République Algérienne Démocratique et populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Dr. YAHIA FARES

DE MEDEA

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique



Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

En Electrotechnique

Option : Automatique des systèmes

Thème

Commande directe de couple d'un Aérogénérateurs de la Machine Asynchrone à Double Alimentation

Etudié par :

Hendel Chems eddine

Akram Lafrid

Proposé et dirigé par :

Promoteur : Dr . Moualdia Abdelhafidh

Co-promoteur: Dr. Dr . Boudana Djamel

ملخص

هذا العمل يعالج إشكالية التحكم بالإستراتيجية التحكم المباشر في العزم الكهرومغناطيسي و تطبيقها في نظام تحويل الطاقة الهوائية الذي يحتوي على ماكنة لا متزامنة ذات تغذية المزدوجة .
الغرض من هذا الأمر هو الحصول على نتيجة المحاكاة العددية ويمتاز هذا النوع من السيطرة على تدفق وعزم دوران المولد دون الحاجة إلى استخدام جهاز استشعار الميكانيكي .

كلمات المفتاحية :

ماكنة لا متزامنة ذات تغذية المزدوجة , التحكم المباشر في العزم الكهرومغناطيسي

Résumé :

Ce travail présente une technique de la commande direct de couple (DTC) pour un système de conversion d'énergie éolienne équipée d'une génératrice asynchrone a double alimentation .

L'objectif de cette commande c'est d'obtenir le résultat de simulation numérique et l'avantage de ce type de contrôle le flux et le couple de générateur sans avoir besoin d'utiliser un capteur mécanique

Mots clés :

d'une génératrice asynchrone a double alimentation, de la commande direct de couple (DTC)

Abstract :

This work presents a direct torque control (DTC) technique for a wind energy conversion system equipped with a double power asynchronous generator.
The objective of this command is to obtain the result of numerical simulation and the advantage of this type of control the flux and the generator torque without needing to use a mechanical sensor

Keywords : double power asynchronous generator , a direct torque control (DTC)

Remerciements

Avant tout nous remercions Dieu Le tout puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, la patience, et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Nous remercions Monsieur **Moualdia Abdelhafidh**, *ainsi que Monsieur B* **Boudana Djamel** , *pour leurs suivis et leurs conseils durant l'évolution de ce travail.*

Nous adressons nos plus vifs remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant la charge de juger ce travail.

Enfin, Nous voudrions associer à ces remerciements toutes les personnes qui ont contribué de prés ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Sommaire

Introduction générale..... 01

Chapitre I : Etat de l'art des aérogénérateurs a double alimentations

I.1 Introduction 3

I.2 définition énergie éolienne 3

I.3 Etat de l'art des aérogénérateurs 4

I.3.1 Historique 4

I.3.2 Développement de l'énergie éolienne 6

I.3.3 Production éolienne 6

I.4 Différent type d'éolienne 7

I.4.1 Éoliennes à axe vertical : 7

I.4.2 Eoliennes a axe horizontal 8

I.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne 8

I.5.1 Les avantages 8

I.5.2 Les inconvénients 9

I.6. Application des éoliennes 9

I.7 Principaux composants d'une éolienne 9

I.8 Conversion de l'énergie éolienne 11

I.8.1 Loi de BETZ 11

I.9 Structure de la machine 14

I.10 Principe de fonctionnement de la MADA 14

I.11 Classification des machines à double alimentation 15

I.12 Domaine d'application de la MADA 16

I.12.1 Fonctionnement moteur dans les applications industrielles 16

I.12.2 Fonctionnement en moteur avec deux convertisseurs 16

I.12.3 Fonctionnement en moteur avec un seul convertisseur 17

I.12.4 Systèmes de génération éolienne à vitesse variable 17

I.13 Différentes structures d'alimentation de la MADA dans les systèmes éoliens 18

I.13.1 Machine asynchrone à double alimentation « type brushless» 18

I.13.2 MADA à énergie rotorique dissipée 19

I.13.3 Structure de Kramer 19

I.14 Conclusion 20

Sommaire

Chapitre II : Modélisation et Fonctionnement de l'aérogénérateur

II.1. Introduction 21

II.2 Modélisation de la machine à double alimentation : 21

II.3.1 Hypothèses simplificatrices 21

II.3.2 Modèle de la MADA dans le repère abc 22

II.3.3 Changement de repère 24

II.3.3.1 La transformation de Park 24

II.3.3.2 Equations électriques et magnétiques dans le système d'axes *(d, q)* 25

II.3.4 Choix du référentiel 26

II.3.5 Modèle biphasé de la MADA lié au champ tournant 26

II.3.6 Mise sous forme d'équation d'état 27

II.5 Description de l'onduleur triphasé 28

II.6 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) 29

II.7 Modélisation de la turbine : 30

II.7.1. Modèle des pales 31

II .7.2 Modèle du multiplicateur de vitesse 32

II .*7.3* Equation dynamique de l'arbre de la génératrice : 33

II.8. stratégie de maximisation de puissance MPPT 37

II.8. 2 Réglage de vitesse par régulateur de type classique PI : 39

II.9 Résultats obtenus avec la structure de MPPT avec asservissement de vitesse : 40

II.10 Interprétation des résultats de simulation de MADA : 41

II.11 Conclusion 48

Sommaire

Chapitre III
Commande DTC de la MADA

III.1 Introduction 49
II.2 Principe du contrôle dynamique du couple 50
III.2.1 : Contrôle du flux 51
III.2.2 : Contrôle du couple électromagnétique 52
III.3 Sélection de vecteur tension: 53
III.4 Estimation du flux rotorique 55
III.5 Elaboration du correcteur de flux 56
III.6 Estimation de couple 56
III.6.1 Elaboration du correcteur du couple 56
III.6.2 Elaboration de table de commutation 57
III .7 Modélisation sous MATLAB Simulink 57
III .7.1 Architecture générale 57
III .7.2 Bloc estimateur de flux 59
III .7.3 Bloc détection de secteur 59
III .7.4 Bloc commande des interrupteurs 60
III .8.Simulation de la commande dtc de la MADA 60
III.9 Conclusion 63
Conclusion général 64
Annexe a 65
Annexe b 66
Annexe c 66

Notations et symbole

A :La surface ***A*** d'un disque circulaire

r : le rayon du disque circulaire

d : le diamètre

π : est (***pi* = 3,1415**...).

V1 : La vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur.

V2 : La vitesse du vent en aval de l'aérogénérateur.

V : La vitesse de l'air traversant l'aérogénérateur.

S1 : La section amont du tube d'air.

S2 : La section aval du tube d'air.

F : Force exercée sur les pales d'une éolienne à incidence variable.

ρ : Masse volumique du vent

R : Rayon de la surface balayée par la turbine.

P_{aere} : La puissance absorbée par l'aérogénérateur.

P_{mt} : la puissance totale théoriquement

E_c : L'énergie cinétique de la masse d'air qui traverse l'aérogénérateur.

C_P : Coefficient de puissance

w_s : vitesse angulaire de stator

w_r : vitesse angulaire de rotorique

f_s : fréquence de stator

f_r : fréquence de stator

g : le glissement

w_{gl} : la vitesse angulaire de glissement.

s,r : Indices correspondants respectivement au enroulement statorique et rotorique.

sa , sb , sc : Phases du enroulement rotorique.

Ar , Br , Cr : Phases rotoriques.

d , q : Axes correspondant au référentiel lié au champ tournant.

θ : Angle entre l'axe de la phase du premier enroulement statorique et l'axe du rotor.

θ_S : Angle entre l'axe de la première phase de l' enroulement statorique et l'axe d.

θ_r : Angle entre l'axe de la première phase du rotor et l'axe d.

g : Glissement de la machine

$V_{abc\,s}$: Tensions des trois phases de l'enroulement statorique.

$V_{dq\,s}$: Tensions de l'enroulement statorique dans l'axe d,q.

$V_{ABC\,r}$: Tensions des trois phases de l'enroulement rotorique.

$V_{dq\,r}$: Tensions de l'enroulement rotorique dans l'axe d,q.

$i_{abc\,s}$: Courants des trois phases de l'enroulement statorique.

$i_{dq\,s}$: Courants de l'enroulement statorique dans l'axe d,q.

$i_{ABC\,r}$: Courants des trois phases rotoriques.

$i_{dq\,r}$: Courants de l'enroulement statorique dans l'axe d,q.

Lss, Lrr : Inductances propres statorique et rotorique.

Ms, Mr : Inductances mutuelles phases statoriques et rotoriques.

Msr : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre phase statorique et rotorique.

Rs , Rr : Résistances statorique et rotorique par phase.

ls , lr : Inductances de fuites statoriques et rotoriques.

τ_r : Constant de temps rotorique.

σ : le coefficient de dispersion entre les enroulements.

$\Psi_{s\,abc}$: Flux des trois phases de l' enroulement statoriques.

$\Psi_{r\,ABC}$: Flux des trois phases de l' enroulement rotoriques.

$\Psi_{s\,dq}$: Flux de l'enroulement statorique dans l'axe d,q.

$\Psi_{r\,dq}$: Flux rotorique dans l'axe d,q.

Ψ_m : Flux magnétisant.

C_{em} : Couple électromagnétique.

Uc : Tension d'entrée d'un niveau de l'onduleur.

Cr : Couple résistant

p : Nombre de paire de pôles.

N_r, N_s : Nombre de spires des bobinages rotoriques et statoriques.

ω_r, ω_S, ω : Pulsations électriques respectivement du rotor, du stator, et de glissement.

f_r : Coefficient de frottements visqueux.

Ω : Vitesse de rotation de la machine

J : Moment d'inertie de la machine.

P_v : puissance cinétique du vent

$C_{aéro}$: couple aérodynamique

$P_{aéro}$: puissance aérodynamique

β : L'angle d'orientation de pale

λ : ratio de vitesse

Ω_t : la vitesse de la turbine

C_g : Couple du multiplicateur

G : Gain du multiplicateur

J : l'inertie totale J

J_g : l'inertie de la génératrice

J_t : l'inertie de la turbine

C_{em} : couple électromagnétique

C_{mec} : Couple mécanique

C_{vis} : Couple des frottements

Kf : Coefficient de frottement visqueux

K_P : gain proportionnel

K_i :gain intégral

K : Multiplicateur mécanique

ϕ_{ra} ϕ_{rb} : vecteurs de flux rotorique virtuel dans le plan α–β.

T_{ec} : périodique de contrôle

S_a, S_b, S_c : les signaux de commande

MADA : Machine asynchrone à double alimentation.

MLI : Modulation de largeurs d'impulsions.

DTC : commande directe du couple

PI : Régulateur Proportionnel Intégrateur

MPPT : Maximum Power Point Tracking

Bibliographie

[1] **J. Chen, C. Nayar, L. XU,** « Design and FE analysis of an outer-rotor PM generator for directlycoupled wind turbine applications », proceeding of the IEEE industry applications conference, New York, USA, 1998, vol 1, pp. 387-39.

[2] **O. Carlson, A. Grauers, J. Svensson, A. Larsson**, « A comparison of electrical systems for variable speed operation of wind turbines », European wind energy conf., 1994, p. 500-505.

[3] **J. Martin,** «Energies éoliennes», Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21

[4] **S. El Aimani,** « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL).2004

[5] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, «Eoliennes», Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. BM 4 640 1 - BM 4 640 21.

[6] S. ALI et B. MOURAD ,«Etude d'un Générateur Asynchrone dans La Production d'Energie Electrique par Eolienne», Mémoire d'ingénieur d'état en Génie Electrique,ENP. 2006

[7] **L. Moreau,** « Modélisation conception et commande de génératrice à réluctance variable basse vitesse », thèse de doctorat, de l'université de Nantes, le 9 décembre, 2005

[8] **F.POITIER**, «Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne», thèse de doctorat, Université de Nantes, 19/11/ 2003.

[9] **F.Poitier**, «Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne», thèse de doctorat, Université de Nantes, 19/11/ 2003.

[10] Grignoux, R. Gibert, P. Neau, C. Buthion, « Eoliennes en milieu urbain -État de l'art», janvier 2006, pp. 1-129

[11] **H. Ben Ahmed,** « Généralités sur l'énergie éolienne et convertisseurs associés et convertisseurs associés », séminaire électrotechnique de l'académie de Rennes, 9 mars 2004.

[12] **T. Grignoux, R. Gibert, P. Neau, C. Buthion,** « Eoliennes en milieu urbain - État de l'art», janvier 2006, pp. 1-129.

[13] **R. Michaux** P. Letellier « Les machines discoïdes à champs axial dans les systèmes de production électrique », revue de l'électricité et de l'électronique, N° 3, mars 1997, pp. 37-42.

[14] **M Lopez,** « contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée », thèse de doctorat, université de Paris, 2007

[15] **F .Merrahi,** « alimentation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation (application à l'énergie éolienne) » mémoire de magister, école nationale polytechnique, 2007.

[16] **N .MEKKAOUI,** « contribution a la modélisation et a la commande d'une mini-centrale éolienne a base de machines a induction simple et double alimentée », Mémoire de Magister, université de Batna, 2004.

[17] **A .Tamarat,** « modélisation d'une chaine de conversion basée sur une machine asynchrone à double alimentation » mémoire de magister, université de Biskra, 2009.

[18**] B .Toual,** « modélisation d'une génératrice asynchrone à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable », mémoire de magister, université de Batna, 2010.

[19] **G.SEGUIER**″ Convertisseurs de l'Electronique de Puissance″, V4 : la Conversion Continue-Alternative. ″ Technique et Documentation Lavoisier (Paris), 1989.

