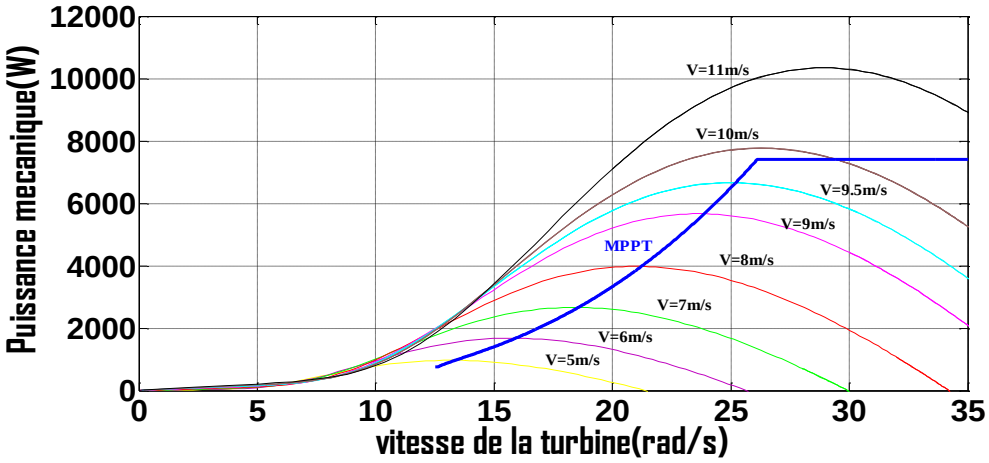


Figure I.38 :*Puissance de l'éolienne en fonction de la vitesse de la turbine du vent MPPT*

Interprétation des résultats

Les résultats de simulation inhérents à cet algorithme de commande montrent que la variation de la vitesse de la génératrice est adaptée à la variation de la vitesse du vent (Figure I.37).

On constate aussi un bon asservissement de la vitesse de la génératrice qui suit parfaitement sa référence et cela a permis un bon suivit de point maximal de puissance.

Du point de vue puissance, ces résultats montrent que la puissance extraite est maximal pour différentes variations de vitesse du vent jusqu'à une valeur limite correspondante à la vitesse nominal de la machine (Figure I.38).

I.16. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons donné une vue d'ensemble des différents types d'éolienne utilisées pour la production d'énergie électrique, pour avoir une meilleure compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes, partant des Principaux composants d'une éolienne nous avons décrit de façon explicite les différents éléments constitutifs de la turbine

Ensuit on a décrit la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine (Loi de Betz), et nous avons établi un modèle mathématique de la turbine à partir de ses équations caractéristiques.et étudier une MPPT d'une éolienne afin d'obtenir le rendement maximal de la turbine.

Et enfin La modélisation et la simulation de la turbine éolienne a montré que la variation de la vitesse du vent influe considérablement sur la vitesse mécanique et sur la puissance électrique fournie du fait que l'énergie produite varie proportionnellement au cube de cette vitesse.

Chapitre II : Modélisation de l'ensemble MADA-Convertisseur

II.1. Introduction

Après une première partie consacrée à la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation MADA, Ce type de machine est utilisé comme génératrice dans la plupart des projets de centrale éolienne, car il offre de grands avantages de fonctionnement.

Dans second partie, nous allons commencer par l'étude de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC avec sa stratégie de commande et à la fin on termine par des simulations et interprétation.

II.2. Description de la MADA

La machine asynchrone à double alimentions (MADA) se compose principalement de deux parties, stator et rotor. Le rotor tourne à l'intérieur de la cavité de la machine, il est séparé du stator par un entrefer. En principe les circuits électriques du stator et du rotor sont constitués de trois enroulements identiques couplés en étoile (ou en triangle) avec pour seule différence le circuit électrique du rotor est relié à trois ou quatre bagues sur lesquelles glissent des balais **[5].**

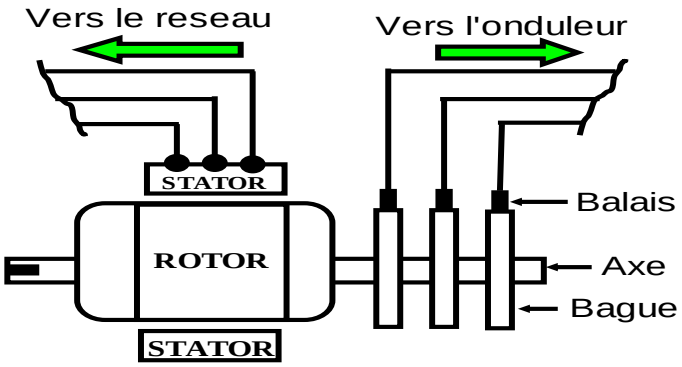


Figure. II.1: *Machine asynchrone à rotor bobiné avec des bagues collectrices.*

II.3.Applications des machines asynchrones à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation été conçue pour fonctionner en moteur sur une grande plage de variation de vitesse comme première application. L'utilisation d'une MADA permet de varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques, ce dispositif sera donc économique quand on place les convertisseurs entre le rotor et le réseau en réduisant leurs tailles d'environ 70% **[8].**

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

- Génération des réseaux de bord des navires ou des avions;
- Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable;
- Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable;
- Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant

les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation du carburant.

II.4. Avantages et inconvénients de la MADA

Comme les autres machine la MADA présente quelques avantages et inconvénients qui sont lié à plusieurs facteurs, sa structure, sa stratégie de commande et ses applications:

II.4.1. Avantages de la MADA

- La possibilité de fonctionner à couple constant au de la vitesse nominale.
- 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).
- Le partage des fréquences entre le stator et le rotor: en effet, 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. Inconvénients de la MADA

Comme toute autre machine ; la MADA possède une structure non linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande.

En plus de ça ; on peut citer les inconvénients suivants:

- L'aspect multiconvertisseurs augmente le nombre de convertisseur et par conséquent le prix.
- Elle plus volumineuse qu'une machine asynchrone à cage de puissance équivalente.

II.5. Mode de Fonctionnement de la MADA a 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. En effet à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper synchronisme ou en hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur nous savons qu'une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur. Par contre dans le cas de la MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique.

II.5.1 Cas moteur

II.5.1.1. Fonctionnement moteur hyposynchrone (g > 0)

Pour ce cas la machine en mode de fonctionnement moteur qui tourne a une vitesse faible inferieure de la vitesse de synchronisme.la puissance Ps fournie par le réseau au stator, la puissance Pr (la puissance de glissement) transite par le rotor été réinjecté au réseau (**Figure II.2.a)**

II.5.1.2. Fonctionnement moteur hypersynchrone (g < 0)

La **Figure II.2.b** montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et au rotor, on a donc un fonctionnement a vitesse supérieure aux vitesses de synchronisme.

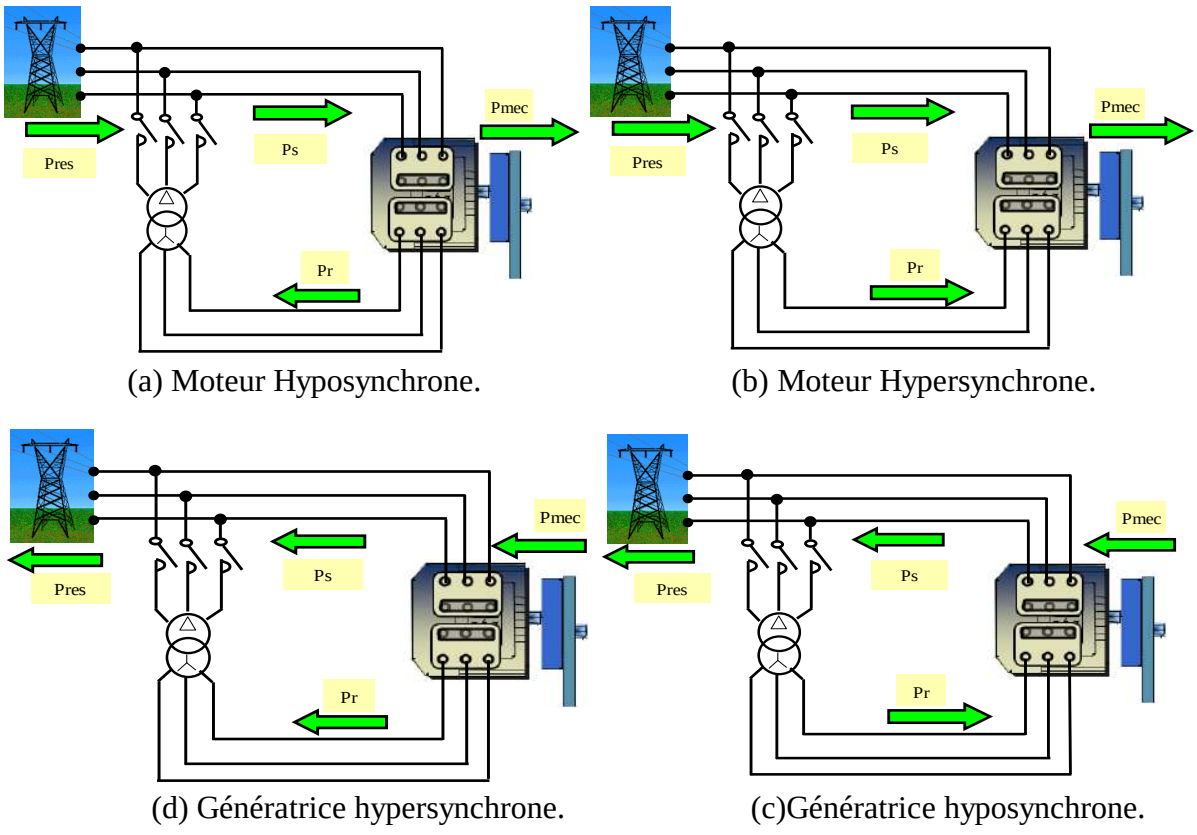
II.5.2. Cas générateur

II.5.2.1. Fonctionnement générateur hyposynchrone (g>0)

En mode de fonctionnement hypo synchrone, la vitesse mécanique est faible alors le réseau reçoit une puissance statorique Ps et envoyé une puissance rotorique vers la machine (**Figure II.2.c).**

II.5.2.2. Fonctionnement générateur hypersynchrone (g<0)

En mode de fonctionnement hyper synchrone la vitesse mécanique augmente jusqu'à une vitesse supérieure à celle de synchronisme, dans ce cas les deux puissances sont envoyées de réseau la machine vers le réseau (**Figure II.2.d).**



(a) Moteur Hyposynchrone. (b) Moteur Hypersynchrone.

(d) Génératrice hypersynchrone. (c)Génératrice hyposynchrone.

Figure II.2 : *Les différentes configurations de fonctionnement de la MADA.*

II.6. Modélisation de la Machine Asynchrone Double Aimantation (MADA) dans le plan ABC

II.6.1. Hypothèses simplificatrices

Nous considérons les hypothèses simplificatrices suivantes **[16]** :

- Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants ;
- Les pertes (par hystérésis et courant de Foucault) sont négligées ;
- On considère que la force magnétomotrice créée par chacune des phases statoriques et rotoriques est à répartition sinusoïdale.
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encochage est négligé, les inductances propres sont constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes rotoriques et statoriques.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.

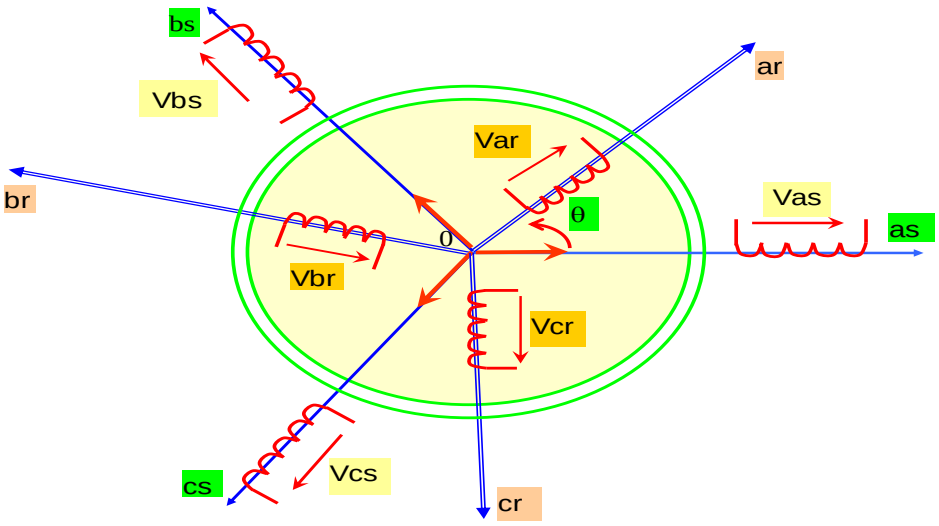


Figure II.3: *Représentation spatiale de la MADA.*

II.6.2. Les équations électriques

Les équations des tensions des phases statoriques et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine s'écrivent comme suit:

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \dfrac{d}{dt}[\varphi_s] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \dfrac{d}{dt}[\varphi_r] \end{cases} \quad \textbf{[II.1]}$$

Avec:

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}, [I_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}, [I_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_{as} & 0 & 0 \\ 0 & R_{bs} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cs} \end{bmatrix}, [R_r] = \begin{bmatrix} R_{ar} & 0 & 0 \\ 0 & R_{br} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cr} \end{bmatrix}$$

$$[\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix}; [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix}$$

II.6.3. Les équations magnétiques

Les flux sont donnés par:

$$\begin{bmatrix} \varphi_s \\ \varphi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [l_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [l_{sr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad \textbf{[II.2]}$$

Avec:

$$[l_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}; [l_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

La matrice des inductances mutuelles (matrice de couplage rotor-stator) s'écrit:

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

En remplaçant **(II.2)** dans **(II.1)**, on obtient le système suivant:

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s]\,[i_s] + \frac{d}{dt}\left([l_{ss}]\,[i_s] + [M_{sr}]\,[i_r]\right) \\ [V_r] = [R_r]\,[i_r] + \frac{d}{dt}\left([l_{rr}]\,[i_r] + [M_{rs}]\,[i_s]\right) \end{cases} \quad \textbf{[II.3]}$$

II.6.4. Equation mécanique

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

$$C_{em} = P[I_s]^t \frac{d}{d\theta}([M_{sr}].[I_r]) \quad \textbf{[II.4]}$$

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

$$\frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J}\left(C_{em} - C_r - f_r.\Omega\right) \quad \textbf{[II.5]}$$

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

II.7. Modèle de la MADA dans le repère de PARK

La transformation de PARK est un outil mathématique qui a permis la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif à un système diphasé (repère d, q)continu (**Figure II.4)[5].**

Les repères de la transformation de PARK des grandeurs statoriques et ceux des grandeurs rotoriques doivent coïncider pour simplifier ces équations. Ceci se fait en liant les angles **θs**et **θr**par la relation: **θs=θ +θr (Figure II.4).**

La matrice de transformation est définie par:

$$P(\theta)=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix}\cos(\theta) & \cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta+\frac{2\pi}{3})\\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta-\frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta+\frac{2\pi}{3})\\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}}\end{bmatrix} \qquad \textbf{[II.6]}$$

L'angle **θ**est au choix de l'utilisateur et peut dépendre du temps. Le fait que **[P(θ)]** soit orthonormée implique que son inverse est égale à sa transposée.

$$[P(\theta)]^{-1}=[P(\theta)]^{t}$$

II.7.1. Intérêt de la transformation de PARK

La transformation de PARK permet de simplifier certaines équations qui dépendent du temps et de l'espace; les grandeurs variables deviennent des grandeurs constantes et indépendantes de la position rotorique.

L'application de la transformation de PARK sur les enroulements statoriques et rotoriques conduit à l'écriture des équations du système comme élaborées ci-dessous.