[20] **Z. BOUDJEMAA** << commande DTC sans capteur de vitesse de la machine asynchrone a double alimentation par regulateur pi-flou>> Thèse de magister, ENST D'ORAN 2009

[21] S. **El Aimani** « Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension », Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 2004.

[22] **Moualdia Abdelhafidh** «Stratégies de Commande DTC-SVM et DPC appliquées à une MADA utilisée pour la production d'énergie éolienne» Thèse de Doctorat. En Génie Electrique ENP Algérie (Ecole Nationale Polytechnique) 2014 .

[23] **Carlos Canudas de Wit** « Modélisation contrôle vectoriel et DTC » 2000

[24] A. Ameur « commande sans capteur de vitesse par DTC d'une machine synchrone à aimants permanents dotée d'un observateur d'ordre complet à mode glissants » université de Batna 2005

[25] Bernard de Fornel « Techniques de l'ingénieur » D3 623.

[26] **M.G. Jayne** « New Direct torque Control scheme » EPE 2005.

[27] **B.FORNEL** «Machines asynchrones : commande par contrôle direct de couple» Techniques de l'ingénieur D3623, 2003.

[28] **B.FORNEL** «Machines asynchrones : commande par contrôle direct de couple» Techniques de l'ingénieur D3623, 2003.

[29] **A. BADI** «commande de vitesse et de position basé sur la commande directe du couple» Projet de fin d'études, centre université YAHIA FERES de Médéa, 2005.

Listes des figures :

Fig I.1 : Principaux organes du système de conversion éolien…….…….3

Fig I.2 : La génération d'électricité éolienne…….5

Fig I.3 : La génération d'électricité éolienne…….5

Fig I.4 : Puissance éolienne cumulée dans le monde en MW……6

Fig I.5 : Technologie éolienne à axe vertical…….7

Fig I.6 : Technologie éolienne à axe horizontale……..8

Fig I.7: Elément constitution d'une éolienne……...10

Fig I.8 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne……..11

Fig I.9 : Coefficient de puissance…….13

Fig I.10 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes……...13

Fig I.11 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA…….14

Fig I.12 : Schéma de principe d'une simple MADA……15

Fig. I.13 : Schéma de principe de deux MADA en cascade…….15

Fig I.14 : Schéma de la MADA alimenté par deux convertisseurs…….17

Fig I.15 : Schéma de la MADA alimenté par un seul convertisseur……...17

Fig I.16: Schéma de l'alimentation de la MADA pour une application génératrice……..…18

Fig. I.17 **:** Machine asynchrone à double bobinage au stator statorique……19

Fig.I.18 : Variation de la vitesse par réglage de la résistance du rotor……..19

Fig I.19 : Structure de Kramer…….20

Fig.II.1 : Représentation schématique du modèle d'une MADA MADAMADA……21

Fig.II.2 : Représentation de la MADA dans le repère de Park……..24

Fig II.3 : Onduleur de tension à 2 niveaux……...28

Fig II.4 : Principe de la commande MLI……..30

Fig II.5 : Turbine éolienne…….30

Fig II.6 : Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de cp fonction de λ et β [annexe b]……..…....32

Fig. II.7. Schéma bloc du modèle des pales……....32

Fig. II.8 Schéma bloc du modèle du multiplicateur de vitesse……...33

Fig. II.9 : Schéma bloc du modèle de l'arbre mécanique……...34

Fig II.10 : Schéma bloc du modèle de la turbine……...34

Fig II.11 : Profil du vent appliqué à la turbine pendant 10 secondes…….35

Fig II.12: Allure des vitesses……..36

Fig II.13 : Allure des grandeurs aérodynamique……37

Fig II.14 : Courbe typique de la puissance produite d'un aérogénérateur à vitesse variable…..…38

Fig. II.15 : Schéma bloc de la régulation de vitesse par régulateur PI……..….39

Fig. II.16 : Profil du vent appliqué à la turbine pendant 10 secondes……...40

Fig.II.17 : Résultats du MPPT obtenus avec régulateur PI……...41

Fig II.18 : résultats 1er cas et 1er test **(**Vra, Vrb, Vrc)=0……..43

Fig II.19 : résultats de 1er cas et 2er test (Vra, Vrb, Vrc=10v et fr=15hz)……...44

Fig II.20 : résultats de 1er cas et 3er test (Vra,Vrb,Vrc=0 et fr=15hz)…….....45

Fig II.21 : résultats de 2er cas et 1er test (Vra, Vrb, Vrc=15et fr=15hz et W=100)…….46

Fig II.22 : résultats de 2er cas et 1er test (Vra, Vrb, Vrc=15et fr=15hz et W=200)……..…47

Fig III.1 : Structure de la Commande Directe du Couple DTC…….50

Fig III.2 : a.) Sélection de la vectrice tension V_i correspondant au contrôle de l'amplitude de flux, b.) Évolution du vecteur flux rotorique dans le plan (α, β)……..51

Fig III.3 **:** Représentation complexe des vecteurs flux statorique et rotorique……..…52

Fig III.4 : Sélection de vecteur tension selon la zone 1……..53

Fig III.5 : Fonction de sortie du correcteur du couple (hystérésis à trois niveaux)……56

Fig III.6 : Structure générale de DTC sur mathlab Simulink……....57

Fig.III.7 Structure du bloc d'estimation de flux……..…58

Fig III.8 : Structure du bloc de détection du secteur……..…59

Fig III.9 : Structure du bloc de commande des interrupteurs……...60

Fig III.10 Profil du vent et la vitesse de rotation avec sa référence……..61

Fig III.11 Couple électromagnétique et le flux du rotor……...61

Fig. III.12 : Flux rotorique dans le plan (α,β)……...…62

Fig III.13 : Tension simple et le courant phase rotorique……...62

Listes Tableau

Tableau I-1 : classification des turbines éoliennes …….7

Tableau .III.1. Stratégie de contrôle avec un comparateur à hystérésis à trois niveaux…56

Introduction générale

Introduction général

La production de l'énergie renouvelable a connu des développements considérables au cours des dernières années. En effet, les modes de production reposant sur la transformation d'énergie renouvelable par exemple éolienne, sont appelés à être de plus en plus utilisés dans le cadre du développement durable. Pour réaliser ceci, il est important de disposer de différentes technologies de générateurs telles que les machines synchrones , asynchrones et les machines à aimants permanents. La machine à induction à cage est la plus utilisée, car elle est peut coûteuse, robuste et sa maintenance est très facile et simple L'étude, que nous présentons, consiste à utiliser une machine asynchrone à double alimentation (Doubly-fed Asynchrounous Machine (DFAM)) fonctionnant en génératrice non autonome alimentée par un convertisseur au rotor, l'utilisation du convertisseur statique de fréquence associé au rotor qui fournit le complément de la fréquence nécessaire pour maintenir la fréquence du stator constante; c'est-à-dire que la fréquence du réseau reste constante lors de la variation de la vitesse mécanique [1].

Afin d'obtenir avec la machine asynchrone à double alimentation des performances semblables il est nécessaire d'appliquer la commande directe du couple (DTC : direct torque control) est une méthode de commande des variateurs de vitesse électrique. La méthode estime le flux magnétique et le couple du moteur à partir de la mesure des tensions et des courants alimentant.

Le contenu de ce mémoire est structuré en trois chapitres.

Un état de l'art de l'énergie éolienne sera présenté dans le premier chapitre de ce mémoire .A la fin de ce chapitre on présentera des généralités sur la MADA ses applications Ensuite, les différentes machines électriques utilisées pour la conversion éolienne. la machine asynchrone à double alimentation en vitesse variable.

Le sujet du deuxième chapitre on présentera la modélisation de la MADA, sa mise en équations permettra de simuler son modèle. Et la modélisation de l'alimentation de la machine. Ensuite nous avons présentons la chaîne de conversion électromécanique du système éolien basé sur la machine asynchrone à double alimentation…. La turbine éolienne entraine la MADA à une vitesse de rotation variable à travers un multiplicateur de vitesse. C'est aussi dans ce chapitre que la stratégie MPPT est présentée cette dernière repose sur le

principe de l'extraction du maximum de puissance de l'éolienne et de son injection dans le réseau.

Dans le troisième chapitre on propose technique de commandes DTC (direct torque control),(direct power control) appliquées au système de conversion d'énergie éolien. La Première (DTC) est appliquée au convertisseur à MLI côté rotor. Ce type de commande considère le convertisseur associé à la génératrice comme un ensemble où le vecteur de commande est constitué par les états de commutation. En fin de ce mémoire nous présentons une conclusion générale de cette étude.

CHAPITRE 1

Etat de l'art des aérogénérateurs a double alimentations

I.1 Introduction

Ces dernières années, l'intérêt dans l'utilisation des énergies renouvelables nénesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne. L'énergie éolienne est véhiculée par les vents 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. de ce chapitre est de mener une étude théorique sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA) concernant son principe de fonctionnement, les différentes stratégies de commande et évaluer les performances apportées par cette machine. les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes [2].

I.2 définition énergie éolienne

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

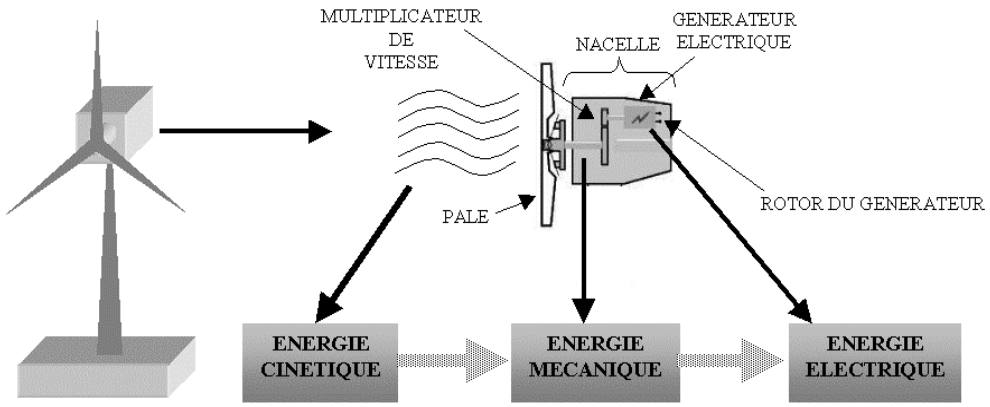


Fig I-1 : *Principaux organes du système de conversion éolien.*

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [5].

I.3 Etat de l'art des aérogénérateurs

I.3.1 Historique

Le vent, comme étant une source d'énergie traditionnelle non polluante, a été exploité depuis plusieurs siècles pour la propulsion des navires. Il y'a plus de 3000 ans déjà, l'énergie du vent était transformée en énergie mécanique, d'une part sur terre par les moulins et des systèmes de pompage de 1'eau, d'autre part en mer, par les bateaux . La génération d'énergie électrique par le vent a débuté à la fin du 19eme siècle. Parmi les pionniers on peut citer **Paul La Cour** au Danemark qui a associé une dynamo à une éolienne en 1891. Dans les années 1950 **Johannes Jule** (élève de Paul La Cour) devient aussi un pionnier dans l'utilisation de 1'énergie éolienne en construisant les premières éoliennes produisant du courant alternatif [1].

La première crise pétrolière en 1973 contribua à éveiller 1'intérêt pour 1'énergie éolienne dans plusieurs pays. Les USA ont notamment lancé en Californie une opération à grande échelle au début des années 1980 en passant de 7MWen 1981 à 386 MW en 1985. Aujourd'hui, les études portent sur l'amélioration de l'aérogénérateur ainsi que sur la chaine de conversion de 1'énergie du vent en énergie électrique exploitable par le réseau. Les premières éoliennes mettent en œuvre une génératrice asynchrone liée aux pâles par 1'intermédiaire d'une boite de vitesse, fonctionnant à vitesse fixe et directement reliée au réseau (pas d'interface électronique). Cette technologie est surtout employée au Danemark dans les années 1970 [1].

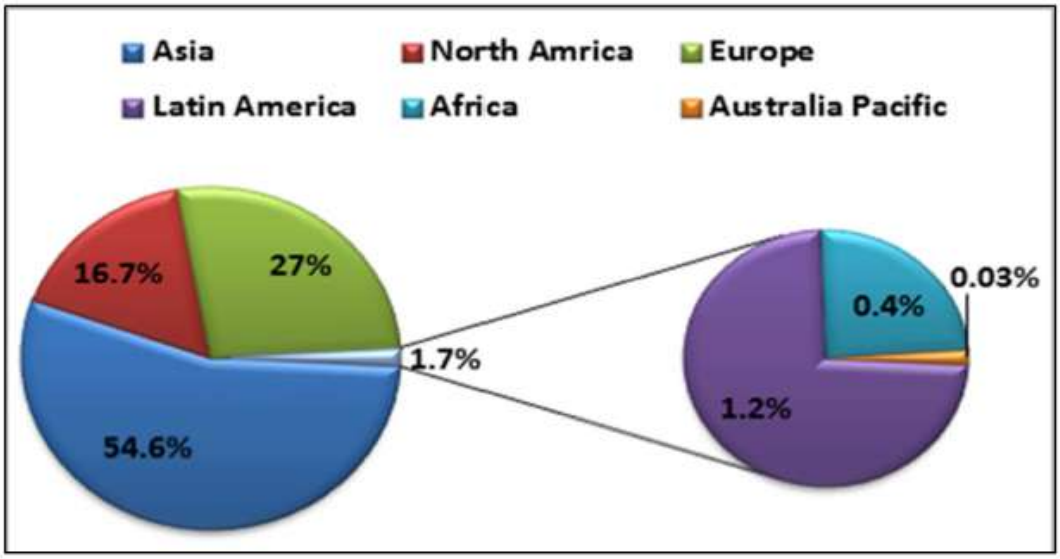


Fig I-2 : La génération d'électricité éolienne

I.3.2 Développement de l'énergie éolienne

Depuis ces dernières années, la production d'électricité par l'énergie éolienne s'est considérablement développée dans le monde entier (figure 1.3). Ceci est principalement dû à Deus raisons.

- Produire une énergie propre.
- Trouver une source d'énergie durable alternative aux combustibles fossiles.

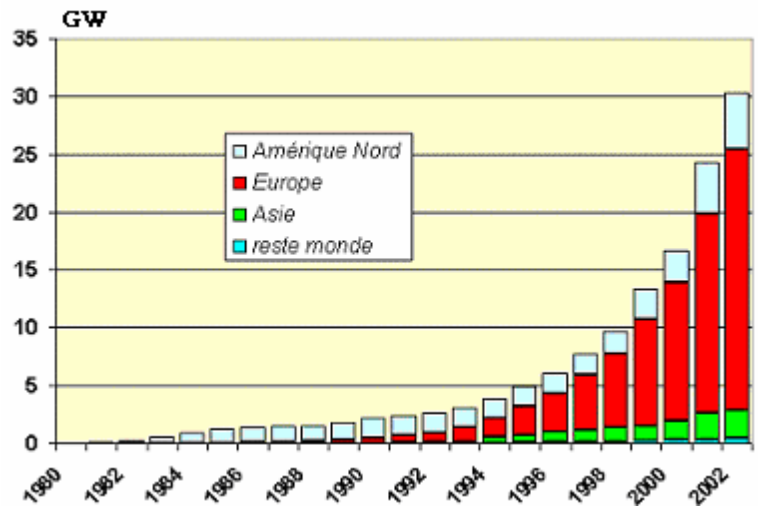


Fig I-3 : La génération d'électricité éolienne

Cependant tous les pays n'y attachent pas la même importance et n'y accordent donc pas les mêmes moyens. C'est pour ces raisons que la France, par sa politique de production nucléaire.est en retard face à ses voisins Européens (avec moins de 1000 MW installés jusqu'en 2006 alors que pour 2010 l'objectif est d'atteindre 13500 MW [2].

I.3.3 Production éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la Planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est crée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. L'énergie récupérée est fonction de la vitesse du vent et de la surface mise face au vent. L'utilisation de cette énergie est soit directe (mouture, pompage) soit indirecte (Production d'électricité via un générateur). Deux applications sont possibles la production d'électricité et le pompage éolien.

La production d'électricité (aérogénérateur): Ces systèmes demandent une bonne technicité. Si l'on excepte l'Inde et la Chine, peu de pays en développement en fabriquent. Les projets exigent des sites ventés et des niveaux d'investissement élevés. Les puissances obtenues demeurent encore à l'heure actuelle des projets pilotes [2].

Le pompage éolien : Les pompes éoliennes sont d'une puissance généralement inférieure à 10 KW.C'est une technologie ancienne avec de nombreuses variantes à travers le monde. Elle demande des vents de 3 à 4 mètres par seconde au minimum. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers [4].

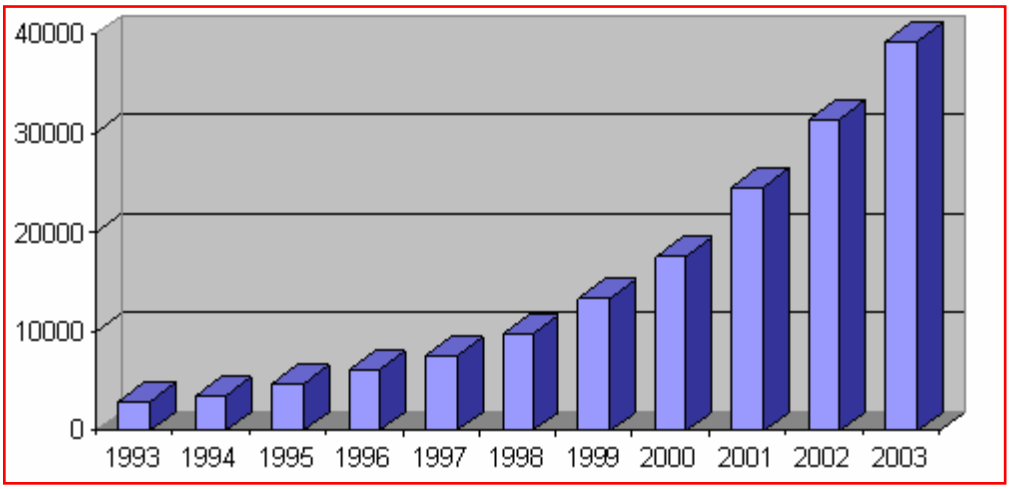


Fig I-4 : Puissance éolienne cumulée dans le monde en MW.

I.4 Différent type d'éolienne

Le tableau (I.1) suivant présent une classification des turbines [10]:

ECHELLE	DIMÉTRE DE L'HÉLICE	PUISSANCE DELIVRÉE
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40KW
Moyenne	12 m à 45 m	DE40KWà 1MW
Grande	46 m et plus	1 MW et plus

Tableau I-1 : classification des turbines éoliennes [7].

Les turbines éoliennes sont classées selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux types de Turbines éoliennes.

-Turbines à axe vertical.

-Turbines à axe horizontal.

I.4.1 Éoliennes à axe vertical :

Ils ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologies ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieux [5].

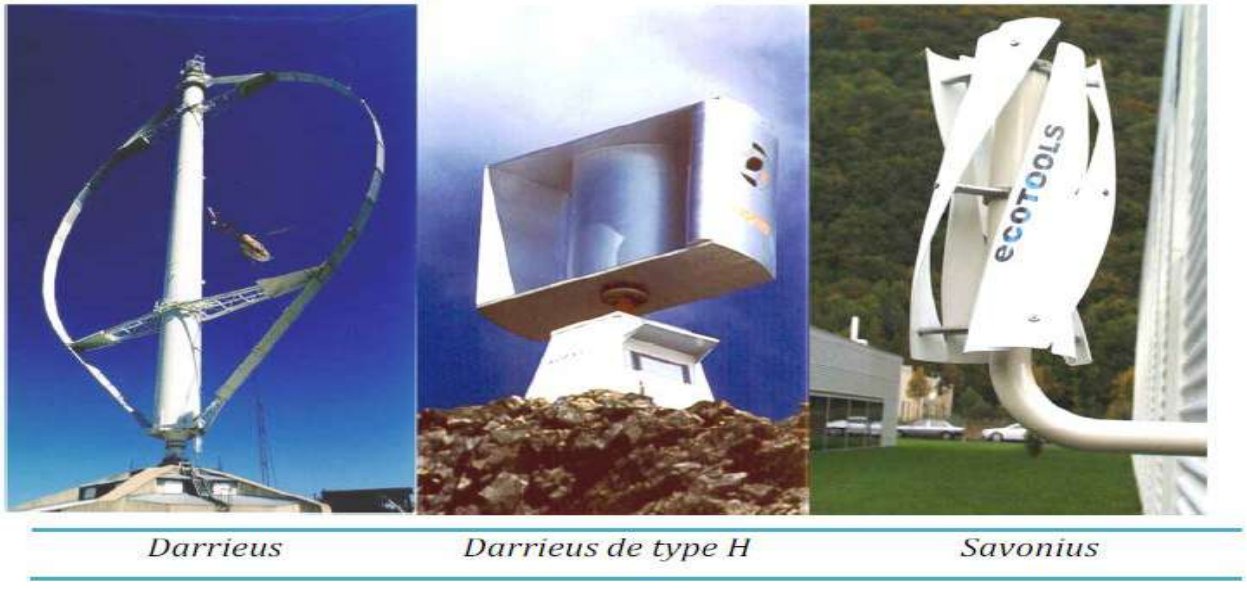


Fig I-5 : technologie éolienne à axe vertical.

A nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins rependue. Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit :

I.4.2 Eoliennes a axe horizontal

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent.[6]

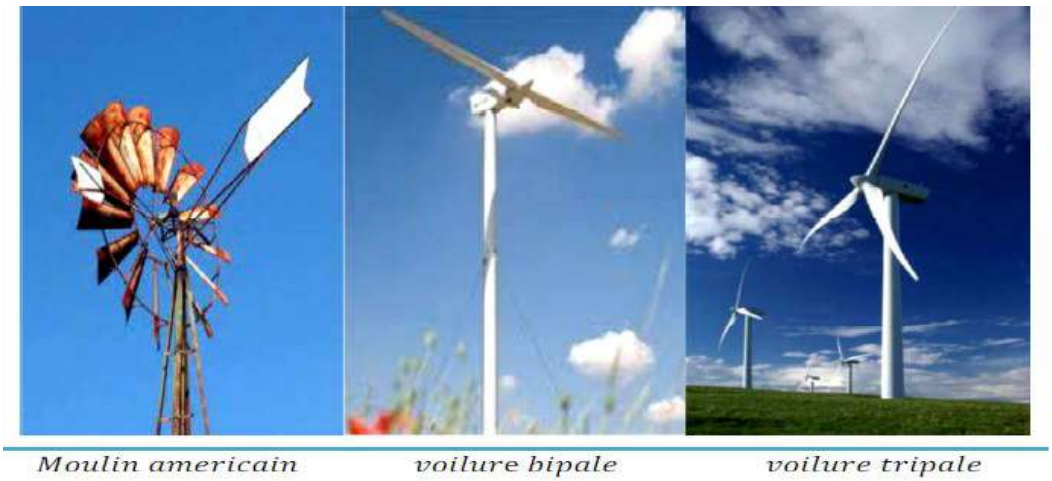


Fig I-6 : technologie éolienne à axe horizontale.

I.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

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

I.5.1 Les avantages

- L'énergie éolienne, propre, fiable, économique, et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement

-Bien que ne pouvoir envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative.

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuit, et inépuisable.
- Chaque mégawatheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0 ,9 tonne les émissions de CO2 rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique.

- Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance.

-L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et

Ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs [10].

I.5.2 Les inconvénients

L'électricité éolienne est une énergie intermittente, l'énergie éolienne ne suffit pas en elle-même à définir une politique énergétique et environnementale.

-Des effets sur le paysage (esthétique), problème de bruit, d'interférences électromagnétiques.

-L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement [11].

I.6. Application des éoliennes

Une éolienne est une machine capable de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent. Cette énergie sera transformée en énergie mécanique de rotation en tenant compte de rendement de la machine. Ce dernier peut exploiter de deux manières :

-Directement pour entrainer une pompe.

-Pour entrainer une génératrice électrique.

Dans le cas de production d'énergie électrique deux cas d'énergie se présentent :

-stockée dans des accumulateurs.

-Utilisé directe sur réseau de distribution.

L'énergie éolienne sert d'un coté de complément aux moyens traditionnels de production, d'un autre coté à la production pour alimenter les sites non raccordés [6].

I.7 Principaux composants d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de [4].

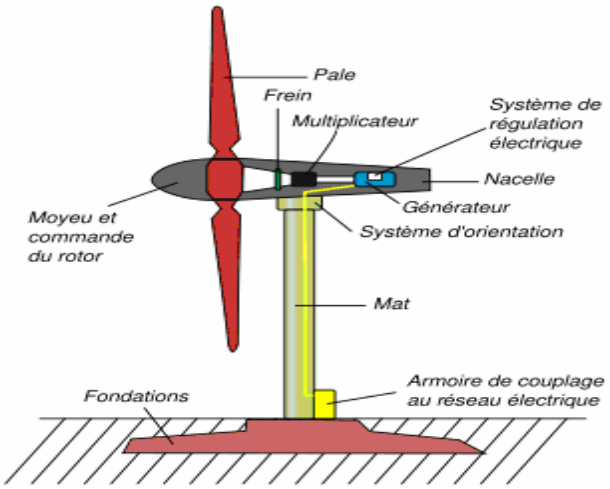


Fig I-7: élément constitution d'une éolienne.

1-Le multiplicateur de vitesse: sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique.

2-Le mat ou la tour : c'est un tube d'acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier d'une part du maximum de l'énergie cinétique du vent et de l'autre part pour éviter les perturbations près du sol. Au sommet du mat se trouve la nacelle.

3-.La génératrice : c'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

4-Un rotor balaye un disque circulaire au cours d'une rotation et peut donc récolter l'énergie des molécules d'air traversant ce disque. La surface ***A*** d'un disque circulaire est égale à:

$$A = \pi \times r^2 \ = \pi \times (\frac{1}{2}d)^2 \qquad \text{(I-1)}$$

Où ***r*** est le rayon du disque circulaire, ***d*** est le diamètre et π est (***pi* = 3,1415**...).

Le rotor est relié à la nacelle par le moyeu, Elle transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

5-Un contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble « rotor plus nacelle » face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir [5].

I.8 Conversion de l'énergie éolienne

La capacité de l'aérogénérateur à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de rotation a été la déduction logique et inévitable, de son utilisation pour la production de l'énergie électrique. Cependant, il est à noter que pour l'emploi efficace de cette ressource il est indispensable d'étudier les caractéristiques aérodynamiques de la turbine utilisée [8].

I.8.1 Loi de BETZ

La théorie du moteur éolien à axe horizontal a été établie par BETZ.