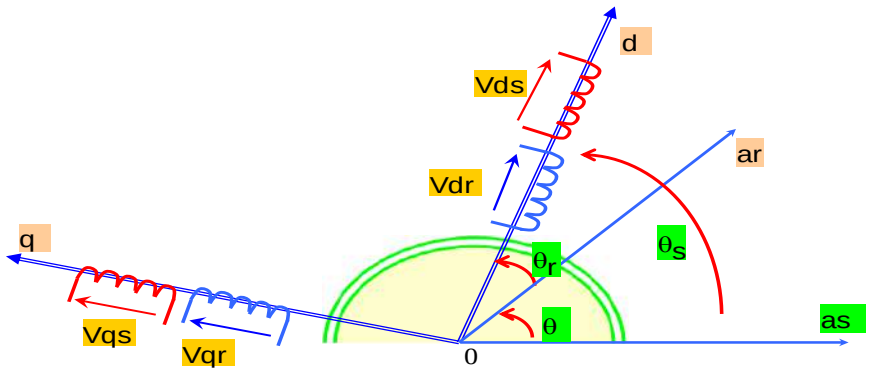


Figure II.4: *Repère référentiel de PARK*

II.7.2. Modélisation de la MADA dans le repère de PARK

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

$$\begin{cases} \left[V_{s(dq)}\right] = \left[P(\theta_s)\right].\left[V_{s(abc)}\right] \\ \left[V_{r(dq)}\right] = \left[P(\theta_s - \theta)\right].\left[V_{r(abc)}\right] \end{cases} \quad [\mathbf{II.7}]$$

$$\begin{cases} \left[I_{s(dq)}\right] = \left[P(\theta_s)\right].\left[I_{s(abc)}\right] \\ \left[I_{r(dq)}\right] = \left[P(\theta_s - \theta)\right].\left[I_{r(abc)}\right] \end{cases} \quad [\mathbf{II.8}]$$

$$\begin{cases} \left[\phi_{s(dq)}\right] = \left[P(\theta_s)\right].\left[\phi_{s(abc)}\right] \\ \left[\phi_{r(dq)}\right] = \left[P(\theta_s - \theta)\right].\left[\phi_{r(abc)}\right] \end{cases} \quad \mathbf{[II.9]}$$

Dans ces conditions de fonctionnement en mode non dégradé, les flux d'axes d et q sont simplement définis par les trois paramètres constantes $\mathbf{L_S}$, $\mathbf{L_r}$, $\mathbf{M}$, et reliés aux courants par la relation:

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M\ I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + M\ I_{qr} \end{cases} \quad \mathbf{[II.10]}$$

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M\ I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + M\ I_{qs} \end{cases}$$

En remplaçant les équations des flux **[II.10]**dans les équations des tensions **[II.7]**, on aura:

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s\frac{d}{dt} & -\omega_s L_s & M\frac{d}{dt} & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s + L_s\frac{d}{dt} & \omega_s L_s & M\frac{d}{dt} \\ M\frac{d}{dt} & -(\omega_s - \omega_r)M & R_r + L_r\frac{d}{dt} & -(\omega_s - \omega_r)L_r \\ (\omega_s - \omega_r)M & M\frac{d}{dt} & (\omega_s - \omega_r)L_r & R_r + L_r\frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad \mathbf{[II.11]}$$

Avec: $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$ Avec : $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$ $\omega_s - \omega_r = \frac{d\theta}{dt}$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}\ \omega = p\Omega = \frac{d\theta}{dt}\ \begin{cases} \omega_e = \dfrac{d\theta_e}{dt} \\ \omega = \dfrac{d\theta}{dt} \end{cases}\ \theta_e = \theta_s = \theta + \theta_r$$

Equation du couple électromagnétique: $Cem = \frac{pM_{sr}}{L_r}(\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds})$ **[II.12]**

II.8. Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est caractérisé par $\omega_e = \omega_s$.Dans ce cas les grandeurs statoriques et rotoriques sont connues en régime permanent .Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors d'une étude de la commande des machines.

Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de PARK lié au champ tournant comme suit:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \dfrac{d}{dt}\varphi_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \dfrac{d}{dt}\varphi_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad \textbf{[II.13]}$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \dfrac{d}{dt}\varphi_{dr} - (\omega_s - \omega)\varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \dfrac{d}{dt}\varphi_{qr} + (\omega_s - \omega)\varphi_{dr} \end{cases}$$

Avec:

$$\begin{cases} Cem = \dfrac{pM}{L_r}(\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds}) \\ \dfrac{J}{P}\dfrac{d\omega}{dt} = (C_{em} - C_r - C_f) \end{cases} \quad \textbf{[II.14]}$$

II.9. Mise sous forme d'équations d'états

Vu la nécessité de représenter le modèle non linéaire de la MADA sous forme d'équation d'état, nous allons choisir dans tout ce qui suivra, le vecteur $[\Phi_{ds}, \Phi_{qs}, i_{dr}, i_{qr}, \omega]^T$ comme vecteur d'état et les grandeurs V_{dr}, V_{qr}comme variable de commande.

Après le calcul, nous aboutissons au système suivant:

$$\begin{cases} \dfrac{di_{dr}}{dt} = -\gamma_r.i_{dr} + (\omega_s - \omega\ ).i_{qr} + \alpha_s.\beta.\Phi_{ds} - P.\beta.\omega\ \Phi_{qs} - \beta.V_{ds} + \left(\dfrac{1}{\sigma_r}\right)v_{dr} \\ \dfrac{di_{qr}}{dt} = -\gamma_r.i_{qr} - (\omega_s - \omega\ ).i_{dr} + \alpha_s.\beta.\Phi_{qs} + P.\beta.\omega\ \Phi_{ds} - \beta.V_{qs} + \left(\dfrac{1}{\sigma_r}\right)v_{qr} \\ \dfrac{d\Phi_{ds}}{dt} = -\alpha_s.\Phi_{ds} + \omega_s\Phi_{qs} + \alpha_s.M.i_{dr} + V_{ds} \\ \dfrac{d\Phi_{qs}}{dt} = -\alpha_s.\Phi_{qs} - \omega_s\Phi_{ds} + \alpha_s.M.i_{qr} + V_{qs} \\ \dfrac{d\omega}{dt} = p\dfrac{\mu}{J}\left(\Phi_{qs}.i_{dr} - \Phi_{ds}.i_{qr}\right) - \dfrac{f}{J}\omega - \dfrac{1}{j}C_r \end{cases} \quad \textbf{[II.15]}$$

Où les différents coefficients sont donnés par:

$$\alpha_s = \frac{R_s}{Ls}\ ;\quad \sigma_r = L_r\left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r}\right)\ ;\quad \gamma_r = \frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_s.M^2}{L_s^2\ .\sigma_r}\ ;\quad \beta = \frac{.M}{L_s\ .\sigma_r}\ ;\quad \mu = \frac{3.M}{2.L_s}$$

II.10. Simulation des résultats

La vitesse électrique du rotor **ω** atteint une valeur à vide proche de la vitesse de synchronisme au bout d'un temps égal à **0.4s.** Ce démarrage rapide a permis d'avoir une stabilité rapide du couple électromagnétique.

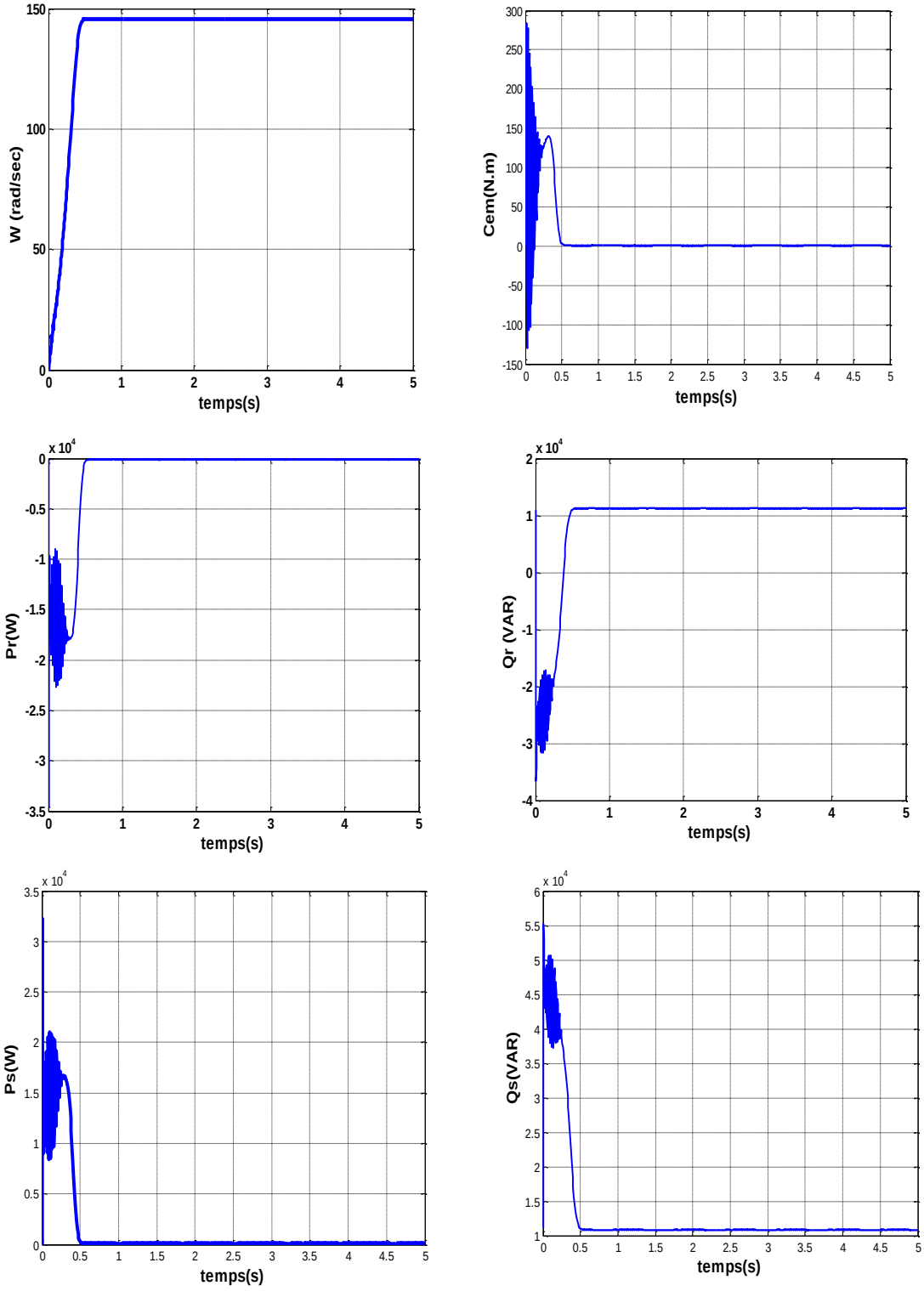


Figure II.5 : performances de la conduite de la MADA .

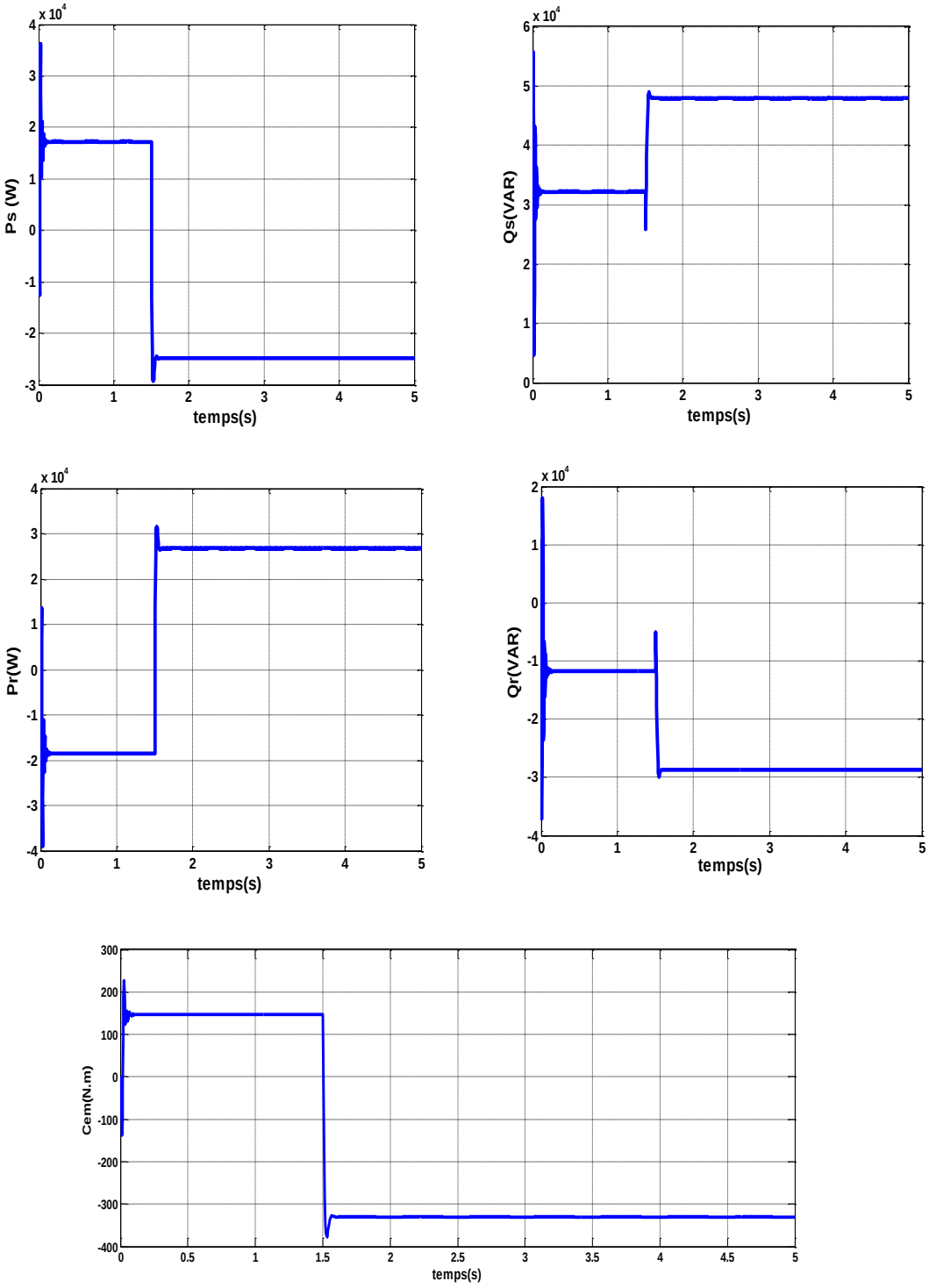


Figure II.6 : performances de la conduite de la GADA

II.11.Onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC

Dans cette partie, nous présentons un onduleur de tension onduleur à trois niveaux à structure NPC (Neutral Point Clamping) c'est-à-dire une structure à point milieu flottant utilisé dans les domaines de haute tension et forte puissance **[17].**

II .12.Modélisation du fonctionnement de l'onduleur à trois niveaux

II.12.1. Structure de l'onduleur triphasé à trois niveaux

L'onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC présenté par (**Figure. II.1**) est constitué de trois bras symétriques constitués chacun de quatre interrupteurs montés en série, et de deux diodes qui permettent d'annuler la tension $\mathbf{V_{km}}$, chaque interrupteur est composé d'un interrupteur bicommandable (transistor, GTO, IGBT,….) et d'une diode montée en tête bêche. Ce type d'onduleur est dit à trois niveaux de tension par bras (+Uc, 0,-Uc) .

Durant ce chapitre, nous adoptant les hypothèses suivantes :

- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est supposée négligeable.
- La charge est triphasée, couplée on étoile avec le neutre isolé.