Il suppose que « *le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse V_1 et à l'infini aval d'une vitesse V_2* »

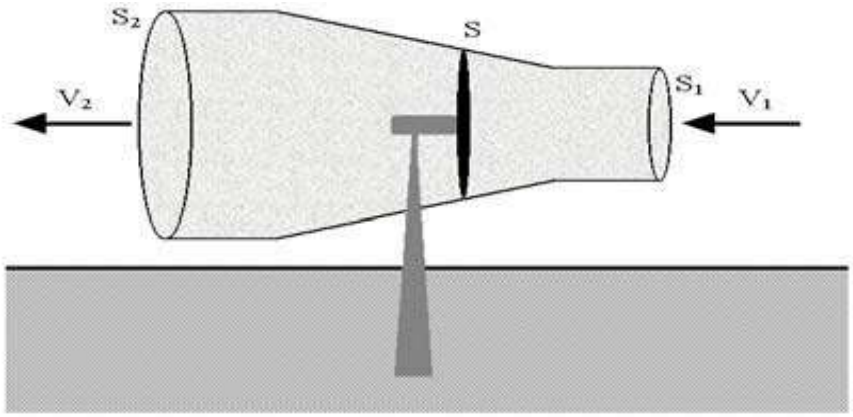


Fig I-8 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne.

Considérant le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure (I-8) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. Désignant par V la vitesse de l'air traversant l'aérogénérateur, par S_1 et S_2 les sections amont et aval du tube d'air et par S la surface balayée par l'hélice. L'égalité qui traduit l'incompressibilité de l'air et la permanence de l'écoulement s'écrit [12]:

$$S_1V_1 = SV = S_2V_2 \qquad (I.2)$$

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

$$F = \rho.SV.(V_1 - V_2) \qquad (I.3)$$

Où la densité de l'air ρ égale à 1,225 kg.m^{-3}.

D'où la puissance absorbée par l'aérogénérateur:

$$P_{aero} = F.V = \rho.SV^2(V_1 - V_2) \quad (I.4)$$

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

$$\frac{\Delta E_c}{\Delta t} = \frac{1}{2}\rho.SV.\left({V_1}^2 - {V_2}^2\right) = P_{aero} = \rho.SV^2.(V_1 - V_2) \quad (I.5)$$

On en déduit:

$$V = (V_1 + V_2)/2 \quad (I.6)$$

En remplaçant l'expression de V dans les relations(I.2) et (I.3) on obtient :

$$F = \frac{1}{2}\rho.S\left({V_1}^2 - {V_2}^2\right) \quad (I.7)$$

$$P_{aero} = \frac{1}{4}.\rho.S\left({V_1}^2 - {V_2}^2\right).(V_1 - V_2) \quad (I.8)$$

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

$$P_{mt} = \rho.S.V_1^3/2 \quad (I.9)$$

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

$$\frac{P_{aero}}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right).(1 - (\frac{V_1}{V_2})^2)}{2} = Cp \quad (I.10)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation (I.9), on s'aperçoit que le ratio P_{aero} / P_{mt} appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maximum pour $\frac{V_1}{V_2} = \frac{16}{25}$ qui égale à 0,59 (Figure I.7). Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie expérimentalement par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

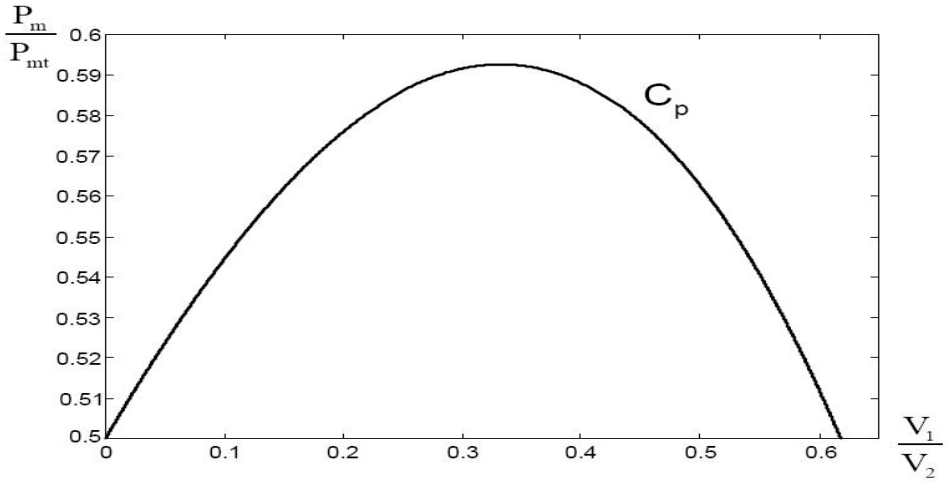


Fig I-9 : Coefficient de puissance

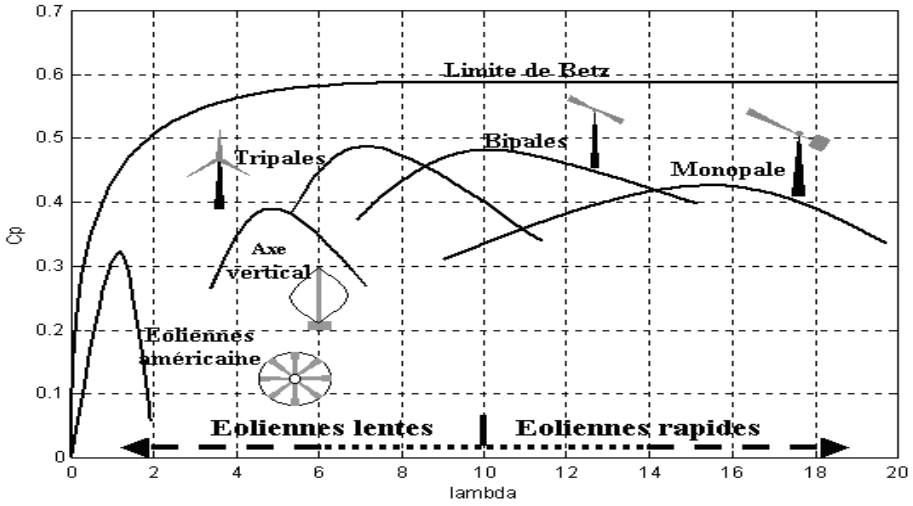


Fig I-10 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.

Coefficient de puissance (Figure I.8) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique.
Aérogénérateur s'exprime ainsi :
Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne et il dépend de la caractéristique de la turbine. La figure (I.16) représente la variation de ce coefficient en fonction du ratio de vitesse, et de l'angle de l'orientation de la pale β pour une éolienne de 1.5 MW [9].

I.9 Structure de la machine

Une MADA a un stator identique à celui d'une machine asynchrone à cage ou d'une machine synchrone. C'est le rotor qui diffère radicalement car il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écureuil mais d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques.On peut voir sur la figure (II.1) que les enroulements rotoriques sont connectés en étoile et les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants (balais-bagues collectrices) permettant d'avoir accès aux tensions et courants du rotor [13]

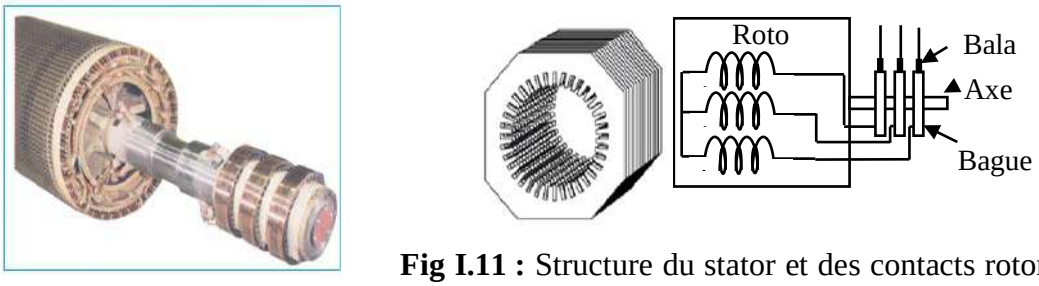


Fig I.11 : Structure du stator et des contacts rotoriques

I.10 Principe de fonctionnement de la MADA

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Et du moment que le vecteur résultant de *fmms* des enroulements statoriques tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire,$w_s = 2.\pi.f_s$ et le rotor tourne avec la vitessew_r, alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur *fmms* des enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitessew_{gl} telle que :

$$w_{gl} = w_s - w_r = w_s \,.\, g \qquad \text{(I.11)}$$

Où : g est le glissement etw_{gl} estla vitesse angulaire de glissement.

Si la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme, les sens de rotation des deux vecteurs sont identiques, dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à la vitesse de synchronisme les sens seront opposés.

Pour que la rotation du vecteur résultant des *fmms* par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement rotorique doit avoir une fréquence f_r, définie à partir de$w_{gl} = 2.\pi.f_r$c'est à dire :

$$f_r = g.f_s \qquad \text{(I.10)}$$

I.11 Classification des machines à double alimentation

En effet, la dénomination Machine à double alimentation concerne aussi bien le fonctionnement en mode générateur que le fonctionnement en mode moteur et peut s'adresser à une multitude de configurations. Nous pourrons trouver un recensement de certains travaux où les MADA sont classées suivant leur architecture. Dans chacune des classes, les auteurs rappellent les équations fondamentales, et les principales applications. On ne citera ici que les six grandes classes qu'ils distinguent [14]:

a. MADA simple dont les enroulements statoriques sont connectées à un réseau triphasé, le rotor est relié à son propre onduleur (Single Doubly Fed Induction Machine). La figure (II.2) présente un schéma de principe de cette catégorie de MADA.

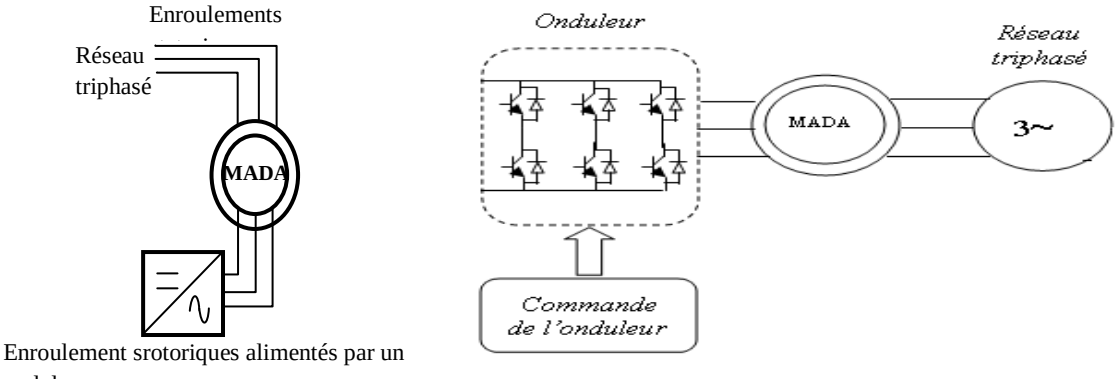


Fig I.12 : Schéma de principe d'une simple MADA.

b-MADA en "cascade" (Cascade Doubly Fed Induction Machine), deux MADA dont les rotors sont couplés électriquement et mécaniquement, la figure (II.3) présente le schéma de principe de deux machines asynchrones à rotor bobiné permettant d'obtenir un système à double alimentation. Les enroulements statoriques sont reliés à deux sources de tensions triphasées.

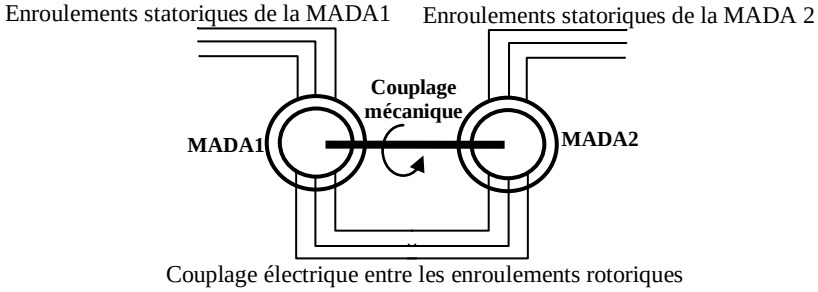


Fig. I.13 : Schéma de principe de deux MADA en cascade.

b. MADA cascadée à un repère, il s'agit de deux machines à cage dont l'axe rotorique est identique. Les barres rotoriques sont croisées entre les deux machines. Une machine à son stator relié au réseau, l'autre à un onduleur. (Single Frame Cascaded Doubly Fed Induction Machine).

I.12 Domaine d'application de la MADA

La littérature atteste du grand intérêt accordé aujourd'hui à la machine doublement alimentée pour diverses applications : en tant que génératrice pour les énergies renouvelables ou en tant que moteur pour certaines applications industrielles comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime [14].

I.12.1 Fonctionnement moteur dans les applications industrielles

La machine asynchrone à double alimentation a 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% [15].

La MADA peut être utilisée aussi dans d'autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, telles que [17]:

- La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines.
- La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime.
- Et enfin l'application de levage, les ascenseurs, les monte-charges etc...

On note que les applications de la MADA en moteur sont relativement très limitées, parmi celles-ci on trouve principalement, la traction électrique et les systèmes de pompage.

I.12.2 Fonctionnement en moteur avec deux convertisseurs

Ce type d'alimentation peut prendre différentes formes :

- Deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs conformément à

la figure II.14.

- Deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun.
- Deux cyclo-convertisseurs.

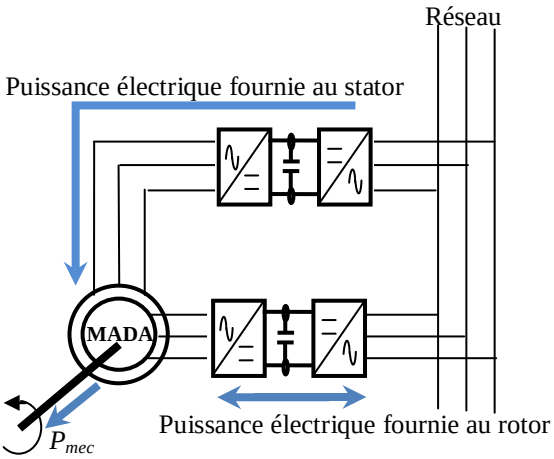


Fig.I.14: Schéma de la MADA alimenté par deux convertisseurs

I.12.3 Fonctionnement en moteur avec un seul convertisseur

Dans ce type de fonctionnement, le stator est relié au réseau à fréquence et tension constantes, tandis que le rotor est relié à son propre convertisseur qui peut être un cyclo-convertisseur ou une association redresseur-onduleur. Cette solution permet de réduire fortement la puissance du convertisseur. La figure (II.6) présente le schéma de principe de cette catégorie [14].

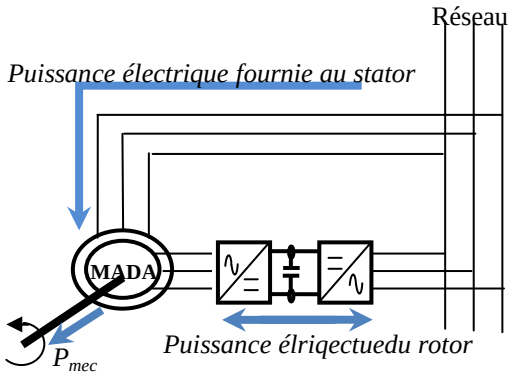


Fig.I.15 : Schéma de la MADA alimenté par un seul convertisseur

I.12.4 Systèmes de génération éolienne à vitesse variable

Une éolienne à vitesse variable a pour rôle de convertir 1'énergie cinétique du vent en énergie électrique avec un rendement optimisé. Par conséquent les différents éléments du système éolien sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique et d'une manière générale une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable.

Dans les systèmes éoliens de production de 1'énergie électrique à vitesse variable, il existe une solution nouvelle et originale, utilisant la machine asynchrone à rotor bobiné. Cette solution est plus attractive pour toutes les applications où les variations de vitesse sont limitées autour de celle de synchronisme dont 1'objectif d'avoir un convertisseur de puissance dimensionné à une fraction de 20-30 % de toute la puissance du système, et qui permet de minimiser les pertes et réduire le coût de celui-ci [15].

La configuration, largement répandue dans les systèmes éoliens à vitesse variable avec MADA, est représentée par la figure (II.7). Elle consiste à alimenter le rotor par un convertisseur et à lier le stator directement au réseau [17].

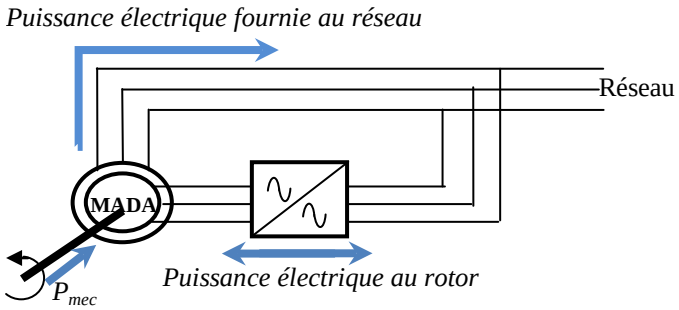


Fig.I.16: Schéma de l'alimentation de la MADA pour une application génératrice.

I.13 Différentes structures d'alimentation de la MADA dans les systèmes éoliens

I.13.1 Machine asynchrone à double alimentation « type brushless»

Pour réaliser une double alimentation par le stator, la machine asynchrone est munie de deux bobinages statoriques distincts figure (II.8). Un des bobinages est directement connecté au réseau et constitue le principal support de transmission de l'énergie générée. On peut contrôler la vitesse de la génératrice autour d'un point de fonctionnement en agissant sur les tensions appliquées au second bobinage statorique qui sera appelé enroulement d'excitation. Cet enroulement est connecté à des convertisseurs d'électronique de puissance qui sont dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la turbine, le coût s'en trouve réduit. La machine n'a pas de contacts glissants mais possède deux stators à nombre de paires de pôles différent ce qui augmente son diamètre et sa complexité de fabrication. Il a été

vérifié que cette structure génère des puissances fluctuantes sur le réseau. Ce système n'a pas été exploité industriellement mais existe à l'état de prototype.

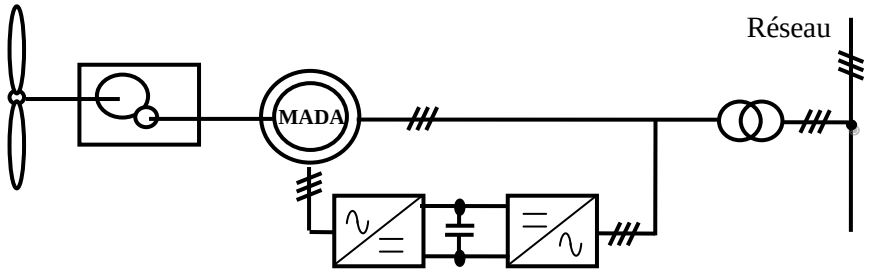


Fig. I.17 : Machine asynchrone à double bobinage

I.13.2 MADA à énergie rotorique dissipée

Le stator de la génératrice est directement couplé au réseau, et le réglage électronique de l'énergie du rotor assure la variation du glissement. La chaîne rotor permet ainsi à l'ensemble de fonctionner à vitesse variable. Cette configuration permet une variation limitée de la vitesse à environ 10% autour de la vitesse de synchronisme par le changement de la résistance rotor. Outre la plage de variation de vitesse limitée, l'inconvénient de cette solution est la dissipation de la puissance rotorique dans les éléments résistifs figure (II.18) [16].

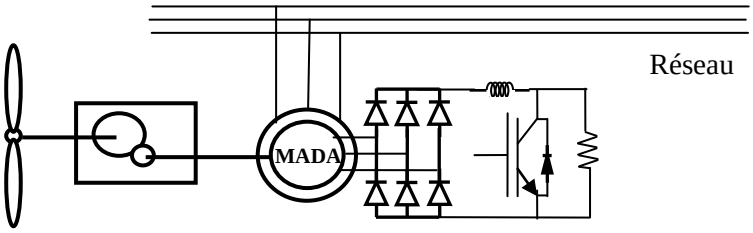


Fig.I.18 : Variation de la vitesse par réglage de la résistance du rotor

I.13.3 Structure de Kramer

La structure d'alimentation de Kramer comporte un redresseur à diodes sur le côté du rotor et un onduleur non autonome sur le côté réseau (figure II.10) [20].L'onduleur à thyristors non autonome applique à ce redresseur une tension qui varie par action sur l'angle d'amorçage**.** Ce dispositif permet de faire varier la plage de conduction des diodes, de rendre variable la puissance extraite du circuit rotorique et donc le glissement de la génératrice asynchrone. Le principal avantage est que l'onduleur est assez classique, et moins coûteux,

puisqu'il s'agit d'un onduleur non autonome dont les commutations sont assurées par le réseau [14].

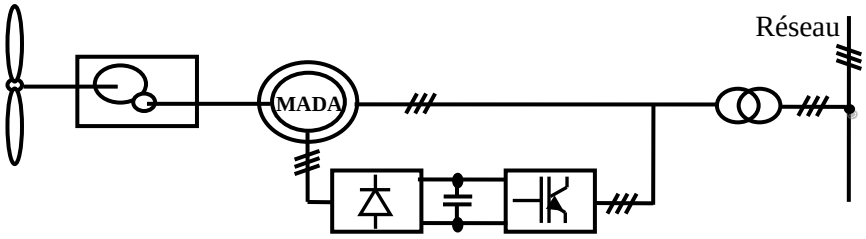


Fig.I.19 : Structure de Kramer

I.14 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une vue d'ensemble des différentes turbines éolienne utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique. Afin d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes, partant de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine (**Loi de Betz).**

Enfin nous avons établi un modèle mathématique de la turbine à partir de ses équations caractéristiques. Il est à noter que pour qu'un projet éolien soit rentable, il est essentiel de s'assurer que l'on dispose d'une ressource suffisante car la vitesse moyenne du vent sur un site est un facteur déterminant du fait que l'énergie produite varie proportionnellement au cube de cette vitesse. Un site idéal bénéficie de vents assez forts et constants. Dans ce qui suit nous allons étudier les générateurs les plus utilisés dans la conversion de l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique, notamment les génératrices MADA.

CHAPITRE 2

Modélisation et Fonctionnement de L'aérogénérateur

II.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de mener une étude la modélisation dans le repère de Park avec ses deux alimentations, l'une alimente le stator avec un couplage direct au réseau et l'autre alimente le rotor à fréquences variables. Enfin nous avons établi un modèle mathématique de la turbine à partir de ses équations caractéristiques.

II.2 Modélisation de la machine à double alimentation :

La machine asynchrone est représentée sur la figure (II.1) par ces six enroulements dans l'espace électrique. L'angle θ repère le décalage de l'axe de la phase rotorique (*OAR*) par rapport à l'axe fixe de la phase statorique (*OAS*).

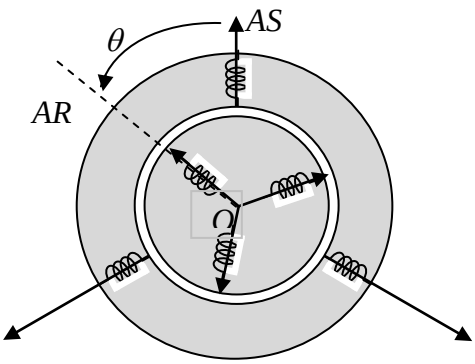


Fig.II.1 : Représentation schématique du modèle d'une MADA

II.3.1 Hypothèses simplificatrices

Pour cette mise en équation, nous supposons que le bobinage est réparti de manière à donner une f.m.m. sinusoïdale s'il est alimente par des courants sinusoïdaux.Nous supposerons également que nous travaillons en régime non saturé. Nous négligeons le phénomène d'hystérésis, les courants de Foucault et l'effet de peau.Enfin, le régime homopolaire est nul puisque le neutre n'est pas relié. Ces choix signifient entre autres que [16]:

- Les flux sont additifs.
- Les inductances propres sont constantes.
- Il y a une variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de 1'angle électrique de leurs axes magnétiques.

II.3.2 Modèle de la MADA dans le repère abc

Avec les hypothèses citées ci-dessus, les équations électriques des phases statoriques et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine s'écrivent comme suit [16]:

$$\begin{cases} [V_S] = [R_S][I_S] + \dfrac{d}{dt}[\phi_S] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \dfrac{d}{dt}[\Phi_r] \end{cases} \quad \text{(II.1)}$$

Avec :

Grandeurs statoriques : $\begin{cases} [V_S] = [V_{as} \quad V_{bs} \quad V_{cs}]^T \\ [I_S] = [I_{as} \quad I_{bs} \quad I_{cs}]^T \\ [\Phi_S] = [\Phi_{as} \quad \Phi_{bs} \quad \Phi_{cs}]^T \end{cases}$, (II.2)

Grandeurs rotoriques : $\begin{cases} [V_r] = [V_{ar} \quad V_{br} \quad V_{cr}]^T \\ [I_r] = [I_{ar} \quad I_{br} \quad I_{cr}]^T \\ [\Phi_r] = [\Phi_{ar} \quad \Phi_{br} \quad \Phi_{cr}]^T \end{cases}$ (II.3)

Les flux statorique et rotorique en fonction des courants, des inductances propres et des inductances mutuelles, sont exprimés par les équations suivantes :

$$\begin{cases} [\Phi_S] = [L_S][I_S] + [M_{ss}][I_S] + [M_{sr}][I_r] \\ [\Phi_r] = [L_r][I_r] + [M_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_S] \end{cases} \quad \text{(II.4)}$$

Où :

$[R_s], [R_r]$: sont les matrices des résistances statoriques et rotoriques.

$[L_s], [L_r]$: sont les matrices des inductances propres statoriques et rotoriques.

$[M_{sr}], [M_{rs}]$: sont les matrices des inductances mutuelles entre le stator et le rotor.

$[M_{ss}], [M_{rr}]$: sont les matrices des inductances mutuelles statorique-statorique et rotorique-rotorique.

Avec :

$$\begin{cases}[R_s]=R_s.[I]_{3\times3}\\ [R_r]=R_r.[I]_{3\times3}\end{cases} \quad \text{(II.5)}$$

$$\begin{cases}[L_s]=L_s.[I]_{3\times3}\\ [L_r]=L_r.[I]_{3\times3}\end{cases} \quad \text{(II.6)}$$

$$[M_{ss}]=M_{ss}.\begin{bmatrix}0 & \cos(2.\pi/3) & \cos(2.\pi/3)\\ \cos(2.\pi/3) & 0 & \cos(2.\pi/3)\\ \cos(2.\pi/3) & \cos(2.\pi/3) & 0\end{bmatrix} \quad \text{(II.7)}$$

$$[M_{rr}]=M_{rr}..\begin{bmatrix}0 & \cos(2.\pi/3) & \cos(2.\pi/3)\\ \cos(2.\pi/3) & 0 & \cos(2.\pi/3)\\ \cos(2.\pi/3) & \cos(2.\pi/3) & 0\end{bmatrix} \quad \text{(II.8)}$$

$$[M_{sr}]=M.\begin{bmatrix}\cos(\theta) & \cos(\theta-2.\pi/3) & \cos(\theta-4.\pi/3)\\ \cos(\theta-4.\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta-2.\pi/3)\\ \cos(\theta-2.\pi/3) & \cos(\theta-4.\pi/3) & \cos(\theta)\end{bmatrix} \quad \text{(II.9)}$$

$$[M_{rs}]=[M_{sr}]^T \quad \text{(II.10)}$$

$[I]_{3*3}$: Est la matrice identité d'ordre 3.