D'ou : $\begin{cases} \mathrm{ia} + \mathrm{ib} + \mathrm{ic} = 0 \\ V\mathrm{a} + V\mathrm{b} + V\mathrm{c} = 0 \end{cases}$

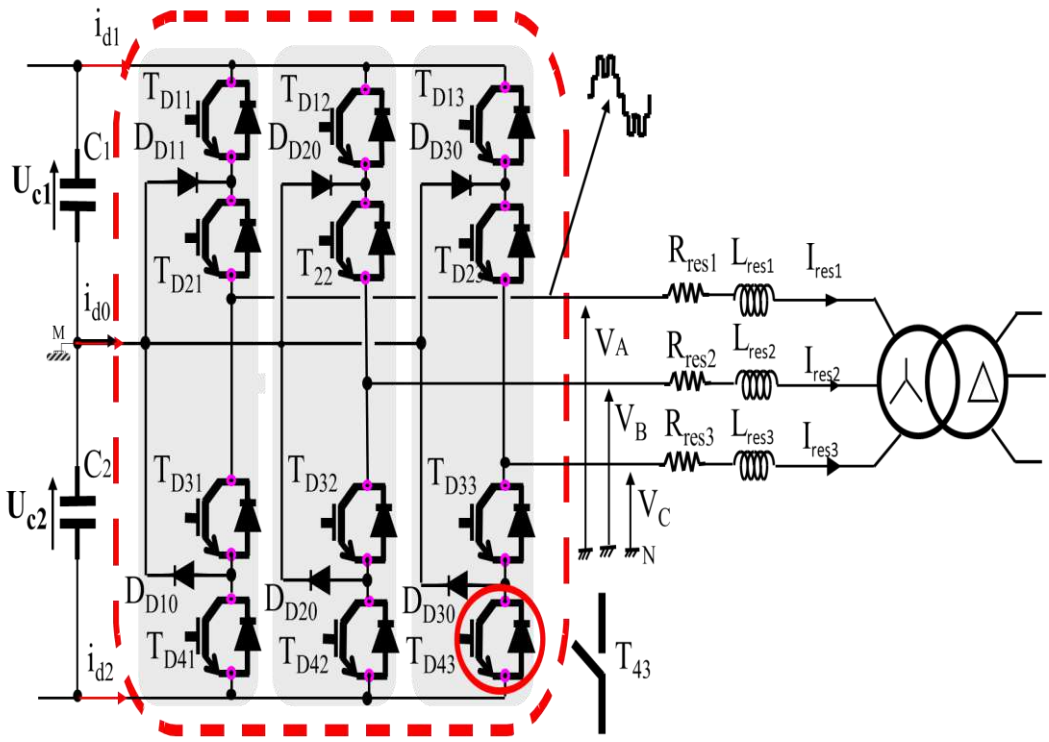


Figure II.7 : Structure Générale de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC

II.12.2. Modélisation du fonctionnement d'un bras de l'onduleur à trois niveaux

Afin d'élaborer les différentes configurations de l'onduleur à trois niveaux, on a considère que la modélisation de ce dernier se fait par bras et cela est due à la symétrie de sa structure.

II.1.12.3. Différentes configuration d'un bras d'onduleur à trois niveaux

L'analyse topologique d'un bras de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC montre qu'il existe cinq configurations possibles, et qui sont représentées par la (**Fig. II.7)**.

Les grandeurs électriques caractérisant chacune de ces configurations sont données dans un tableau (**Tab. II.1**). Avec V_k le potentiel du nœud K par rapport à l'origine des potentiels M), Pour la configuration E_0, le potentiel Vk dépend de la charge de l'onduleur.

Tab II.1. *Grandeurs électriques correspondantes à chaque configuration d'un bras de l'onduleur à trois niveaux*

Configurations	**Grandeurs électriques**
E_0	$I_K = 0$ (V_K dépend de la charge de l'onduleur)
E_1	$V_K = U_c$
E_2	$V_K = 0$
E_3	$V_K = -U_c$
E_4	$V_K = 0$

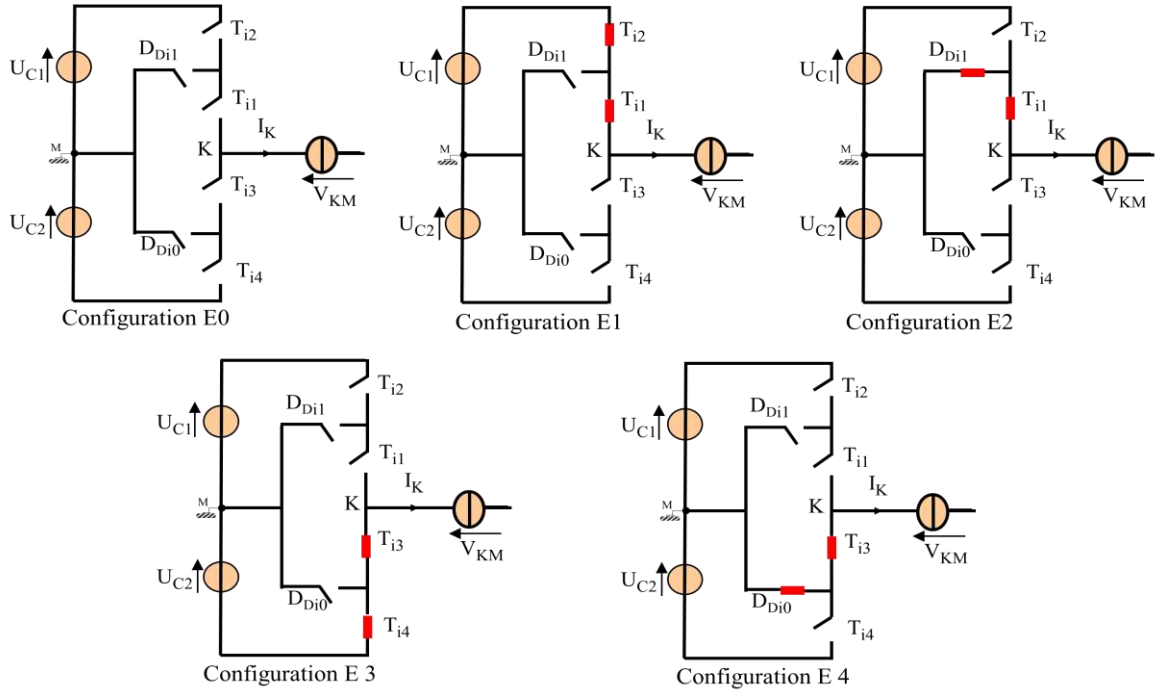


Figure II.8 : Les différentes configurations possibles d'un bras d'onduleur à trois niveaux

La structure de cet onduleur de tension consiste à créer un point sur l'étage de tension continue tel que $U_{c1}+U_{c2}=E$, permettant de générer des créneaux d'amplitudes [17] :

-E/2, 0 et E/2 dont la combinaison de ces niveaux permet d'avoir un fondamental plus proche de la sinusoïde qu'avec la structure classique à deux niveaux.

II.13. Modèle de connaissance à trois et de commande de l'onduleur

II.13.1. Commandabilité des convertisseurs statiques

Un convertisseur est dit en mode commandable, si les conditions de transition entre les différentes configurations ne dépendent que de la commande externe des composants (commande des bases des semi-conducteurs) et non pas des commandes internes (grandeurs électriques).Durant la suite de notre travail, cette condition est supposée satisfaite ce qui nous permet de définir les fonctions de connexion.

II.13.2 Fonction de commande

On définit la fonction de connexion $F_S$comme étant une fonction quidécrit l'état de chaque interrupteur (fermé ou ouvert). Cette fonction est définie comme suite

$$F_{is} = \begin{cases} 1 & si \quad T_{is}\ est\ ouvert \\ 0 & si \quad T_{is}\ est\ fermé \end{cases} \qquad \textbf{[II -16]}$$

Avec : $i \in \{1,2,3\}$ et s $\in \{1,2,3,4\}$

II.13.3. Commande complémentaire

Pour éviter la conduction simultanée des quatre interrupteurs d'un seul bras qui peut engendrer leurs destructions par croissance du courant lors du court-circuit ou par une surtension dans le cas de l'ouverture de tous les interrupteurs, on définit une commande complémentaire des différents semi-conducteurs d'un bras de l'onduleur à trois niveaux. La commande la plus optimale est la suivante [17]:

$$\begin{cases} B_{i1} = \overline{B_{\imath 4}} \\ B_{i2} = \overline{B_{\imath 3}} \end{cases} \qquad \textbf{[II.17]}$$

B_{is}: Commande de la base du transistor TD_{is} du bras ***i***.

Alors avec cette commande complémentaire, les fonctions de connexion des interrupteurs de bras i peuvent s'écrire comme suit

$$\begin{cases} F_{i1} = 1 - F_{i4} \\ F_{i2} = 1 - F_{i3} \end{cases} \quad \textbf{[II.18]}$$

Pour le bras *i*, les fonctions de connexion des demi-bras s'expriment comme suite :

$$\begin{cases} F_{i1}^{b} = F_{i1} * F_{i2} \\ F_{i0}^{b} = F_{i3} * F_{i4} \end{cases} \quad \textbf{[II.19]}$$

II.13.4. Fonction de conversion

Les potentiels aux nœuds *A*, *B* et *C* de l'onduleur par rapport au point milieu *M* s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs et des tensions d'entrée comme suit [17]:

$$V_{KM} = F_{i2} * F_{i2} * U_{c1} - Fi_3 * F_{i4} * U_{c2} \quad \textbf{[II.20]}$$

Avec $k \in \{A, B, C\}$respectivement $i \in \{1,2,3\}$

En introduisant les fonctions de connexion de demi-bras**[II.21]** dans le système **[II.22]** on obtient

$$\begin{cases} F_{i1}^{b} = F_{i1} * F_{i2} \\ F_{i0}^{b} = F_{i3} * F_{i4} \end{cases} \quad \textbf{[II.21}$$

$$V_{KM} = F_{i1} * U_{c1} - F_{i0} * U_{c2} \quad \textbf{[II.22]}$$

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}^{b} \\ F_{21}^{b} \\ F_{31}^{b} \end{bmatrix} U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^{b} \\ F_{20}^{b} \\ F_{30}^{b} \end{bmatrix} U_{c2} \quad \textbf{[II.23]}$$

Les différentes tensions simples s'expriment au moyen des fonctions de connexion des demi- bras par le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} F_{11}^{b} \\ F_{21}^{b} \\ F_{31}^{b} \end{bmatrix} U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^{b} \\ F_{20}^{b} \\ F_{30}^{b} \end{bmatrix} U_{c2} \right) \quad \textbf{[II.24]}$$

Ainsi les courants d'entrée de l'onduleur triphasé s'expriment en fonction des courants de la sortie i_1, $i_2$et i_3 au moyen des fonctions des connexions des demi- bras par les relations :

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{11}F_{12}i_1 + F_{21}F_{22}i_2 + F_{31}F_{32}i_3 \\ i_{d2} = F_{13}F_{14}i_1 + F_{23}F_{24}i_2 + F_{33}F_{34}i_3 \\ i_{d0} = F_{11}F_{13}i_1 + F_{21}F_{23}i_2 + F_{31}F_{33}i_3 \end{cases} \quad \textbf{[II.25]}$$

On remplace les fonctions de connexion des interrupteurs par les fonctions de connexion des demi- bras, le système **[II.26]** devient:

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{11}^b i_1 + F_{21}^b i_2 + F_{31}^b i_3 \\ i_{d2} = F_{10}^b i_1 + F_{20}^b i_2 + F_{30}^b i_3 \\ i_{d0} = \left(1 - F_{11}^b - F_{10}^b\right) i_1 + \left(1 - F_{21}^b - F_{20}^b\right) i_2 + \left(1 - F_{31}^b - F_{30}^b\right) i_3 \end{cases} \quad \textbf{[II.26]}$$

II.14. Stratégie de commande de l'onduleur de tension à trois niveaux à structure NPC

Il existe plusieurs stratégies de commande des convertisseurs d'électronique de puissance et elles reposent toutes sur la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI), cette technique consiste à comparer une onde de référence qui est l'image de l'onde de sortie qu'on veut obtenir, généralement sinusoïdal, avec une onde triangulaire dite porteuse. Les séquences de commutations des interrupteurs sont déterminées par l'intersection de l'onde de référence avec la porteuse. Cette stratégie de commande est caractérisée par deux paramètres:

- L'indice de modulation "m" qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse f_mà la fréquence de la tension de référence f($m=f_m/f$).
- Taux de modulation ***"r"***qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence *V* et celle de la porteuse Um: ($r=V/U_m$).
- Différente stratégies de commande ont étés développées par différents auteurs pour les onduleurs multiniveaux :
- Modulation vectorielle utilisant deux porteuses en dent de série

Vue l'avantage que présente la stratégie de commande MLI vectorielle par rapport aux autres stratégies (la zone linéaire est plus large) on choisit cette dernière pour faire l'étude de ce type d'onduleur **[17].**

II.14.1 Commande par modulation vectorielle

La modulation vectorielle permet de suivre le vecteur de tension de référence et non pas chaque tension de référence de phase séparément et permet également de repousser les harmoniques de tension vers les fréquences élevées, ce qui facilite le filtrage.

L'analyse de cette stratégie sera basée sur le spectre de fréquence, et la longueur de la bonde linéaire de réglage et le taux d'harmoniques des tensions de sortie.

II.14.2 Choix des porteuses

Pour améliorer le taux d'harmoniques des tensions de sortie d'un onduleur à trois niveaux, onutilise deux porteuses bipolaires identiques déphasées d'une demi période $1/2f_p$ l'une de l'autre (f_p : fréquence des porteuse).

Différentes porteuses sont possibles:

- Porteuse triangulaire unipolaire ou bipolaire.
- Porteuse en dents de scie unipolaire ou bipolaire.

La porteuse en dents de scie bipolaire permet un taux d'harmonique le plus faible mais avecdes harmoniques paires et impaires.

Dans cette partie, on présente le cas de deux porteuses endents de scie bipolaire.

II.15. Résultats de simulation et interprétation

La **Figure II.9** montre la tension simple **Va** et son spectre d'harmonique de l'onduleur à trois niveaux commandé par la modulation vectorielle avec deux porteuses pour différentes valeurs de m (m=35, m=21 et m=12), r=0.8.

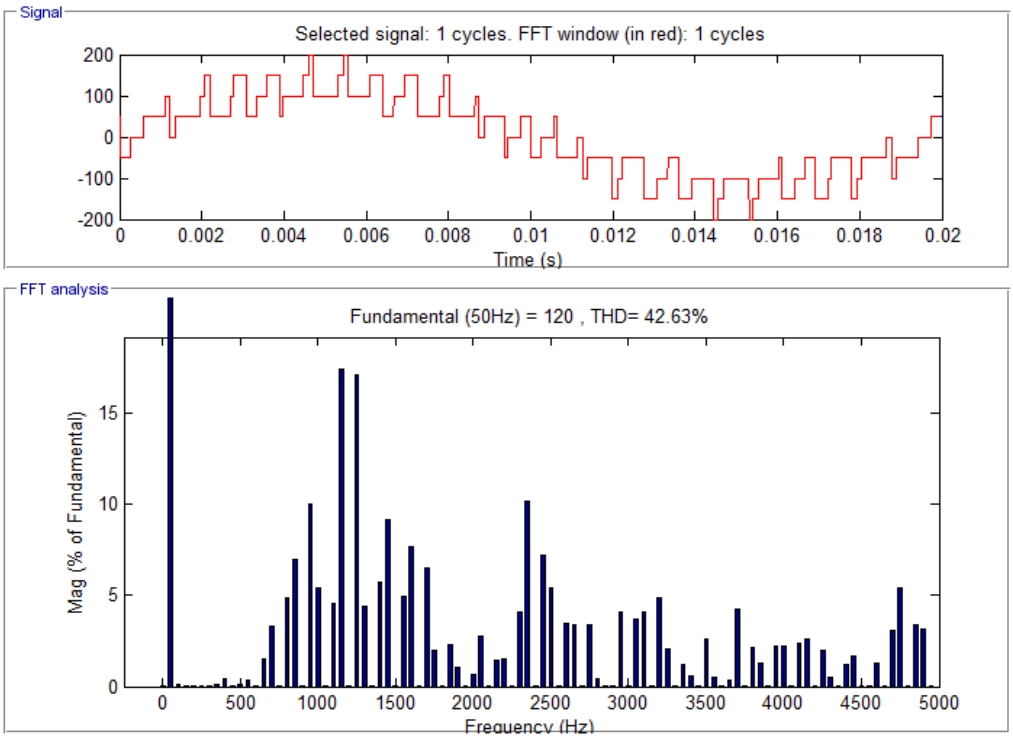
Pour toutes les valeurs de l'indice de modulation **m**, il y a une symétrie dans la tension simple Va par rapport au trois de sa période,

L'augmentation de l'indice de modulation **m**permet de repousser les harmoniques vers des fréquences élevées et donc facilement filtrées par l'inductance de la charge.

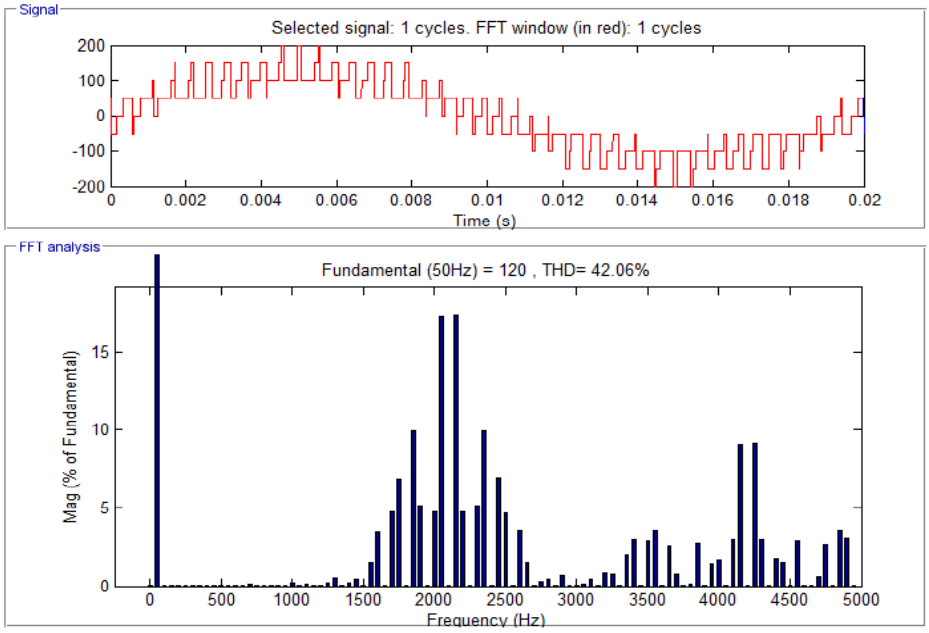


Figure II.9 : *Les tension référence et tension des porteuses*

- Rang des harmoniques pour m=12



- Rang des harmoniques pour m=21



- Rang des harmoniques pour m=35

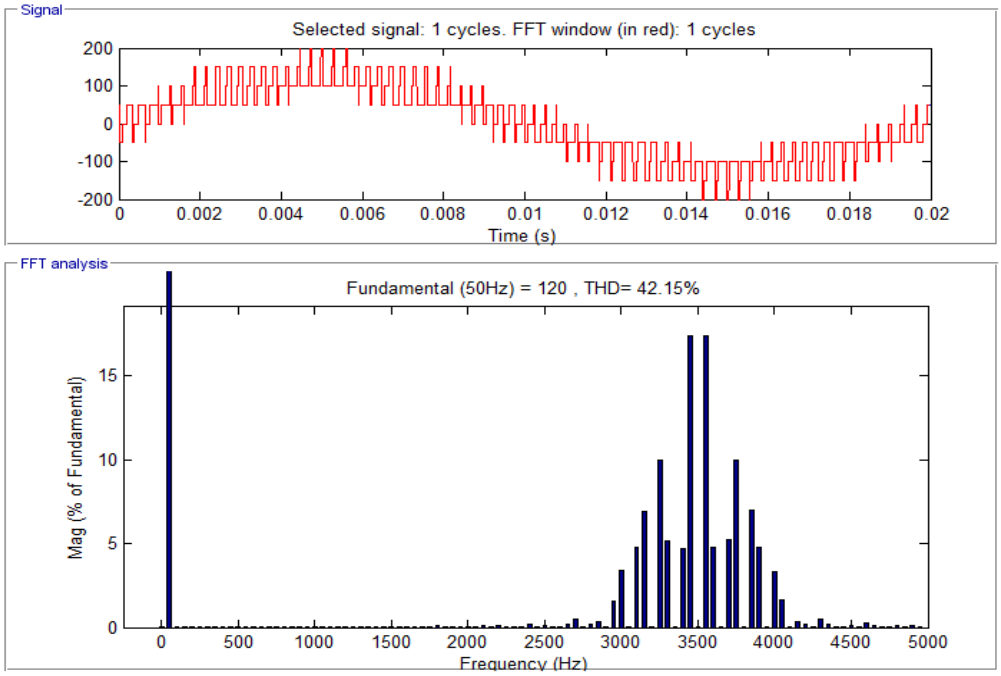


Figure II.10 *: Les tensions simples Va et son spectre d'harmonique de l'onduleur à trois niveaux Commandé par la modulation vectorielle avec deux porteuses (r=0.8).*

II.16. Conclusion

Nous avons commencé la première partie de ce chapitre par une description générale de la machine asynchrone à double alimentation précisant ainsi sa constitution, sa structure et son principe de fonctionnement.

Ensuite, nous avons présenté le modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation.

Le modèle triphasé, obtenu sous certaines hypothèses simplificatrices, s'est réduit en un modèle biphasé à l'aide de la transformation de PARK.

Enfin nous avons terminé cette première partie de ce chapitre par une simulation (MADA) avec et sans turbine.

Dans la seconde partie de ce chapitre, nous avons défini les différentes configurations possibles d'un bras de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC,

La stratégie de commande par modulation vectorielle avec deux porteuses bipolaires en dents de scie utilisée à cet onduleur permet d'élargir la zone de réglage, ainsi que l'amélioration du taux d'harmoniques.

Ce modèle a été élaboré sous MATLAB, afin de voir son efficacité.

Après la validation de ce modèle, il est possible maintenant d'élaborer et réaliser la commande vectorielle de système. C'est le but du prochain chapitre.

Chapitre III :commande vectorielle de la puissance

III.1 INTRODUCTION:

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentée aussi bien en fonctionnement générateur que moteur**[18].**
Dans cette optique, nous avons proposé une loi de commande pour la MADA basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux rotoriques en vue de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la machine et le réseau **[11].**

III .2. La Commande Vectorielle de la MADA

La machine à courant continu a plusieurs avantages. Elle est facilement commandable, étant donné que le flux et le couple sont découplés**[19] :**

- Le flux est contrôlé par le courant de l'inducteur.
- Le couple est contrôlé par le courant d'induit.

À la cour de ces dernières années, des méthodes ont été mises en point,permettant d'assurer le découplage entre les commandes du flux et du couple de la machine asynchrone. Ceci concilie les avantages des propriétés du moteur àcourant continu et de l'absence du collecteur mécanique.
La commande vectorielle est l'une des méthodes de commande appliquée aux machines électriques. Elle nous permet d'obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. Elle nous permet d'assimiler le comportement d'une machine asynchrone à celui de la machine à courant continu, où le couple électromagnétique est proportionnel au courant d'induit.

III.3. Principe de la commande vectorielle

L'objectif de ce type de commande est d'aboutir à un modèle simple de la machine asynchrone susceptible d'assurer le contrôle séparé des grandeurs flux et courant.
La commande vectorielle de la machine asynchrone consiste à orienter les vecteurs courant et flux afin de rendre le comportement de cette dernière similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée (MCC) **(Figure III.1),** où le courant inducteur contrôle le flux et le

courant d'induit contrôle le couple. Il s'agit donc de placer le référentiel (d,q) de sorte que le flux soit aligné sur l'axe direct (d) **(Figure III.2)**; ceci implique que le flux est commandé par la composante directe du courant et le couple est commandé par l'autre composante quadrature .

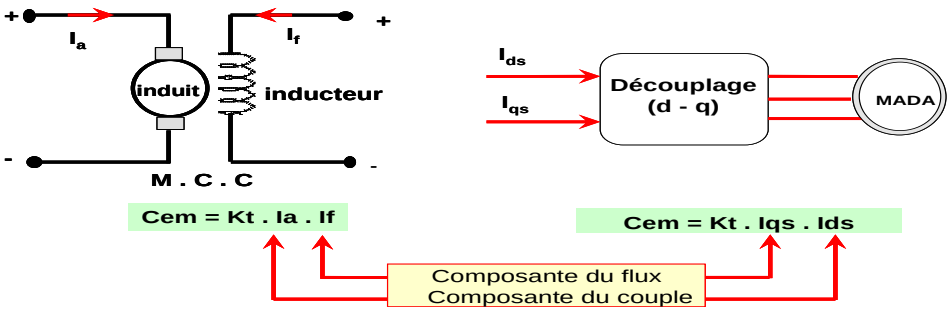


Figure III.1 : *Principe de la commande vectorielle*

Couple électromagnétique de la machine à courant continu :

$$\begin{cases} C_{em} = k_1 \varphi_f . I_a \\ \varphi_f = k_2 . I_f \end{cases} \quad \textbf{[III.1]}$$

Couple électromagnétique de la machine asynchrone à double alimentation:

$$Cem = \frac{pM}{L_r}(\Phi_{qs} i_{dr} - \Phi_{ds} i_{qr}) \quad \textbf{[III.2]}$$

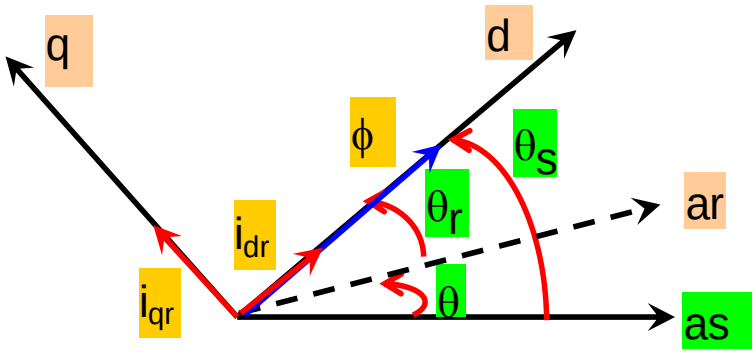


Figure III.2 : *position du référentiel par rapport au*

III.4. Procédé d`orientation du 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 devions imposer l'une des conditions suivantes [8] :

Orientation du flux rotorique: $\begin{cases} \varphi_{qr} = 0 \\ \varphi_{dr} = \varphi_r \end{cases}$

Orientation du flux statorique: $\begin{cases} \varphi_{qs} = 0 \\ \varphi_{ds} = \varphi_s \end{cases}$

Orientation du flux magnétisant: $\begin{cases} \varphi_{qm} = 0 \\ \varphi_{qm} = \varphi_m \end{cases}$

On utilise dans notre étude la commande vectorielle en puissance active et réactive de la génératrice asynchrone à double alimentation avec orientation du repère (d, q) suivant le flux statorique.

L'équation **(III.3)** du couple électromagnétique devient:

$$Cem = -P\frac{M}{L_s}(\Phi_{ds}.I_{qr}) \qquad \textbf{[III.3]}$$

Cette relation rappelle la relation du couple électromagnétique de la MCC à excitation séparée donc le fonctionnement de la MADA est similaire à celui de la MCC.

III.5. Commande vectorielle de la MADA par des puissances

L'un des avantages le plus important de l'utilisation de la MADA, outre la taille du convertisseur, est de pouvoir fonctionner à vitesse variable en suivant la caractéristique de puissance optimale de l'éolienne**.** Dans le cas d'une éolienne la MADA sera utilisée en mode génératrice donc nous allons nous intéresser au contrôle des puissances actives et réactives de la machine.

III.5.1. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de park en orientant le flux statorique telle que ce dernier suivant l'axe *q* soit constamment nul ($\varphi_{qs}= 0$), comme suit:

$$\begin{cases} \varphi_{qs} = 0 \\ \varphi_{ds} = \varphi_s \end{cases} \quad \textbf{[III.4]}$$

L'équation du flux statorique

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M\ I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M\ I_{qr} \end{cases} \quad \textbf{[III.5]}$$

L'équation du couple électromagnétique

$$Cem = -P\frac{M}{L_s}(\Phi_{ds}.I_{qr}) \quad \textbf{[III.6]}$$

Si l'on néglige la résistance du bobinage statorique R_s, ce qui est une hypothèse assez réaliste pour les machines de forte puissance utilisées pour la production éolienne, les équations des tensions statoriques se réduisent à:

$$\begin{cases} V_{ds}=0 \\ V_{qs}=V_s=\omega_s\ \varphi_{ds} \end{cases} \quad \textbf{[III.7]}$$

A l`aide de l`équation **(III.5)** on peut établir le lien entre les courants statoriques et rotoriques:

$$\begin{cases} I_{ds} = \dfrac{\varphi_s}{L_s} - \dfrac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\dfrac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad \textbf{[III.8]}$$

III.5.2. Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

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

$$\begin{cases} P = V_{ds}.I_{ds} + V_{qs}.I_{qs} \\ Q = V_{qs}.I_{ds} - V_{ds}.I_{qs} \end{cases} \quad \textbf{[III.9]}$$

En appliquant les hypothèses simplificatrices à l'équation **(III.9)** on obtient:

$$\begin{cases} P = V_s.I_{qs} \\ Q = V_s.I_{ds} \end{cases} \quad \textbf{[III.10]}$$

En remplaçant I_{ds} et I_{qs} par leurs expressions **(III.8)** dans l'équation **(III.10)** on obtient :

$$\begin{cases} P = -V_s \dfrac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q = V_s \dfrac{\varphi_s}{L_s} - V_s \dfrac{M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad \textbf{[III.11]}$$

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

$$Q = \frac{1}{\omega_s.L_s} V_s^2 - V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} \quad \textbf{[III.12]}$$

III.5.3. Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il nous faut alors établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliqués à la machine.

En remplaçant dans l'équation des flux de modèle de la MADA les courants statoriques par l'expression **(III.9)** on obtient:

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + \dfrac{M.V_s}{\omega_s.L_s} \\ \varphi_{qr} = \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \end{cases} \quad \textbf{[III.13]}$$

En remplaçant l'expression des flux rotoriques de l'équation précédente **(III.13)** par leurs expressions dans l'équation **(II.34)** on obtient :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s} \right) \dfrac{d}{dt} I_{dr} - g.\omega_s \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s} \right) \dfrac{d}{dt} I_{qr} + g.\omega_s \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g.\omega_s . \dfrac{M.V_s}{\omega_s . L_s} \end{cases} \quad \textbf{[III.14]}$$

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

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - g.\omega_s \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + g.\omega_s \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g.\omega_s . \dfrac{M.V_s}{\omega_s . L_s} \end{cases} \quad \textbf{[III.15]}$$

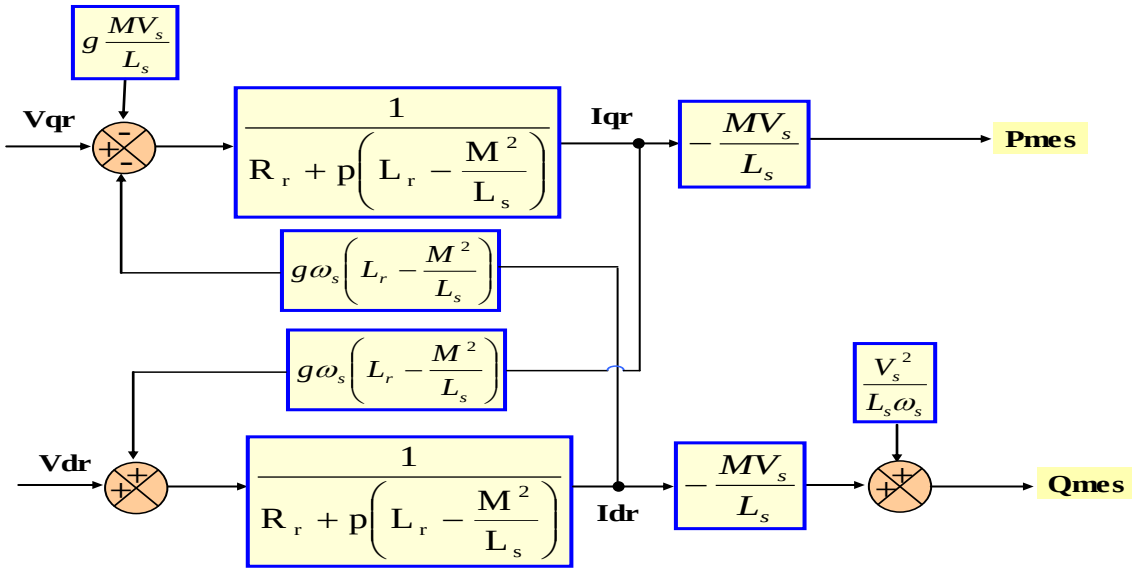


Figure III .3 : *Schéma bloc de la MADA.*

On remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement g, il sera possible d'établir sans difficulté une commande vectorielle car les influences des couplages resteront faibles et les axes d et q pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs.