M : est le maximum d'inductance mutuelle entre une phase statoriques et entre une phase rotorique pour $\theta=0$.

L'énergie magnétique peut être calculée à partir de l'expression suivante :

$$W_{mag}=\frac{1}{2}\left([I_s]^T[\phi_s]+[I_r]^T[\phi_r]\right) \quad \text{(II.11)}$$

Le couple électromagnétique s'exprime par la dérivée de l'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor :

$$C_e=\frac{\partial W_{mag}}{\partial\theta_{geom}}=n_p\cdot\frac{\partial W_{mag}}{\partial\theta_{elect}} \quad \text{(II.12)}$$

On peut déduire :

$$C_e=\frac{n_p}{2}[I_s]^T\left(\frac{d[M_{sr}]}{d\theta_{elect}}\right)[I_r] \quad \text{(II.13)}$$

L'équation mécanique est donnée par :

$$J_m \frac{d\Omega r}{dt} + f_m \cdot \Omega_r = C_{em} - C_r \qquad \text{(II.14)}$$

Où :

$$\Omega_r = \frac{\omega_r}{n_p} \qquad \text{(II.15)}$$

Avec : J_m moment d'inertie de la machine, C_{em} couple électromagnétique C_r couple résistant, et f_m coefficient de frottement de la machine.

Nous constatons la complexité des équations électriques et l'équation mécanique de la machine asynchrone qui ne peuvent être facilement exploitées à cause des dimensions des matrices entrant dans les calculs et de la dépendance de la matrice inductance vis à vis de la position de l'axe rotorique par rapport à l'axe statorique, qui est variable dans le temps.

II.3.3 Changement de repère

Le but d'un changement de repère est de rendre l'écriture des équations de la machine plus simple à exploiter. Dans notre étude nous avons utilisé la transformation de Park.

II.3.3.1 La transformation de Park

Afin de rechercher les lois de contrôle d'une machine à courant alternatif, nous pouvons la modéliser dans un repère (d, q) tournant dont l'orientation est à priori arbitraire. Ce modèle est obtenu après transformation virtuelle de la machine triphasée en une machine diphasée équivalente.Cette transformation qui permet le passage du système triphasé au système biphasé s'effectue en faisant correspondre aux variables réelles leurs composantes homopolaires, directes et en quadrature, figure (II.2) [17].

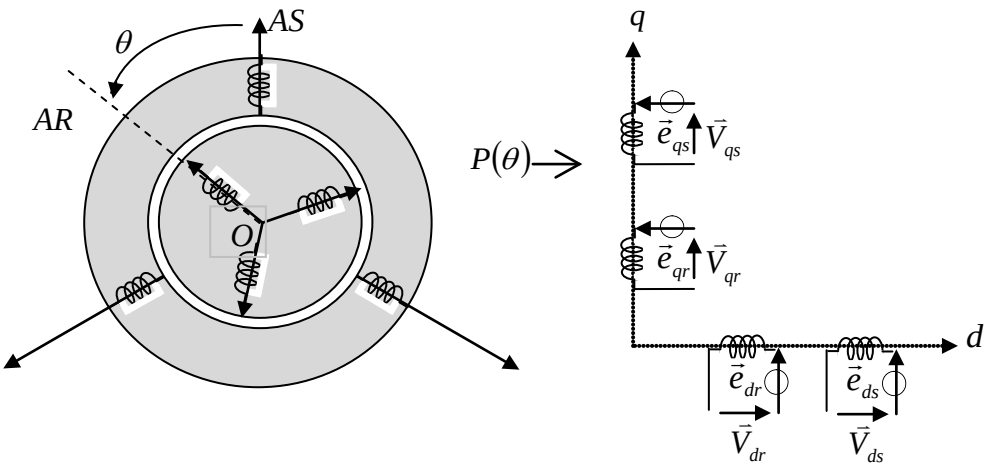


Fig.II.2 : Représentation de la MADA dans le repère de Park.

Donc pour le passage du système triphasé au système biphasé en utilise la matrice $P(\theta)$:

$$[P(\theta)] = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta-\frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta-\frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta-\frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad \text{(II.16)}$$

Le changement de variables relatifs aux courants, tensions et flux est défini par :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} = [P(\theta)] \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad \text{(II.17)}$$

Avec x : tension, courant ou flux, et les indices suivant représentent :

- o : indice de l'axe homopolaire.
- d : indice de l'axe direct.
- q : indice de l'axe en quadrature.

Et pour la transformation inverse on utilise la matrice $[P(\theta)]^{-1}$:

$$[P(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta-\frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta-\frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta-\frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad \text{(II.18)}$$

II.3.3.2 Equations électriques et magnétiques dans le système d'axes *(d, q)*

Les expressions des tensions statorique et rotorique suivant l'axe (d, q) sont données par :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_{coor}\Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_{coor}\Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_{coor} - \omega_r)\Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_{coor} - \omega_r)\Phi_{dr} \end{cases} \quad \text{(II.19)}$$

Avec :

ω_{coor} : Vitesse du système d'axe (d, q).

Les expressions des flux statoriques et rotoriques dans le système (d, q) :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad \text{(II.20)}$$

II.3.4 Choix du référentiel

Pour étudier les régimes transitoires des machines électriques, il est recommandé de choisir un système d'axes de référence qui permet d'aboutir au système différentiel le plus simple possible, car le résultat final est indépendant du choix du système de coordonnées. On trouve que le calcul peut être plus ou moins complexe. A partir du système d'axe (*d, q*) on peut avoir d'autres axes qui sont des cas particuliers. Dans la suite, les composantes homopolaires sont supposées nulles :

- Référentiel fixé par rapport au stator : ω_{coor} =0
- Référentiel fixé par rapport au rotor : $\omega_{coor} = \omega_r$
- Référentiel fixé par rapport au champ tournant : $\omega_{coor} = \omega_s$

Cette dernière représentation qui fait correspondre des grandeurs continues aux grandeurs sinusoïdales en régime permanent, la conception du contrôle vectoriel par orientation du flux nécessite ce choix et les modèles d'action dépendent de la position du référentiel par rapport aux divers axes de flux.

II.3.5 Modèle biphasé de la MADA lié au champ tournant

On exprime les tensions par :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s.I_{ds} + \dfrac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s.\phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s.I_{qs} + \dfrac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s.\phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r.I_{dr} + \dfrac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r)\phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r.I_{qr} + \dfrac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r)\phi_{dr} \end{cases} \quad \text{(II.21)}$$

Pour étudier les phénomènes transitoires (démarrage, freinage, variation de la charge) avec une vitesse rotorique variable, il faut ajouter l'équation du mouvement (II. 14) au système d'équations différentielles modélisant la machine .La forme générale du couple électromagnétique d'une machine asynchrone triphasée modélisée dans le repère de Park est donnée par la relation suivante:

$$C_{em} = P(\phi_{ds} \mathrm{i}_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) \qquad \text{(II. 22)}$$

II.3.6 Mise sous forme d'équation d'état

Les équations (II.19) peuvent être disposées sous la forme de représentation d'état. On choisit pour vecteur d'état $x = \lfloor \phi_{ds}, \phi_{qs}, I_{dr}, I_{qr} \rfloor$, on trouve les équations d'état sous forme matricielle :

$$\begin{cases} L.\dfrac{dx}{dt} = A.x + B.U \\ y = C.x \end{cases} \qquad \text{(II.23)}$$

Avec : $U = [V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}]^T$, $B = [I]_{4*4}$,

$$A = \begin{bmatrix} \dfrac{-R_s}{L_s} & \omega_s & \dfrac{R_s.M}{L_s} & 0 \\ -\omega_s & \dfrac{-R_s}{L_s} & 0 & \dfrac{R_s.M}{L_s} \\ 0 & \dfrac{M}{L_s}(\omega_s - \omega_r) & -R_r & \sigma.(\omega_s - \omega_r) \\ -\dfrac{M}{L_s}(\omega_s - \omega_r) & 0 & -\sigma(\omega_s - \omega_r) & -R_r \end{bmatrix} \text{ et } L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \dfrac{M}{L_s} & 0 & \sigma & 0 \\ 0 & \dfrac{M}{L_s} & 0 & \sigma \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ et } \sigma = 1 - (M^2 / L_s L_r) \text{ : Coefficient de dispersion.}$$

II.4 Modélisation de l'onduleur

Le convertisseur de fréquence assure à la fois, la conversion d'énergie et le changement de fréquence entre le réseau industriel et le moteur asynchrone. L'onduleur de

tension délivre au moteur un système de tensions alternatives triphasées réglables en fréquence et en valeur efficace grâce à des lois appropriées de commande des semi-conducteurs. Avant toute synthèse de la loi de commande, il est indispensable d'analyser le processus à contrôler, d'établir une modélisation adaptée et d'interpréter sa dynamique propre [29].

II.5 Description de l'onduleur triphasé

La figure II.3 représente un onduleur de tension triphasé, il est constitué de trois bras, chaque bras est formé de deux interrupteurs commandés de manière complémentaire afin d'éviter un court-circuit de la source et d'assurer une continuité du courant de la charge.[14] Chaque interrupteur est formé d'un semi-conducteur contrôlable (IGBT, GTO,…..etc.) et une diode connectés en anti-parallèle, les six diodes de roue libre assurent la protection des transistors et la récupération de l'énergie vers la source. Pour simplifier l'étude, on supposera que:

- la commutation des interrupteurs est instantanée.
- la chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.

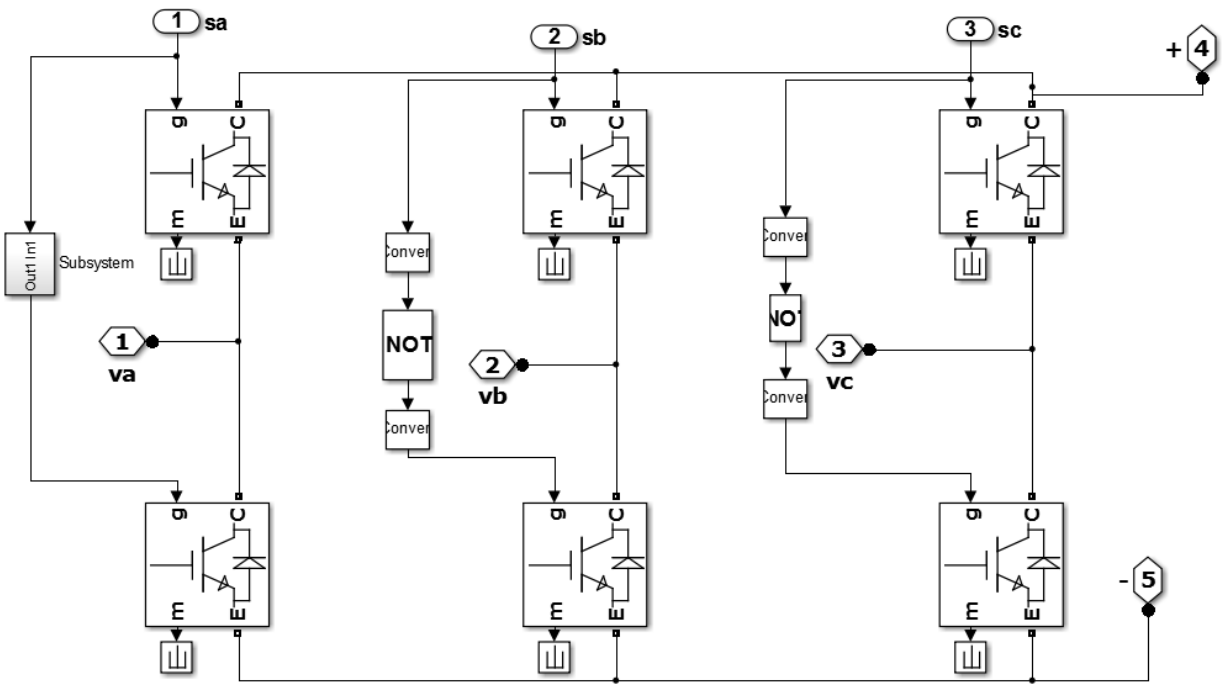


Fig.II.3: Onduleur de tension à 2 niveaux.

Le vecteur tension V_s appliqué à la machine est délivré par un onduleur de tension triphasé dont l'état des interrupteurs, supposés parfaits est représenté par trois grandeurs booléennes de commande S_j (j= a, b, c)

Telles que:

S_j= 1 : Interrupteur haut fermé et interrupteur bas ouvert.

S_j = 0 : Interrupteur haut ouvert et interrupteur bas fermé.

$$\begin{cases} V_a = V_1 = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_b = V_2 = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_c = V_3 = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad \text{(II.25)}$$

Les tensions simples des phases de la charge issues des tensions composées ont

II.6 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Les onduleurs de tension sont le plus souvent commandés par la technique de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI), c'est-à-dire, qu'au lieu de former chaque alternance des tensions de sortie d'un seul créneau rectangulaire, on la forme d'un esuccession de créneau de largeurs convenables. Cela permet d'obtenir des tensions necontenant pas d'harmoniques à basses fréquences.