Ainsi, il apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine

- La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances

actives et réactives. Cette méthode sera appelée **méthode directe** car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.

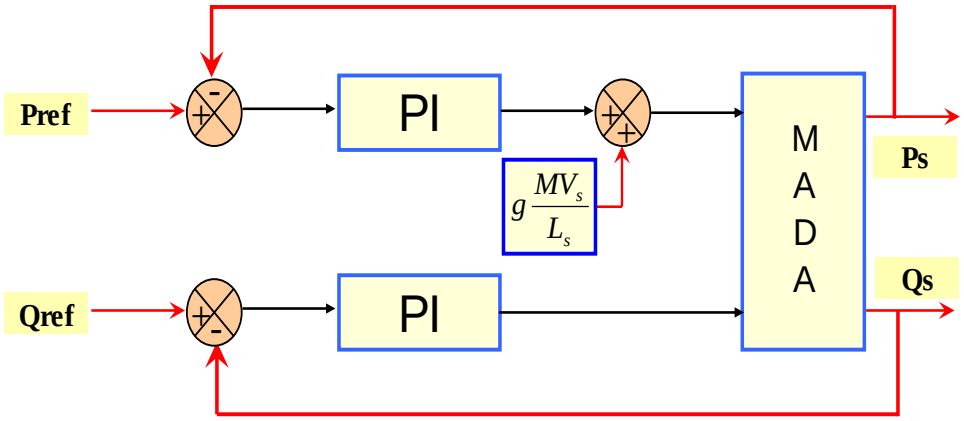


Figure III .4 : *Schéma bloc de la commande directe*

➢ La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques.

III.5.4. Commande indirecte de la MADA

La méthode indirecte consiste à reproduire, en sens inverse, le schéma bloc du système à réguler est présenté dans la (**Figure III.5)**. 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 construit ainsi un schéma bloc permettant d'exprimer les tensions en fonction des puissances. On aboutit alors à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens [3].

Pour obtenir une bonne stabilité du système on introduit une boucle de régulation des courants rotoriques**(Figure III.6)** dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine.

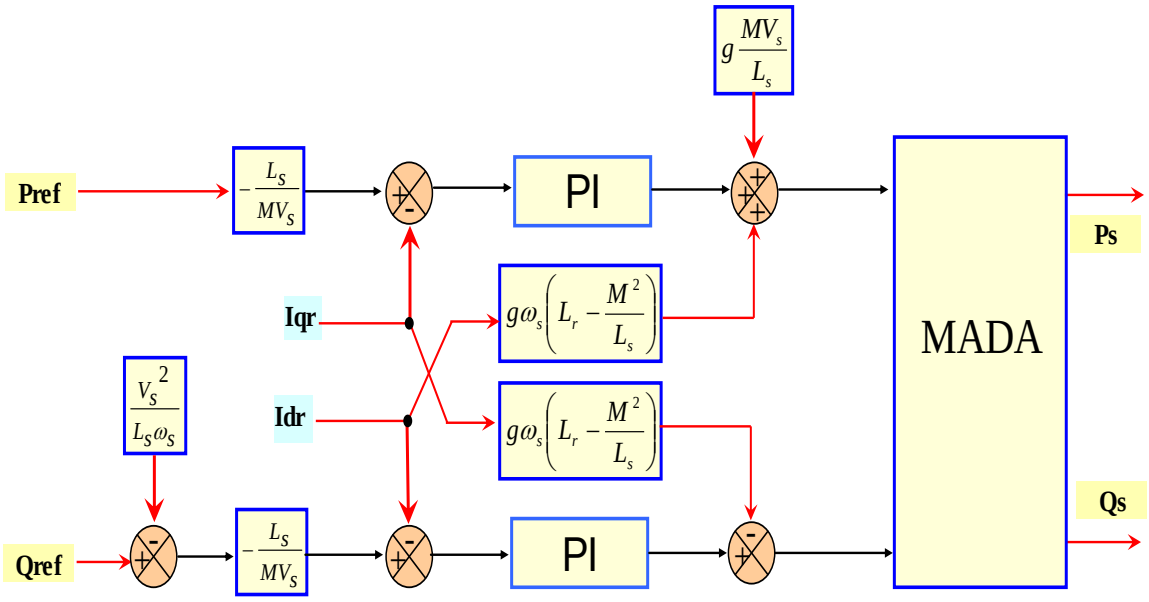


Figure III.5 : *schéma bloc de la commande indirecte.*

L'asservissement des courants joue un rôle très important dans la commande. En effet, plus cet asservissement est efficace plus la puissance rotorique (active, réactive) produite par la machine est proche de celle désirée.

Pour cela, pour conserver l'orientation du flux exigé par la commande vectorielle, on doit étudier une boucle de régulation de courant.

Ainsi, nous allons mettre en place une boucle de régulation en puissance indépendante, tout en compensant les termes de perturbations $(g\frac{MV_s}{L_s}$ et $\frac{V_s^2}{\omega_s.L_s})$ afin d'obtenir un bon fonctionnement avec amélioration des performances du système.

Le régulateur utilisé pour commander la **MADA** en génératrice est un régulateur de type proportionnel-Intégral (**PI**) qui permettent d'avoir une bonne précision, une rapidité et stabilité du système. La fonction de transfert du régulateur est donnée par : $R(S) = Kp + \frac{K_i}{S}$

La détermination des paramètres $\mathbf{K_p}$ et $\mathbf{K_i}$ du régulateur fait intervenir des méthodes classiques de calcul des régulateurs continus. Cette stratégie permet l'application de l'ensemble des outils de l'automatique linéaire au problème de régulation**.**

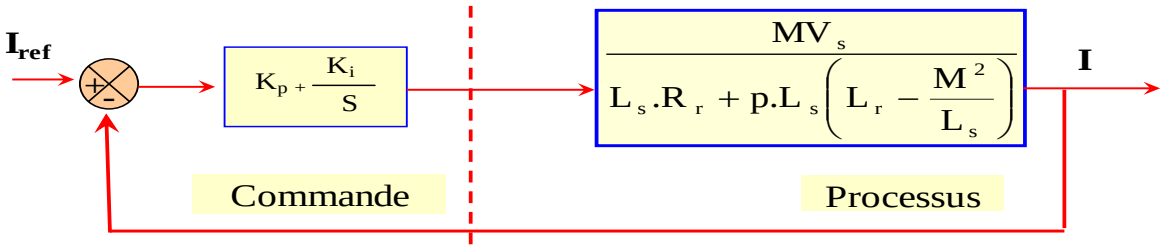


Figure III.6. *Schéma bloc de la régulation du courant*

Tel que :

K_p: L'action proportionnelle permet de jouer sur la vitesse de réponse du procédé. Plus le gain est élevé, plus la réponse s'accélère, plus l'erreur statique diminue.

K_i : L'action intégrale permet d'annuler l'erreur statique (écart entre la mesure et la consigne). Plus l'action intégrale est élevée, plus la réponse s'accélère et plus la stabilité se dégrade.

III.6. Simulation et Interprétations des Résultats

La simulation a été faite en imposant les puissances active et réactive de référence **P_{ref}, Q_{ref}** alors que la machine est entraînée à vitesse fixe.

P_{ref} passe de **0** à **–5000W**entre [1.5s, 3s] et **Q_{ref}** passe de 0 **VAR** a -5000 **VAR**entre [2s, 4s],

Simulation sans turbine

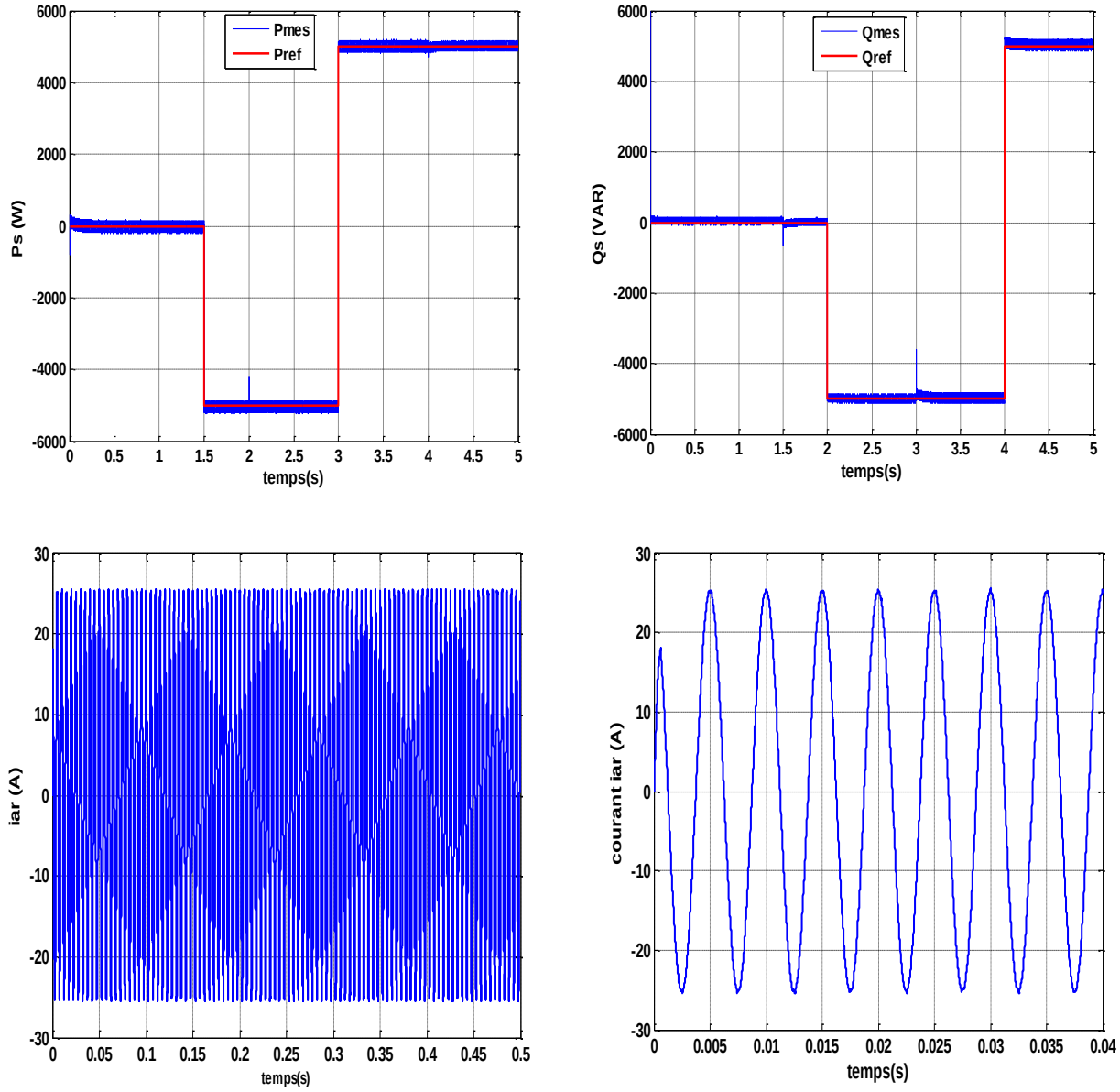


Figure III.7: *Représentation le courant (iar) de la MADA par la commande vectrorielle en puissance active et réactive*

Simulation avec turbine

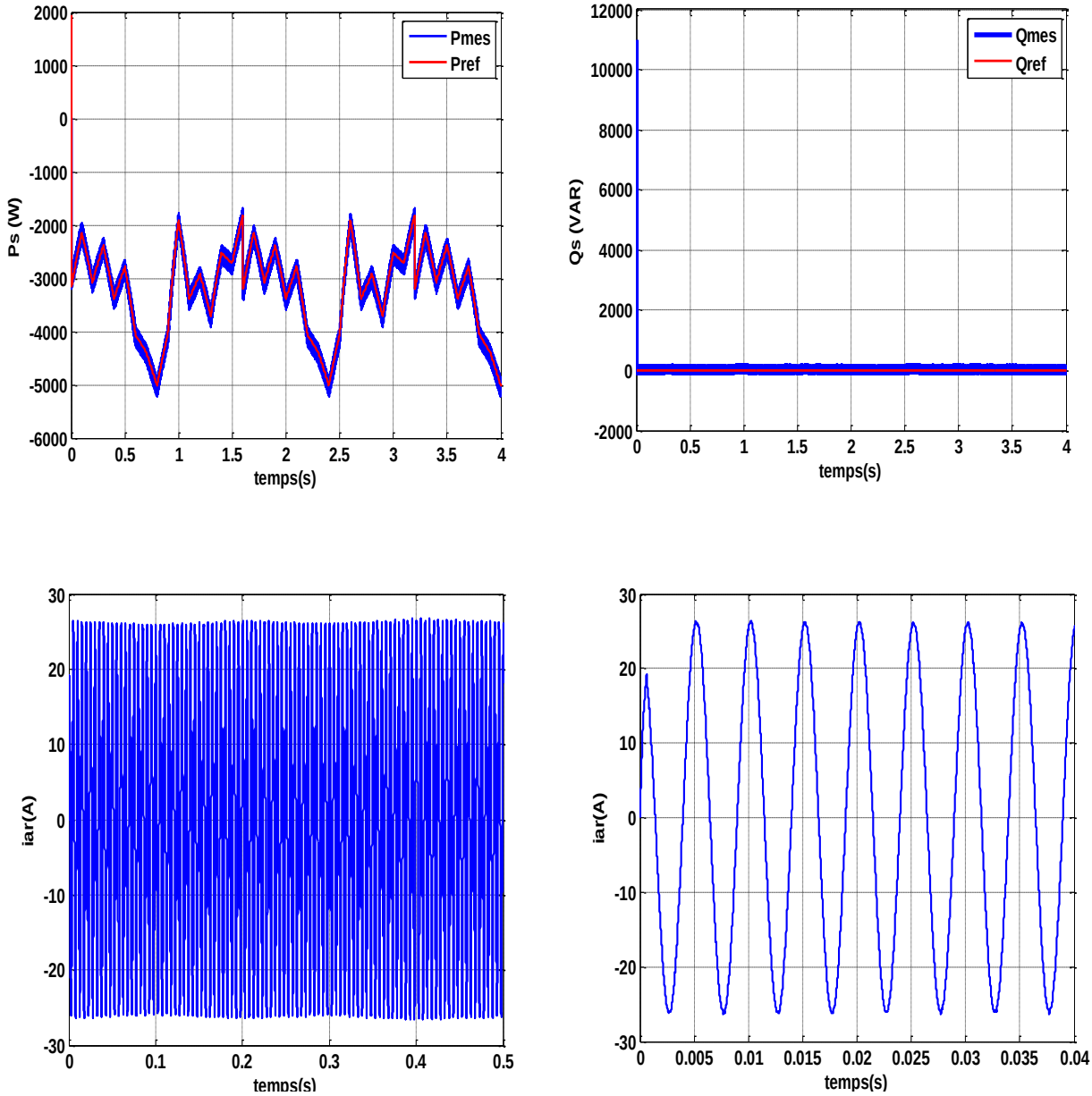


Figure III.8: *Représentation des differentes grandeurs de la MADA par la commande vectrorielle en puissance active et réactive avec turbine.*

On remarque l'effet du couplage des deux puissances actives **(P)** et réactive **(Q)**, au moment où la puissance active $\mathbf{P_{ref}}$ de turbine, on observe une faible oscillation dans le graphe de la puissance **Q**.

III.7. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons étudié la commande vectorielle dela MADA utilisée en fonctionnement génératrice.En premier lieu, nous avons commencé par une présentation du principe de la commandevectorielle.

En dernier lieu nous avons simulé la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance en utilisant des régulateurs (PI) ainsi qu'une interprétation des résultats obtenus, ces derniers s'avèrent satisfaisants vu la stabilité des différentes grandeurs et la performance de la MADA

Chapitre IV :Commande directe du couple (DTC)

IV.1. INTRODUCTION

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

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

Elle présente des avantages déjà bien connus par rapport aux techniques classiques, notamment en ce qui concerne la réduction du temps de réponse du couple ; l'amélioration de sa robustesse par rapport aux variations des paramètres rotorique ; l'imposition directe de l'amplitude des ondulations du couple et du flux statorique ; l'absence de transformations de Park. D'autre part, cette loi de commande en couple s'adapte par nature à l'absence de capteur mécanique (vitesse, position).

L'utilisation de l'onduleur multiniveaux, peut être une solution efficace, de ce genre de problèmes. Plus le nombre de niveaux est grand, plus l'abaissement des ondulations indésirables remarquable sur l'allure de couple, dans notre cas en utilisant l'onduleur à trois niveaux.

La multiplication des combinaisons des vecteurs de tensions en utilisant des onduleurs multiniveaux, pourrait pallier ce problème mais complique l'algorithme de classification de cet ensemble de vecteurs de tensions. Et dans ce chapitre en présenterons la machine asynchrone contrôlée par la DTC et alimentée par l'onduleur à deux et à trois niveaux avec leurs fonctionnement symétrique et asymétrique **[14].**

Beaucoup de travaux ont été faits par les chercheurs dans ce domaine dont le but d'améliorer la technique de base énoncé par Takahashi.

IV.2. PRINCIPE DE LA COMMANDE DIRECTE DU COUPLE

La commande directe du couple est basée sur la détermination directe de la séquence de commande à appliquer à un onduleur de tension. Ce choix est généralement basé sur l'utilisation de régulateurs à hystérésis dont la fonction est de contrôler l'état du système, à savoir ici l'amplitude du flux statorique et le couple électromagnétique.

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

Une variable intervenant également dans le choix des tensions est la position du vecteur statorique dans le plan complexe.

Le schéma de principe de cette technique est indiqué sur la figure suivante (**Fig.IV.1**).

Sur cette figure sont représentés les estimateurs de flux et de couple, ainsi que les régulateurs par hystérésis du couple et du flux. La position du vecteur flux est calculée à partir de leurs composantes dans le plan complexe αβ. Le régulateur de flux est à deux niveau et celui du couple à trois niveaux initialement proposés par Takahashi.**[14]**

Dans cette stratégie, on peut distinguer les blocs fonctionnels suivants :

- Un module de régulation à structures variables du couple électromagnétique (A)
- Un module de régulation à structures variables du flux statorique (B)
- Une table de commutation (C)
- Une unité de l'estimation des variables de commande (D)

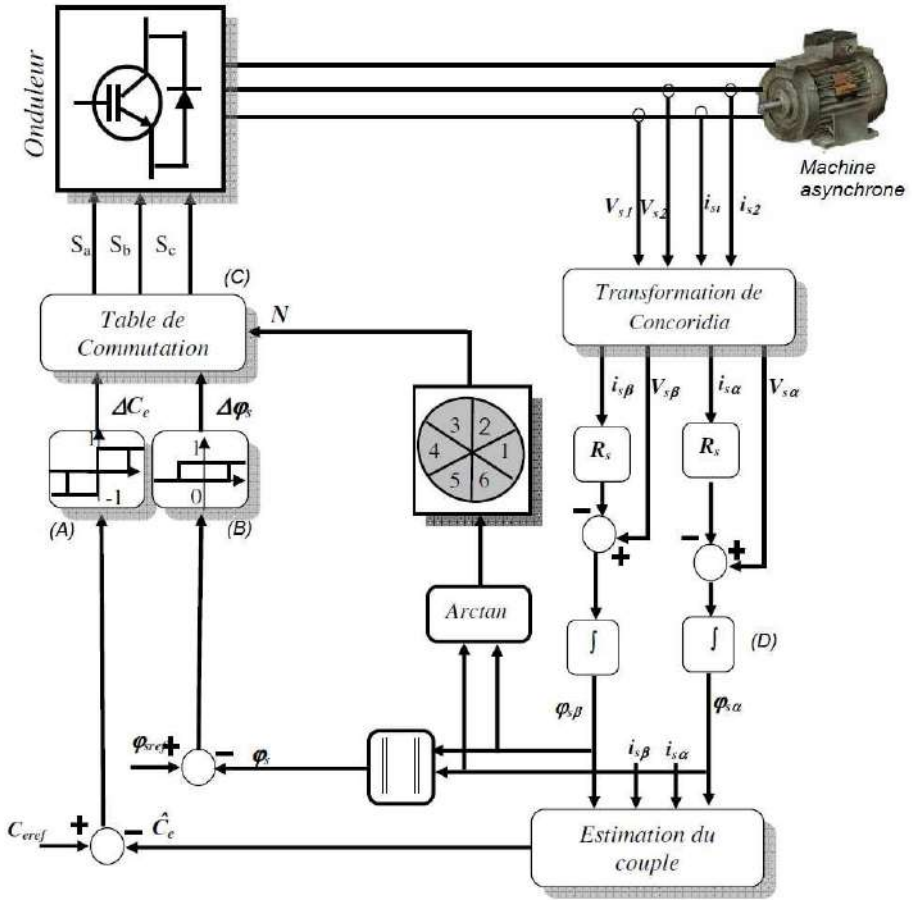


Fig. IV.1*: Structure de base de la commande directe du couple selon TAKAHASHI*

Son principe est de sélectionner un des huit vecteurs tensions générés par l'onduleur de tension pour contrôler, à la fois du couple et du flux statorique, après la détermination des composantes du vecteur flux statorique, soit par estimation en intégrant directement les tensions statorique, soit préférablement par observation. Ensuite le couple électromagnétique est estimé à partir des courants statorique mesurés.

L'erreur instantanée du couple est ensuite calculée et appliquée à un régulateur à hystérésis double bande, générant à sa sortie la variable S_{ce} à trois niveaux (-1, 0, 1), représentative du sens d'évolution temporelle souhaité pour le couple. De même, le module du vecteur flux statorique est calculé à partir des valeurs de ses coordonnées et l'erreur de flux rotorique injectée dans un régulateur à hystérésis de bande unique, générant à sa sortie la variable binaire $S_{\varphi s}$, représentative de l'évolution souhaitée pour le flux . La variable θ_s correspond à une discrétisation de l'angle du vecteur flux statorique et identifie le secteur angulaire dans lequel se trouve ce vecteur **[14].**

L'objectif d'une commande DTC est de maintenir le couple électromagnétique et le module du flux statorique à l'intérieur des bandes d'hystérésis par le choix de la tension de sortie de l'onduleur. Lorsque le couple ou le module du flux statorique atteint la limite supérieure ou inférieure de l'hystérésis, un vecteur de tension approprié est appliqué pour ramener la grandeur concernée à l'intérieur de sa bande d'hystérésis. Pour choisir le vecteur de tension, il est fondamental de connaître les règles d'évolution du couple et du module du flux statorique.

IV.3. La commande directe du couple (DTC) appliqué à la DFIG

Les méthodes de commande directe du couple (DTC) consistent à commander directement la fermeture ou l'ouverture des interrupteurs des onduleurs à partir des valeurs calculées du flux et de l'angle entre les flux statorique et rotorique comme montre la figure (IV.2).

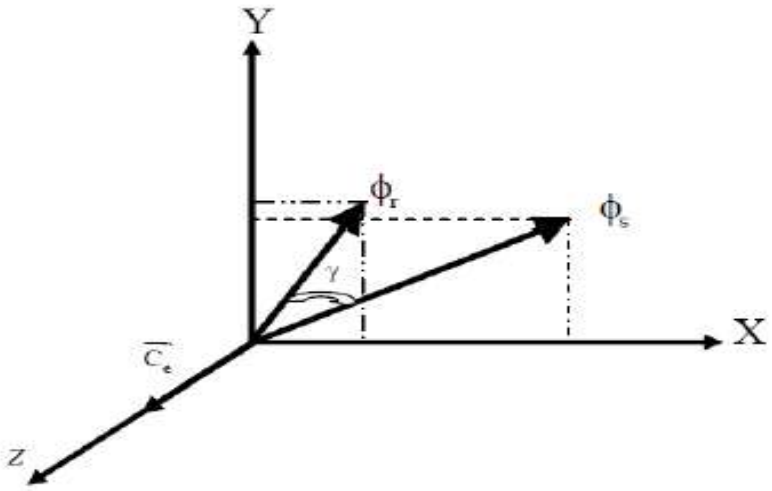


Fig. IV.2: *Représentation des flux statorique et rotorique*

Les changements d'état des interrupteurs sont liés à l'évolution de l'état électromagnétique du générateur. Ils ne sont plus commandés à partir des consignes de tension et de fréquence donnée à la commande rapprochée d'un onduleur à modulation de largeur d'impulsion.

IV.4.Contrôle du flux rotorique

A partir des équations des tensions statorique et rotorique dans un repère lié au rotor, le flux statorique et rotorique sont définis par les équations suivantes

$$\frac{d\emptyset_{sx}}{dt} = \sigma_s\left(\frac{L_r}{M_{sr}}\emptyset_{sx} - \emptyset_{rx}\right) - pw_r\emptyset_{sy} + V_{sx}$$

$$\frac{d\emptyset_{sy}}{dt} = \sigma_s\left(\frac{L_r}{M_{sr}}\emptyset_{sy} - \emptyset_{ry}\right) - pw_r\emptyset_{sx} + V_{sy} \qquad \textbf{[IV.1]}$$

$$\frac{d\emptyset_{rx}}{dt} = \sigma_r\left(\emptyset_{rx} - \frac{M_{sr}}{L_s}\emptyset_{sx}\right) + V_{rx}$$

$$\frac{d\emptyset_{ry}}{dt} = \sigma_r\left(\emptyset_{ry} - \frac{M_{sr}}{L_s}\emptyset_{sy}\right) + V_{ry} \qquad \textbf{[IV.2]}$$

Ou :

$$\sigma_s = \frac{R_s M_{sr}}{(M_{sr})^2 - L_s L_r}\ ,\ \sigma_r = \frac{R_r L_s}{(M_{sr})^2 - L_s L_r} \qquad \textbf{[IV.3]}$$

On peut écrire les courants sous la forme suivant :

$$i_{sx} = \frac{M_{sr}}{(M_{sr})^2 - L_s L_r}\left(\emptyset_{rx} - \frac{L_r}{M_{sr}}\emptyset_{sx}\right)$$

$$i_{sy} = \frac{M_{sr}}{(M_{sr})^2 - L_s L_r}\left(\emptyset_{ry} - \frac{L_r}{M_{sr}}\emptyset_{sy}\right) \quad \textbf{[IV.4]}$$

$$i_{rx} = \frac{L_s}{(M_{sr})^2 - L_s L_r}\left(\frac{M_{sr}}{L_s}\emptyset_{sx} - \emptyset_{rx}\right)$$

$$i_{ry} = \frac{L_s}{(M_{sr})^2 - L_s L_r}\left(\frac{M_{sr}}{L_s}\emptyset_{sy} - \emptyset_{ry}\right) \quad \textbf{[IV.5]}$$

Le couple électromagnétique est donné par :

$$C_e = \frac{3}{2}p(\emptyset_{sy} i_{sx} - \emptyset_{sx} i_{sy}) \quad \textbf{[IV.6]}$$

$R_s et\ R_r$ Sont respectivement les résistances des bobinages statorique et rotorique,

L_s, L_ret M_{sr}sont respectivement les inductances propres statoriques, rotoriques et la mutuelle inductance entre les deux bobinages.

$\emptyset_{sx}$,$\emptyset_{sy}$, $\emptyset_{rx}$, $\emptyset_{ry}$sont les composantes liées au rotor des flux statoriques et rotoriques.

i_{sx},i_{sy},i_{rx},i_{ry}Sont les composantes liées au rotor des courants statoriques et rotoriques.

On peut écrire l'équation (IV -2) sous la forme complexe suivante :

$$\frac{\overline{d\emptyset_r}}{dt} = \sigma_r\left(\overline{\emptyset_r} - \frac{M_{sr}}{L_s}\overline{\emptyset_s}\right) + \overline{V_r} \quad \textbf{[IV.7]}$$

On obtient:

$$\overline{\emptyset_r} = \int_0^t \left(\overline{V_r} - \sigma_r\left(\overline{\emptyset_r} - \frac{M_{sr}}{L_s}\overline{\emptyset_s}\right)dt\right) \quad \textbf{[IV.8]}$$

Si on considère que l'effet résistif est négligeable,$\left(\overline{\emptyset_r} - \frac{M_{sr}}{L_s}\overline{\emptyset_s}\right)$peut être négligée. On déduit alors :

$$\overline{\emptyset_r} = \overline{\emptyset_{r0}} - \int_0^t (\overline{V_r} dt) \quad \textbf{[IV.9]}$$

Pendant une période d'échantillonnage, le vecteur de tension appliqué reste constant, on peut écrire alors :

$$\overline{\emptyset_r}(k+1) \approx \overline{\emptyset_r}(k) + \overline{V_r} T_e \quad \textbf{(IV.10)}$$

Ou bien:

$$\Delta\overline{\emptyset_r} = \overline{V_r} T_e \quad \textbf{(IV.11)}$$

- $\overline{\emptyset_r}(k)$est le vecteur de flux rotorique au pas d'échantillonnage actuel.
- $\overline{\emptyset_r}(k+1)$est le vecteur du flux rotorique au pas d'échantillonnage suivant.

- $\Delta\overline{\emptyset_r}$est la variation du vecteur flux rotorique $(\overline{\emptyset_r}(k+1) - \overline{\emptyset_r}(k))$
- $T_e$est la période d'échantillonnage.

L'erreur du flux rotorique $\Delta\overline{\emptyset_r}$ est proportionnelle au vecteur de tension appliqué au rotor du générateur pour une période d'échantillonnage constante.