Le principe de cette stratégie consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante (qui est l'image de l'onde de sortie qu'on veut obtenir) généralement sinusoïdale avec deux porteuses triangulaires bipolaires [21].

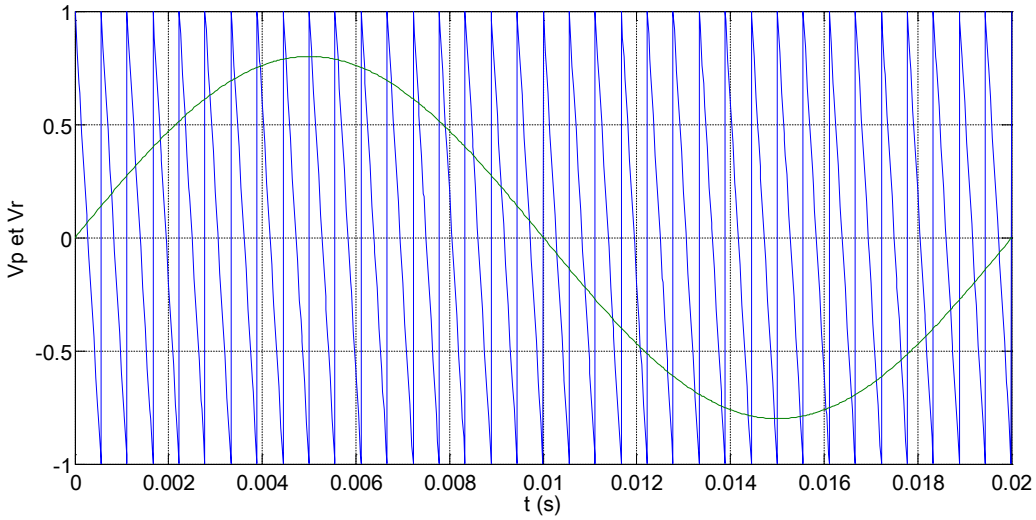


Fig.II.4: Principe de la commande MLI

II.7 Modélisation de la turbine :

La turbine qui sera modélisé comporte trois pales de longueur R, fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse Ω turbine, qui entraînera une génératrice (MADA) à travers un multiplicateur de vitesse de gain G. La figure (5) montre le schéma d'une turbine éolienne.

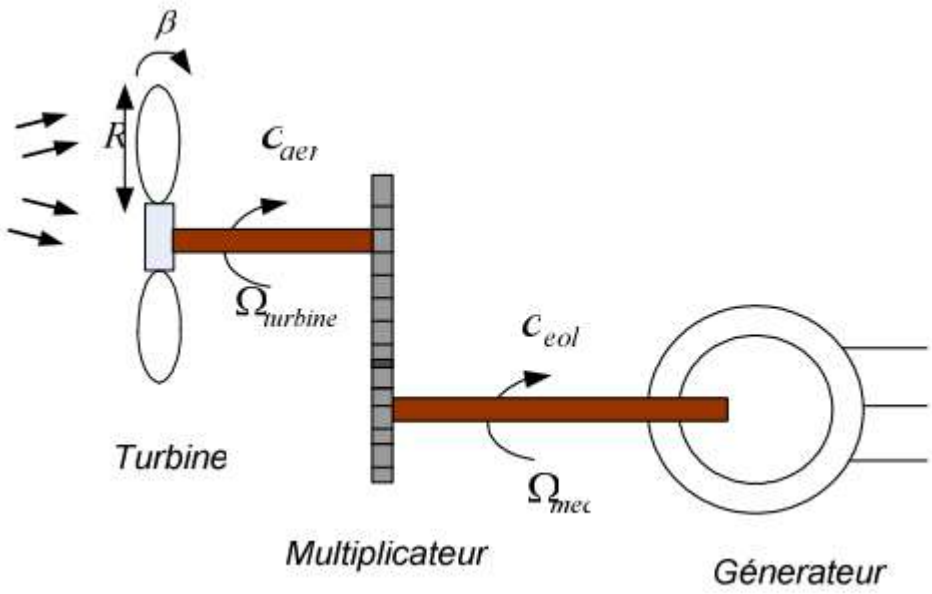


Fig. II.5 : Turbine éolienne.

II.7.1. Modèle des pales

La puissance cinétique du vent est donnée par :

$$P_v = \frac{1}{2}\rho S V^3 \qquad \text{(II.26)}$$

La turbine permet de convertir l'énergie aérodynamique du vent en énergie mécanique.

Donc le couple aérodynamique $C_{aéro}$ est donné par l'expression suivante :

$$C_{aéro} = \frac{1}{2\Omega_t} C_p(\lambda,\beta)\rho S V^3 \qquad \text{(II.27)}$$

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

$$P_{aéro} = C_p(\lambda,\beta) P_v = C_p(\lambda,\beta)\frac{\rho S V^3}{2} \qquad \text{(II.28)}$$

Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse de la turbine et la vitesse du vent, son expression est donnée comme suit :

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{V} \qquad \text{(II.29)}$$

Pour une éolienne de 7.5Kw, l'expression du coefficient de puissance est donnée par:

$$\lambda = f(\lambda,\beta) = C_P = c_1\left(\frac{c_2}{(0.4+0.5\lambda)} - c_3 - c_4\beta^{\wedge 2}\right)\exp^{-c_5/(0.4+0.5\lambda)} + c_6 \qquad \text{(II.30)}$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \qquad \text{(II.31)}$$

$c_1 = 0.18$, $c_2 = 90$, $c_3 = 6.8$, $c_4 = 0.115$, $c_5 = -8$, $c_6 = 0.16$

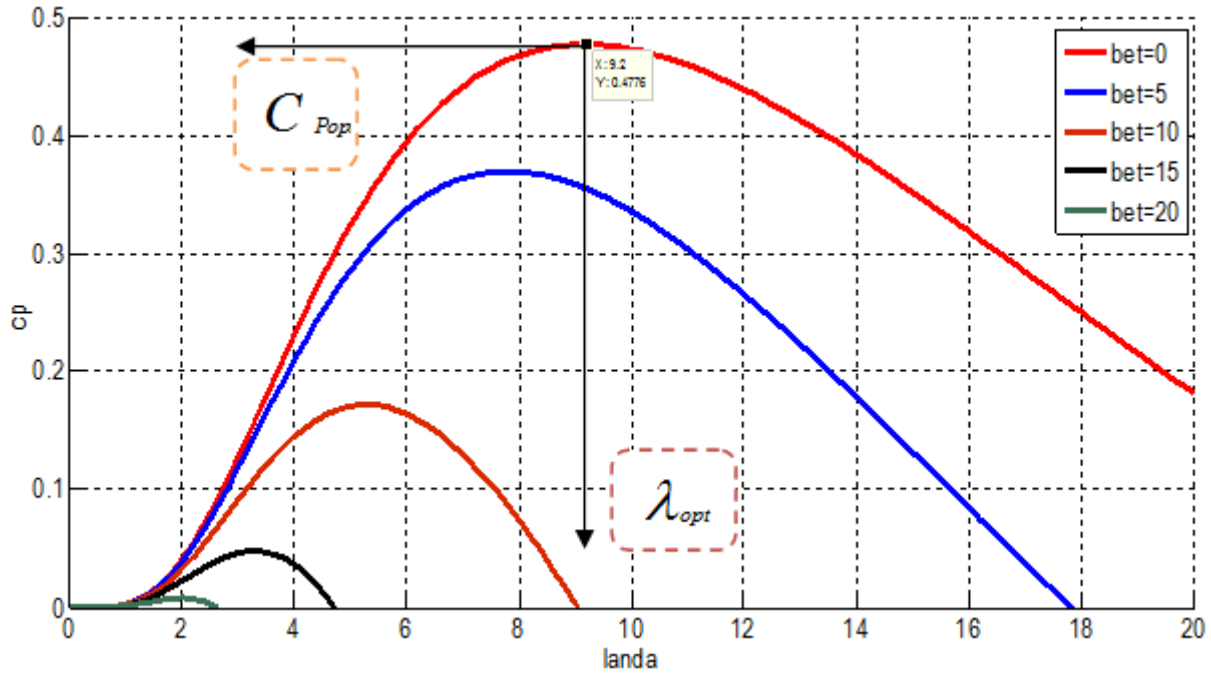


Fig II.6 : Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de cp fonction de λ et β [annexe b].

Le schéma bloc des pales étudiées sont représentés en Figure. II.7

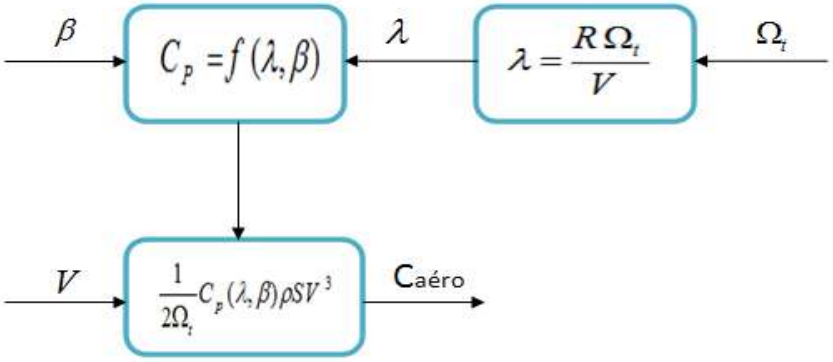


Fig. II.7. Schéma bloc du modèle des pales.

II.7.2. Modèle du multiplicateur de vitesse :

Le multiplicateur de vitesse, qui est disposé entre la turbine éolienne et la génératrice, a pour but d'adapter la vitesse de la turbine Ω_T , assez lente, à celle que nécessite la génératrice Ω.

Il est modélisé par les deux équations suivantes :

1-la vitesse de la turbine :

$$\Omega_T = \frac{1}{G}\Omega \qquad \text{(II.32)}$$

2-Couple du multiplicateur :

$$C_g = \frac{1}{G}C_{aéro} \qquad \text{(II.33)}$$

le schéma bloc du multiplicateur de vitesse sont représentés en Figure. II.8

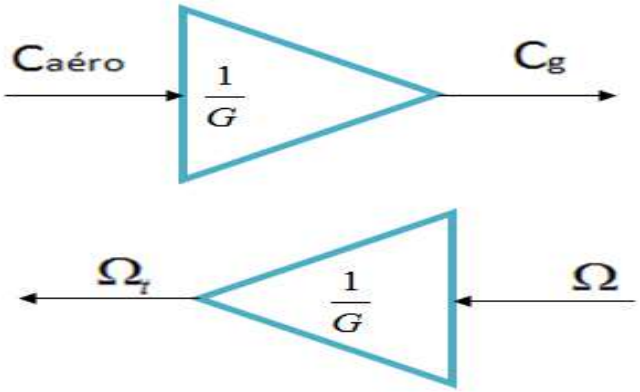


Fig. II.8 Schéma bloc du modèle du multiplicateur de vitesse.

II .*7.3* Equation dynamique de l'arbre de la génératrice :

L'arbre est composé d'une masse correspondante à l'inertie du rotor de la turbine supportant les pales, le moyeu, et une petite inertie représentant le rotor de la génératrice. Dans le modèle mécanique proposé, l'inertie totale J est celle de la génératrice J_g et l'inertie de la turbine J_t ramenée au rotor de la génératrice [20].

$$J = J_g + J_t G^2 \qquad \text{(II.34)}$$

L'évolution de la vitesse mécanique dépend du couple appliqué au rotor de la génératrice C_{mec} qui la résultante d'un couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice , d'un couple de frottement visqueux et d'un couple du multiplicateur de vitesseC_g .

$$C_{mec} = J\frac{d\Omega}{dt} \qquad \text{(II.35)}$$

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis}$$

Le couple issu du frottement est modélisé par le coefficient de frottement visqueux Kf.

$$C_{vis} = K_f . \Omega \qquad \text{(II.36)}$$

En remplacent (11) et (12) dans (10), nous avons :

$$C_g - C_{em} = J \frac{d\Omega}{dt} + K_f . \Omega$$

le schéma bloc de l'arbre mécanique sont représentés comme suit :

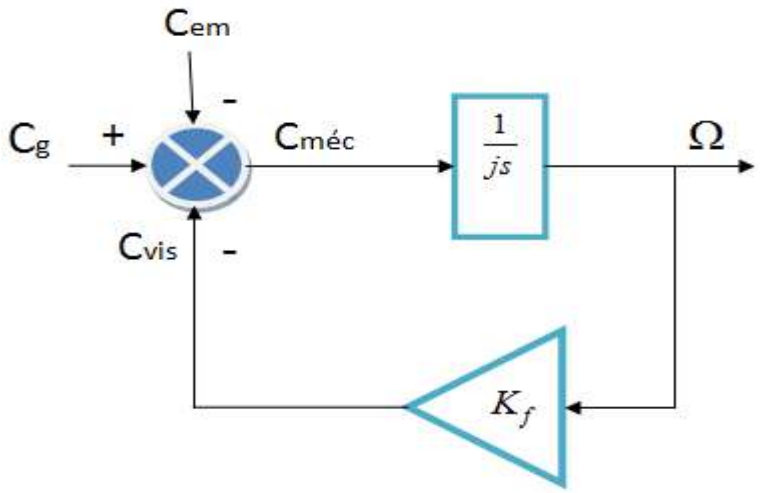


Fig. II.9. Schéma bloc du modèle de l'arbre mécanique.