(**La figure IV.3**) montre que la sélection des tensions V_i correspondant au contrôle de l'amplitude de flux rotorique$\emptyset_r$, dans le plan *(α, β)*. L'équation (IV -11) montre que lors de l'application d'un vecteur de tension constant, l'extrémité du vecteur flux rotorique évolue dans le temps décrivant une droite parallèle à ce vecteur, et en se déplacent dans la direction du vecteur de tension rotorique $\overline{V_r}$à une vitesse égale à son amplitude **[14].**

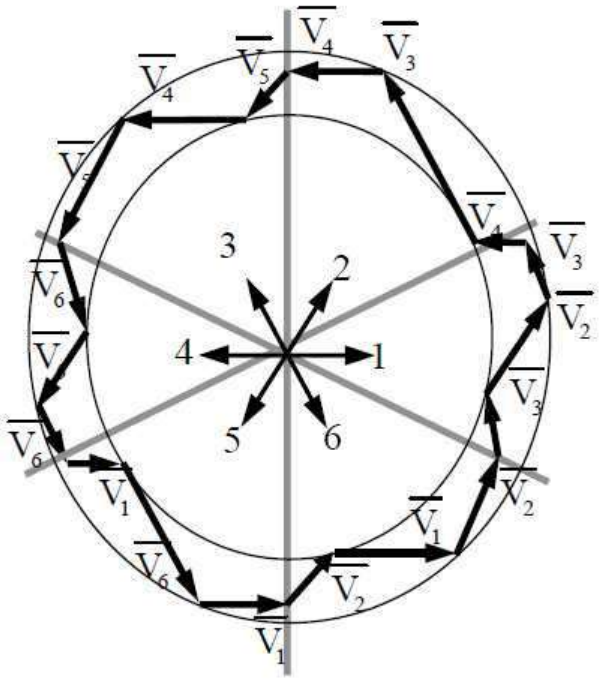


Fig. IV.3: *Sélection des tensions correspondant au contrôle du flux*

Son but est de maintenir l'extrémité du vecteur flux dans une couronne comme montré sur la **(Figure IV.3)**

La sortie du correcteur doit indiquer le sens d'évolution du module de flux, afin de sélectionner le vecteur de tension correspondant. Pour cela un simple correcteur à hystérésis à deux niveaux (**figure IV.4**) permet d'obtenir de très bonnes performances dynamiques .

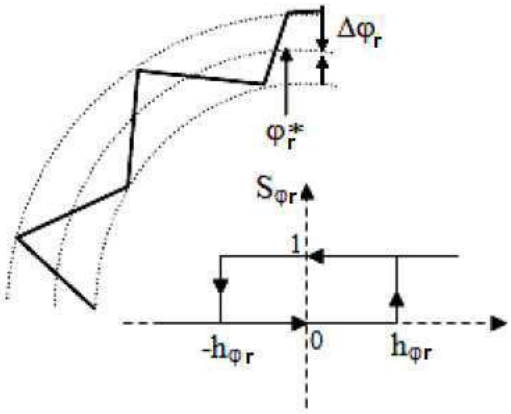


Fig.IV.4: *Contrôleur à hystérésis a deux niveaux*

On peut écrire ainsi:

$$\begin{cases} si\ \ \Delta\emptyset_r > h_{\emptyset_r} & & s_{\emptyset_r} = 1 \\ si\ \ 0 \le \Delta\emptyset_r \le h_{\emptyset_r} & et\ \ \frac{d\Delta\emptyset_r}{dt} > 0 & s_{\emptyset_r} = 0 \\ si\ \ 0 \le \Delta\emptyset_r \le h_{\emptyset_r} & et\ \ \frac{d\Delta\emptyset_r}{dt} < 0 & s_{\emptyset_r} = 1 \\ si\ \ \Delta\emptyset_r < -h_{\emptyset_r} & & s_{\emptyset_r} = 0 \end{cases} \qquad \textbf{[IV.12]}$$

En effet, si on introduit l'écart $\Delta\emptyset_r$entre le flux de référence $\emptyset_r^*$et le flux estimé $\emptyset_r$dans un comparateur à hystérésis à deux niveaux, celui-ci génère à sa sortie la valeur pour augmenter le flux et $s_{\emptyset_r} = 0$ pour le réduire ; ce type de correcteur permet d'obtenir de bonne performance dynamique du flux. Ainsi pour faire évoluer le vecteur de flux rotorique $\emptyset_r$ dans une couronne circulaire, les vecteurs V_{i+1}ou V_{i+2} peuvent être sélectionnés [13]. Malgré que ce correcteur ne permet pas l'inversion du sens de rotation du vecteur de flux$\emptyset_r$. Ainsi, pour aller en marche arrière, on s'impose un croisement d'un bras du convertisseur.

IV.5.Contrôle du couple électromagnétique

L'expression du couple électromagnétique peut être écrite sous la forme :

$$C_e = \frac{pM_{sr}}{\sigma L_s L_r}\emptyset_s\emptyset_r sin\gamma \qquad \textbf{[IV.13]}$$

On remarque clairement que le couple électromagnétique du DFIG dépend des paramètres suivants : le flux statorique, le flux rotorique et le déphasage entre les deux flux. Comme on a déjà vu qu'il est possible de contrôler et de maintenir le flux rotorique à peu près constants, et comme le stator est relié au réseau, le flux statorique est établi selon la fréquence de réseau, donc on ne peut agir que sur l'angle de déphasage γ entre les deux flux. La stratégie consiste à séparer l'ajustement des deux flux. Avec cette méthode on peut contrôler l'interaction entre les deux flux et donc contrôler le couple électromagnétique.

Pour la correction du couple, on utilise un comparateur à hystérésis à trois niveaux (**figure IV.5**), tels que «s_{ce}» représente l'état de sortie du comparateur et «h_c» la limite de la bande d'hystérésis.

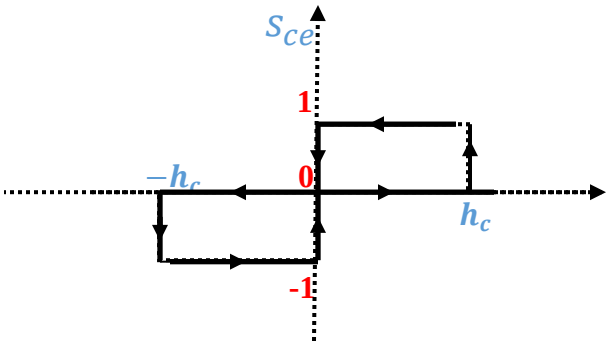


FIG IV.5 : *Comparateur a hystérésis a trois niveaux utilises pour le réglage du couple électromagnétique*

On peut écrire alors :

$$\begin{cases} si\ \Delta C_e > h_c & & s_{ce} = 1 \\ si\ 0 \le \Delta C_e \le h_c & et\ \frac{d\Delta C_e}{dt} > 0 & s_{ce} = 0 \\ si\ 0 \le \Delta C_e \le h_c & et\ \frac{d\Delta C_e}{dt} < 0 & s_{ce} = 1 \\ si\ \Delta C_e < -h_c & & s_{ce} = -1 \\ si\ -h_c \le \Delta C_e \le h_c & et\ \frac{d\Delta C_e}{dt} > 0 & s_{ce} = 0 \\ si\ -h_c \le \Delta C_e \le h_c & et\ \frac{d\Delta C_e}{dt} < 0 & s_{ce} = -1 \end{cases} \quad \textbf{[IV.14]}$$

L'écart ΔC_e , entre le couple de référence C_e^* et le couple estimé C_e est introduit dans le comparateur à hystérésis à trois niveaux ; ce dernier va générer à sa sortie la valeur $s_{ce} = 1$ pour

augmenter le couple, $s_{ce} = -1$ pour le réduire et $s_{ce} = 0$ pour le maintenir constant à l'intérieur d'une bande h_c autour de sa référence. L'augmentation des niveaux du correcteur entraine une minimisation de la fréquence de commutation moyenne des interrupteurs, car la dynamique du couple est généralement plus rapide que celle du flux **[13].** Ce type de correcteur autorise une décroissance rapide du couple électromagnétique. En plus, ce comparateur autorise une décroissance rapide du couple. Ce type de comparateur offre la possibilité de fonctionner dans les quatre quadrants sans intervention sur la structure de commande.

IV.6. Estimation du flux rotorique et du couple électromagnétique

Le flux et le couple sont directement calculés à partir du mesuré du courants i_{rx}, i_{ry} et les paramètres de la machine.

Le vecteur flux rotorique est calculé à partir de ses deux composantes biphasées d'axes *(x, y),* tel que :

$$\overline{\emptyset_r} = \emptyset_{rx} + j\emptyset_{ry} \qquad \textbf{[IV.15]}$$

Le module du flux rotorique s'écrit :

$$|\emptyset_r| = \sqrt{(\emptyset_{rx})^2 + \left(\emptyset_{ry}\right)^2} \qquad \textbf{[IV.16]}$$

IV.8. Cas d'une alimentation par un onduleur à trois niveaux

L'utilisation de l'onduleur à trois niveaux pour alimenter la MAS, sert à minimiser les ondulations du couple électromagnétique en présentant plus de vecteurs de tensions à sa sortie.

(La Figure II.14), déjà présentée au chapitre deux schématise ce type d'onduleurs.

La combinaison des états des différents interrupteurs est de 3^3, soit 27 états. Ces configurations correspondent à 19 états dont 16 sont actifs, les trois restant sont des séquences nulles.

(LaFigure IV.8) montre l'ensemble de vectrices tensions délivrées par l'onduleur à trois niveaux dans le plan (α, β) **[14].**

Le code de chaque vecteur de tension indique les états des trois demi-bras en haut de l'onduleur. Par exemple le vecteur 012 indique que:

- Les deux interrupteurs du 1er demi bras de haut (k_{11} et k_{12}) sont ouverts (code 0).
- Les deux interrupteurs du 2ème demi bras de haut (k_{21} et k_{22}) sont respectivement fermé et ouvert (code 1).
- Les deux interrupteurs du 3ème demi bras de haut sont fermés (code 2).

Dans ce cas, la commande des interrupteurs se fait par une MLI vectorielle basée sur la DTC. La représentation dans le plan (α,β) des différents vecteurs de tension à la sortie de l'onduleur, correspondant aux différentes configurations possibles et les états des interrupteurs, a été illustrée par **(LaFigure IV.8**).

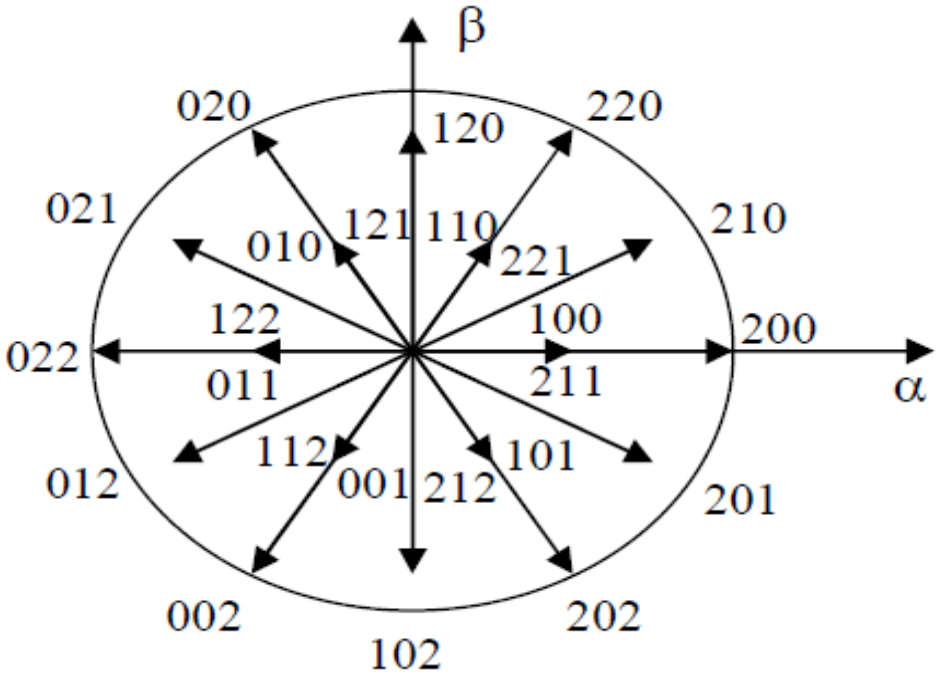


FIG IV.6: *Vecteurs des tensions et les états des interrupteurs d'un onduleur à trois niveaux*

Le tableau (IV.1), présente les séquences correspondant à chaque position du vecteur flux. Sachant que l'erreur entre le flux de référence et le flux estimé, est introduite dans un comparateur à hystérésis à trois niveaux (**figure IV.7.a**). D'autre part, l'erreur entre le couple de référence et le couple estimé, est introduite dans un comparateur à hystérésis à cinq niveaux (**figure IV.7.b**).

Table (IV.1): *Table de vérité de la DTC dans le cas d'un onduleur à trois niveaux.*

$\Delta\emptyset_s$	**1**					**0**					**-1**				
ΔC_e	2	1	0	-1	-2	2	1	0	-1	-2	2	1	0	-1	-2
s_1	220	210	200	201	202	120	120	000	102	102	020	121	211	112	002
s_2	020	120	220	210	200	021	021	000	201	201	022	122	221	212	202
s_3	022	021	020	120	220	012	012	000	210	210	002	112	121	211	200
s_4	002	012	022	021	020	102	102	000	120	120	202	212	122	221	220
s_5	202	102	002	012	022	201	201	000	021	021	200	211	112	121	020
s_6	200	201	202	102	002	210	210	000	012	012	220	221	212	122	022

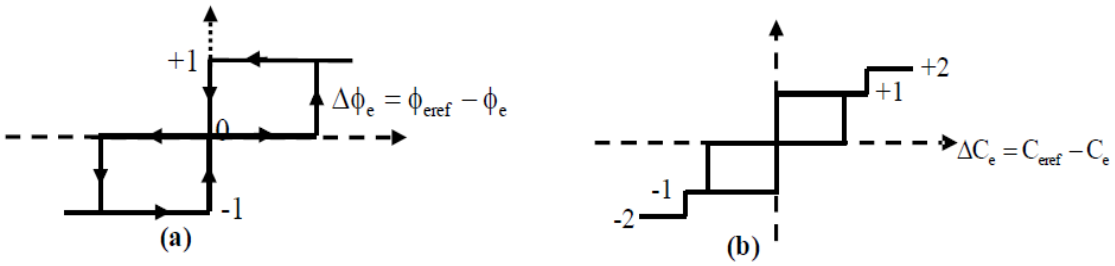
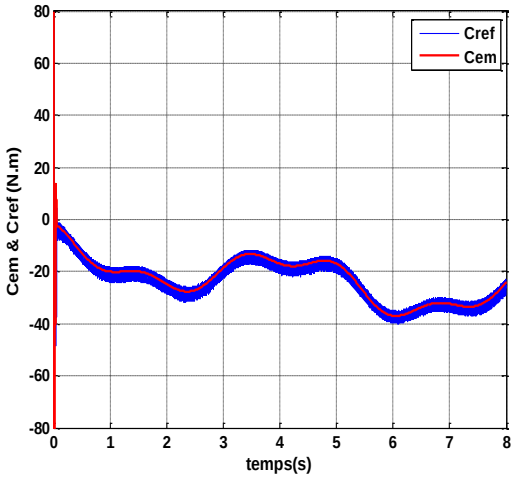


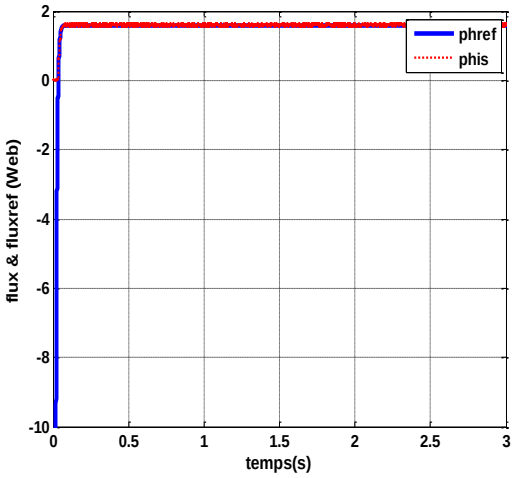
Figure IV.7: Correcteur ***à hystérésis:*** *a)du flux statorique, b) du couple électromagnétique*

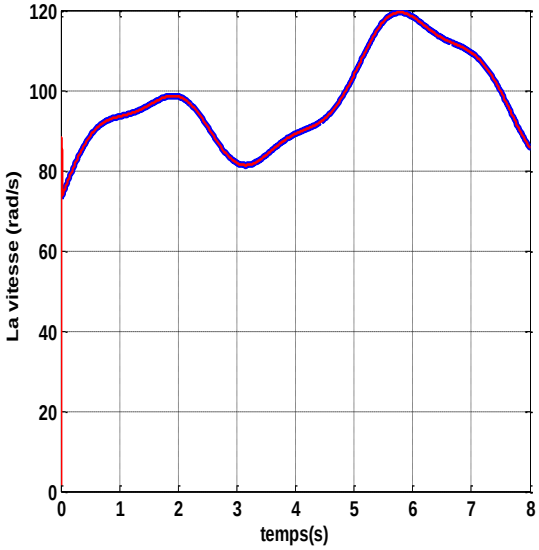
IV.9. Résultats de la simulation et interprétation

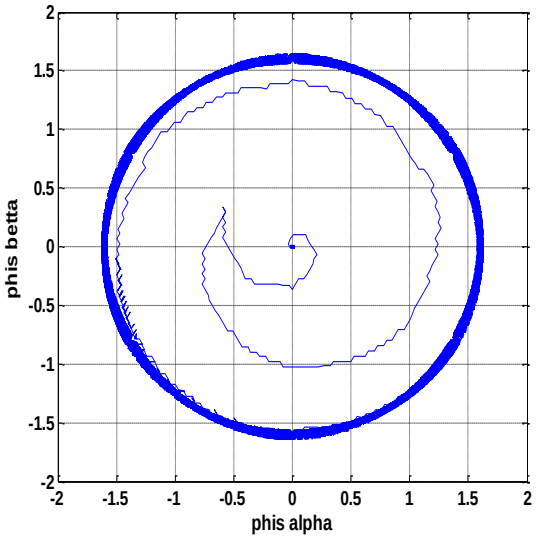
Dans ce paragraphe on présente les résultats de simulation du MADA commandé par la DTC et alimenté par un onduleur de tension à trois niveaux la figure **(IV.8)** présente les caractéristiques de la machine asynchrone alimentée par un onduleur à trois niveaux avec (les comparateur de flux et du couple sont à deux niveaux à hystérésis).

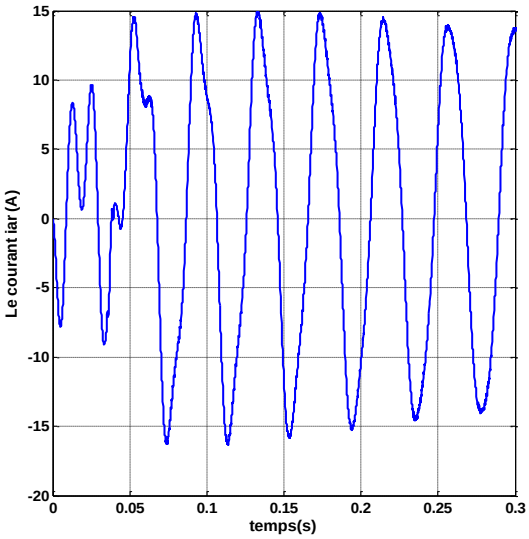
- l'évolution du couple électromagnétique qui montre bien que le suivi du couple de charge est effectué rapidement et sans dépassement dans les deux cas,
- l'évolution du module de flux statorique où on trouve des ondulations importantes sont apparus lorsque on utilise les comparateurs à deux niveaux ;
- l'évolution de flux statorique dans le repère biphasé (α. β), leur trajectoire est pratiquement circulaire

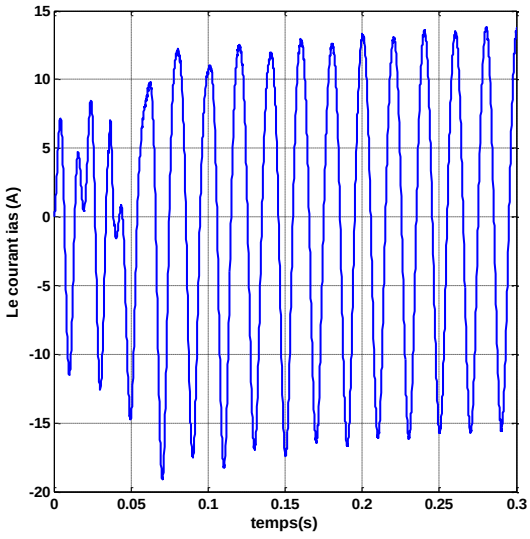

Cref
Cem
Cem & Cref (N.m)
temps(s)


phref
phis
flux & fluxref (Web)
temps(s)


La vitesse (rad/s)
temps(s)


phis betta
phis alpha


Le courant iar (A)
temps(s)


Le courant ias (A)
temps(s)

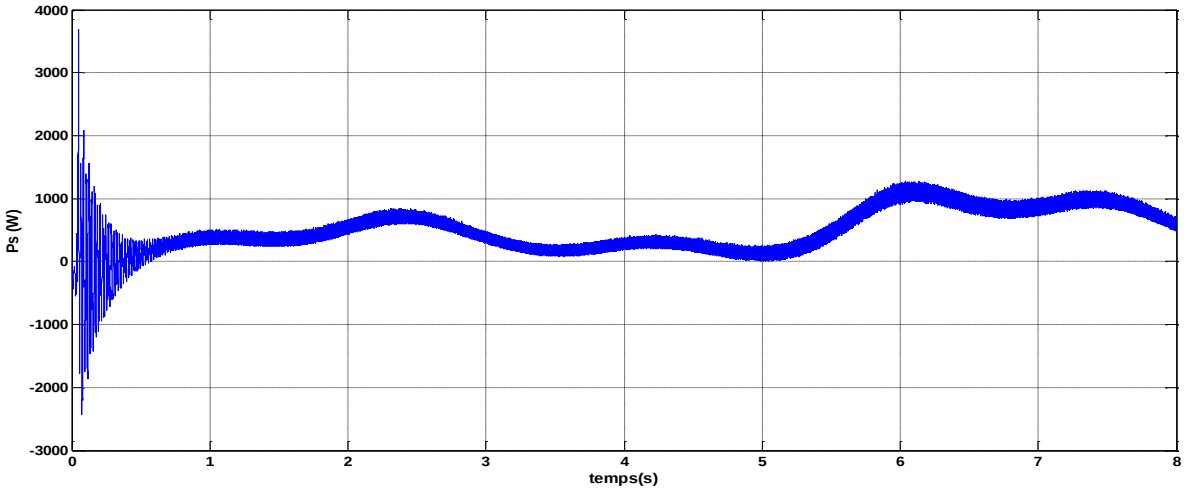


Figure IV.8:*les caractéristiques du MADA contrôlé par la DTC avec un fonctionnement Asymétrique de l'onduleur à trois niveaux*

IV.10. CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a présenté le principe de la commande directe de couple et du flux appliqué au moteur à induction, elle apparaît comme un moyen efficace et simple de piloter une machine asynchrone, ainsi il apporte une solution prometteuse aux problèmes de la robustesse et présente des avantages par rapport au contrôle vectoriel.

Dans le cas de l'onduleur à trois niveaux l'influence est très faible, malgré deux interrupteurs en défaut.

L'avantage de l'onduleur à trois niveaux est que la tension inverse à borne de chaque interrupteur de demi-bras est divisée en deux,

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif principal de ce mémoire est Commande de l'aérogénérateur par un onduleur à trois niveaux et l'étude d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation, appelée MADA, ainsi que l'apport que pourrait apporter son application dans une chaîne de production d'énergie éolienne.

Pour se faire, dans le premier chapitre, on a présenté un état de l'art sur les différents types d'éoliennes existantes, Ensuite La modélisation de la turbine éolienne. Partant de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine (Loi de Betz), nous avons décrit de façon explicite les différents éléments constitutifs de la turbine. Enfin nous avons établi un modèle mathématique de la turbine à partir de ses équations caractéristiques. Un site idéal bénéficie de vents assez forts et constants La structure la plus repondue est celle qui comporte un système de convertisseurs indirects connectés au rotor de la génératrice (MADA).

Après le choix de la génératrice et sa structure d'alimentation, la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation a fait l'objet du deuxième chapitre ainsi que la mise en équation des différentes grandeurs caractérisant la machine étudiée, ces équations nous ont permis d'établir un modèle mathématique équivalent, dont la complexité a été réduite , en se basant sur certaines hypothèses simplificatrices. Les résultats de simulation de ce modèle sous Matlab/simulink nous confirment la possibilité de la double alimentation grâce à la stabilité des différentes grandeurs de la machine étudiée. La génératrice asynchrone est destinée à la production d'énergie dans le domaine éolien. La notion de puissance sous toutes ces formes et primordiale. Il est donc très utile de raisonner en termes de puissance. Pour cela

Dans le troisième chapitre nous avons étudié, la commande vectorielle élaborée est en puissance active et réactive au niveau statorique. Dans cette partie, on a présenté l'étude théorique de la commande vectorielle, où on a exprimé les grandeurs statoriques de la machine asynchrone à double alimentation en fonction des grandeurs rotorique dans le but du pilotage de la MADA par le rotor. Le bon suivi des consignes poulies deux puissances active et réactive rotoriques par les puissances réelles débitées par le rotor de la machine a montré l'efficacité de la commande

appliquée. les différentes techniques de modulation de largeurs d'impulsion appliquées pour la commande des différentes structures d'onduleur..

En terminera ce travail par une présentation du fonctionnement asymétrique des onduleurs à trois niveaux alimentant la machine asynchrone contrôlée par la DTC et de voir le comportement du MADA lorsqu'elle est alimentée par ces onduleurs. Les résultats de simulation obtenues montre bien l'avantage de l'onduleur à trois niveaux.

La meilleure stratégie commande sera celle qui répond mieux aux exigences à savoir :

- ✓ Meilleures performances statiques et dynamiques,
- ✓ Meilleures poursuites des consignes de contrôle (Vitesse),
- ✓ Meilleurs rejets de perturbations (couple de charge),
- ✓ Insensibilité aux variations des paramètres (liés aux échauffements),
- ✓ Evolution des courants dans les limites admissibles, sans oscillations fortes sur le couple,
- ✓ Moindre complexité vis-à-vis de l'implantation.

Est en fin une conclusion générale clos notre mémoire.

Donné de la machine asynchrone double alimentation.

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

Paramètre :

Rs (Résistance du stator) =1.2 Ω

Rr (Résistance du rotor) =1.8 Ω

Ls (Inductance stator) = 0.1554H

Lr (Inductance du rotor) = 0.1568H

M (Inductance Mutuelle) = 0.15H

Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :

Nombre de pale =3

Rayon d'une pale R = 3m

Gain du multiplicateur : G=5.4

Inertie J= 0.0017 Kg.m2

Coefficient f=0.0024 N.m.s/rd

Annexe 1 : correcteur de la vitesse

1.1. Rappelle de contexte

Dans le chapitre I une structure de commande d'une turbine éolienne basé sur un asservissement de sa vitesse a été définie plusieurs correcteur de vitesse peuvent être envisagé. Dans notre étude on a choisi un correcteur proportionnel intégral. Dans cette annexe, nous détaillons ce type de régulateur (PI)

3- Dimensionnement du régulateur PI

La figure (AN-51) montre un système en boucle fermée corrigé par un régulateur PI.

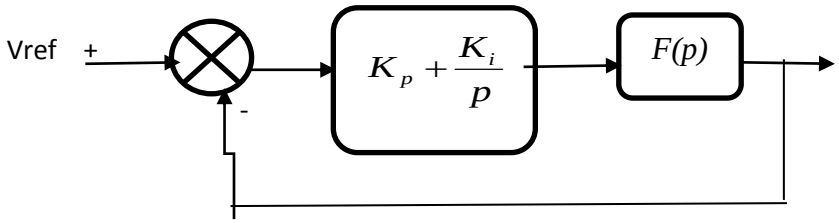


Figure AN-52 : Schéma bloc d'un système réglé par un PI

La forme du correcteur est la suivante : $K_p + \frac{K_i}{p}$

Avec K_p : est le gain proportionnel du régulateur ;

K_i : est le gain intégral du régulateur ;

Si on considère la fonction du transfert suivante :

$$\mathrm{F(p)} = \left(\frac{K}{1+\tau p}\right)$$

En boucle ouvert on aura la fonction de transfert suivante :

$$F_{BO}(p) = \left(\frac{K_p + \frac{K_i}{p}}{1+\tau p}\right) = \left(\frac{K(K_p p + K_i)}{p.(1+\tau p)}\right) = k\,K_i\left(\frac{1+\left(\frac{K_p.p}{K_i}\right)}{p.(1+\tau p)}\right)$$

On prend $\tau = \frac{K_p}{K_i}$

Alors $F_{BO}(p) = \left(\frac{K.K_i}{p+K.K_i}\right) = \left(\frac{1}{p\frac{1}{K.K_i}}\right)$

Pour attendre 95% de la consigne, le temps de repense tr du système bouclé vaut :$\tau_r = 3.\frac{1}{K.K_i}$

Or $K_i = \frac{K_p}{\tau}$ alors$\tau_r = 3.\frac{1}{K.K_p}$

D'où$\begin{cases} K_p = 3.\frac{1}{K.\tau_r} \\ K_i = 3.\frac{1}{K.\tau_r} \end{cases}$

BIBLIOGRAPHIE

[01]Beltran.B*«Maximisation de la Puissance Produite par une Génératrice Asynchrone Double Alimentation d'une Eolienne par Mode Glissant d'Ordre Supérieur»* .Article. Université de Brest.France.2008.

[02]AKEL.F*«Etude et réalisation d'un Emulateur de turbine éolienne»*. Mémoires magister. Ecole Militaire Polytechnique.Algerie.2009.

[3] V. Courtecuisse. «*Supervision d'une centrale multisourcea base d'éolienne et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique* », mémoire de doctorat ; école doctorale n°432 ; France.

[04] 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

[05] MATOUK.K et BOUGHERBAL.A. *«Etude d''une MPPT d''une éolienne».* Mémoire d'Ingéniorat .U.S.T.H.B .Algerie.2010.

[06] HAMID.A et DJELFAOUI.H« *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

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

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

[09] BOUKHARI.H et GUERMACHE.S *«Étude d'une éolienne à vitesse variable avec génératrice asynchrone pilotée par le stator »*Mémoire de Master. USTHB.2010.

[10] MENNICHE.R et SLIMANI .A*«Intégration d'une chaîne éolienne au réseau ».* Mémoire d'Ingéniorat .U.S.T.H.B .Algerie.2009

[11] Credeg .Centre de recherche et développementde l'électricité et du Gaz SONELGAZ.INFO N° 00 Décembre 2009.

[12] I. Hamzaoui. « *Modélisation de la MADA en vue de son utilisation comme aérogénérateur* », Mémoire magister ; Ecole Nationale Polytechnique, 2008.

[13] J. BELHADJ, «Commande Directe en Couple d'une Machine Asynchrone Structures d'observation Application aux systèmes multimachines-multiconvertisseurs» , Thèse Doctorat universite Toulouse, France .soutenue le : 7 juillet 2001

[14] EL.fennouh. «Apport des onduleurs multiniveaux dans la commande de la machine Asynchrone (moteur à induction) »université hadj Lakhdar de Batna. soutenu le : 30/06/2012

[15] S. EL- Aimani. « Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension », Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Centrale de Lille (ECL), 2005.

[16] KORICHI .M et CHIALI.L. *«Etude de l'intégration de la production décentralise dans un réseau « application à l'éolienne» ».* Mémoire d'Ingéniorat .U.S.T.H.B .Algerie.2008.

[17] MAHAMMEDI.M et AIT OUARAB.M*«Modélisation en vue d'une Commande d'une chaine éolienne utilisant des convertisseurs multiniveaux NPC ».* Mémoire d'Ingéniorat. U.S.T.H.B .Algerie.2010.

[18]Moussa Siddo. A et I. SoumanaNouhou, « *Etude du générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne* ».Mémoire d'Ingéniorat. Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2007.

[19] MIMOUN. M et DJERMOUNE.N. *«Modélisation de la machine asynchrone à cage en vue de son utilisation comme aérogénérateur».* Mémoires d'Ingéniorat.U.S.T.H.B .Algerie.2009.