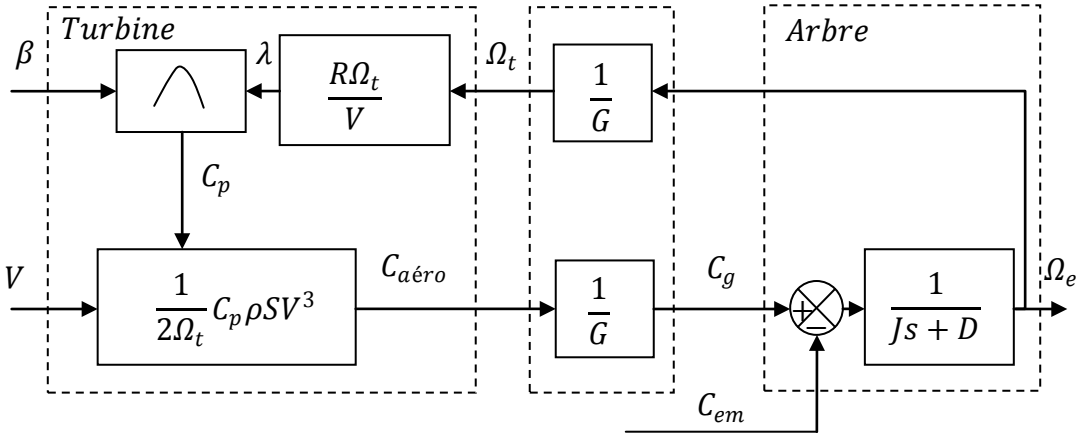


Fig. II.10 : Schéma bloc du modèle de la turbine.

Cette figure montre que la turbine produit un couple aérodynamique $C_{aéro}$ à partir de la puissance cinétique p_v du vent et par action de l'angle d'orientation des pales β . Le multiplicateur de vitesse transforme le couple aérodynamique $C_{aéro}$ de la turbine en couple du multiplicateur C_g et en même temps, il transforme la vitesse mécanique Ω_e en vitesse de la turbine Ω_T .

La vitesse mécanique de l'arbre de la génératrice Ω_e résulte de l'application du couple moteur disponible à la sortie du multiplicateur C_g auquel s'oppose le couple électromagnétique. Le contrôle de cette dernière peut donc être effectué soit par action sur l'angle d'orientation des pales soit à travers le couple électromagnétique de la génératrice les paramètre utilisé dans annexe A.

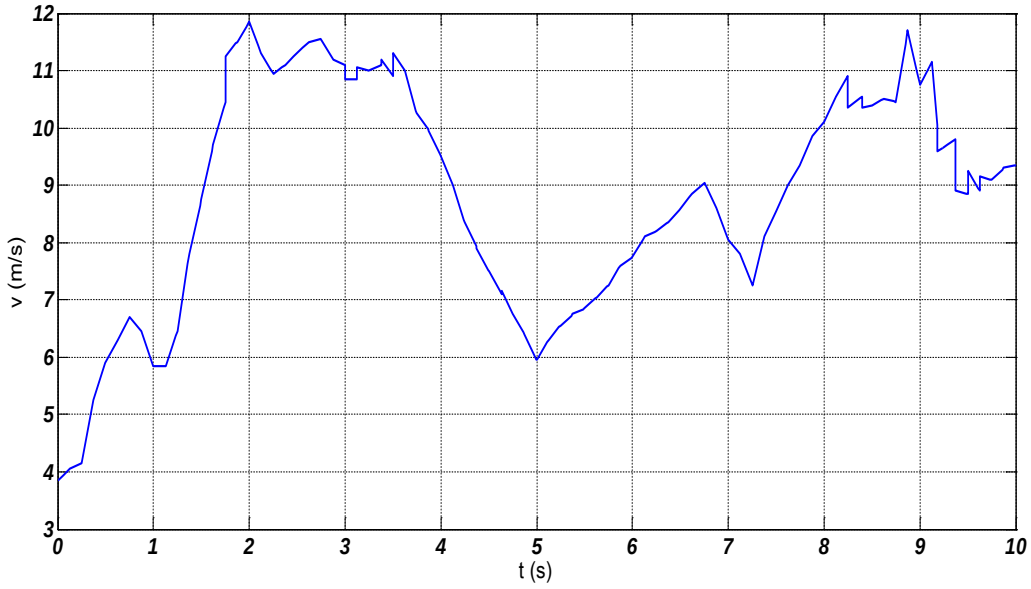
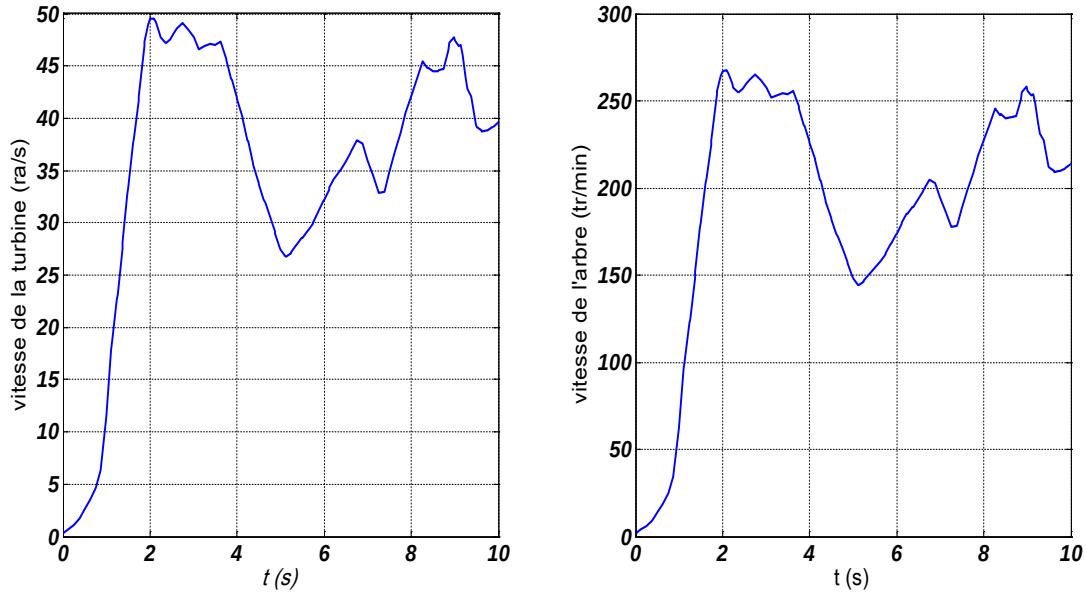


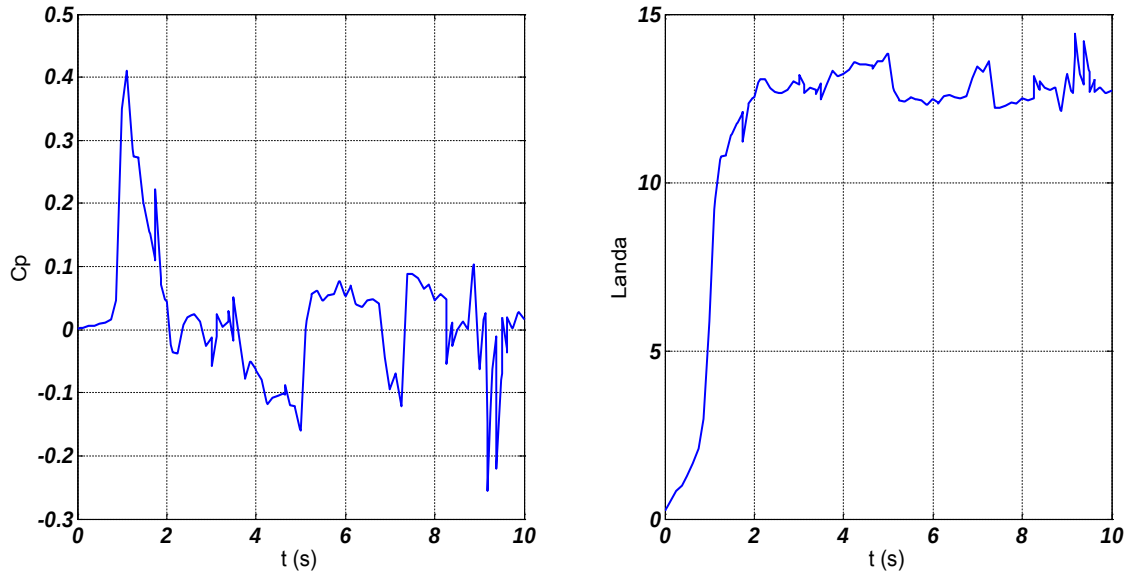
Fig. II.11 : Profil du vent appliqué à la turbine pendant 10 secondes.

Un essai de simulation a été effectué en utilisant le profil du vent montré sur la figure II.11. La vitesse de la turbine et la vitesse mécanique de l'arbre sont illustrées respectivement sur la figure II.9. Il est à noter que pendant la durée 10s.

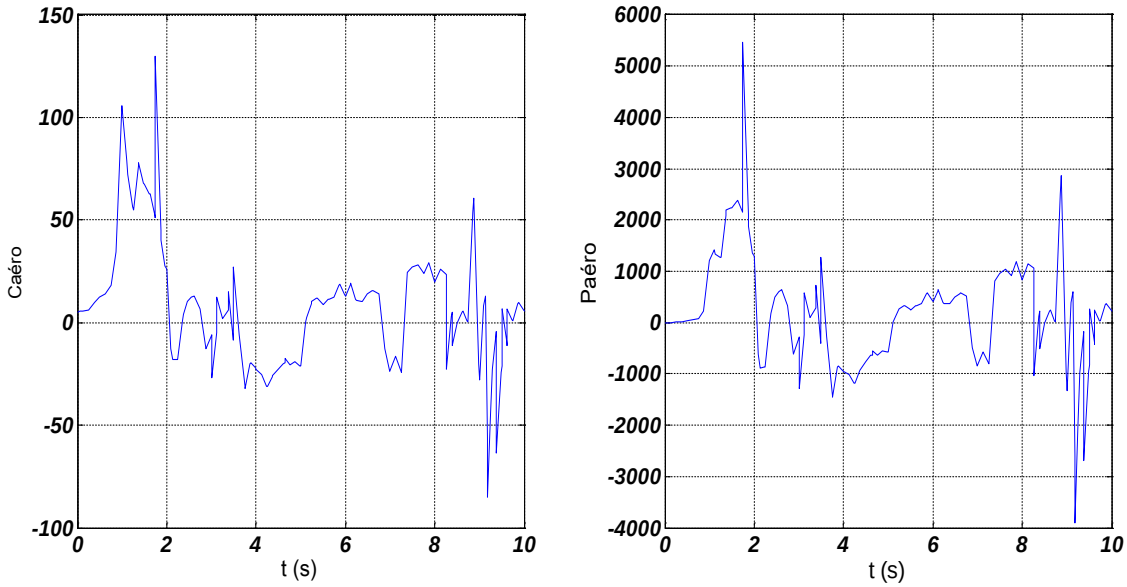


(a) Vitesse de la turbine (b) Vitesse mécanique de l'arbre

Fig. II.12: Allure des vitesses.



(c) : Coefficient de puissance (d) : Rapport des vitesses



(e) : Puissance aérodynamique (f) Couple aérodynamique

Fig. II.13 : Allure des grandeurs aérodynamique.

II.8. stratégie de maximisation de puissance MPPT

L'objectif de cette stratégie est double, d'une part de protéger l'éolienne contre le vent fort et d'autre part de délimiter la puissance.. On peut définir quatre zones de fonctionnement Figure II.14.

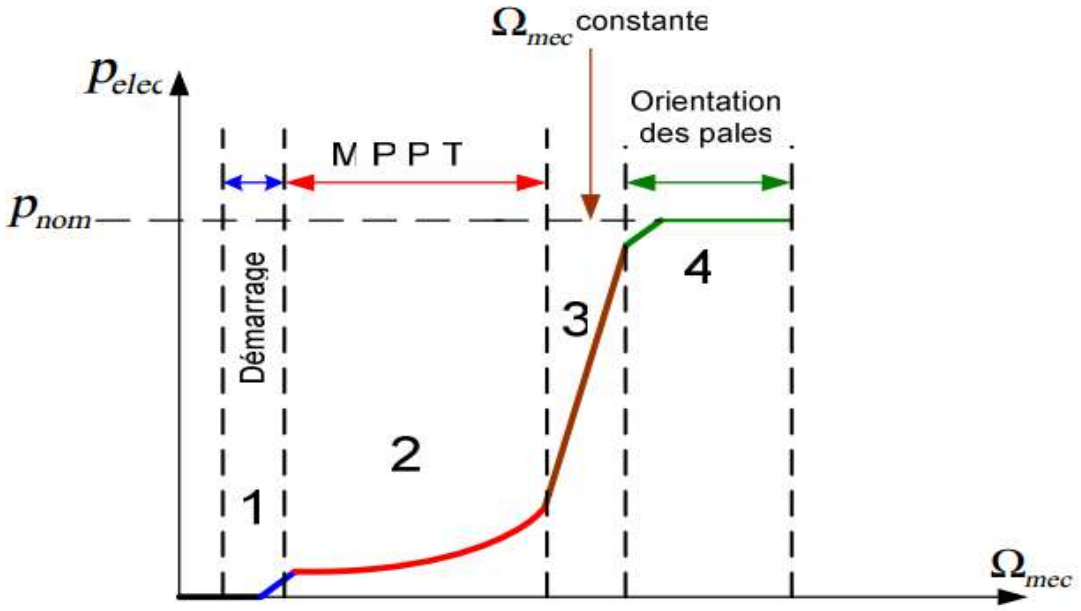


Fig II.14. Courbe typique de la puissance produite d'un aérogénérateur à vitesse variable.

Zone1 : C'est la zone de démarrage de la machine, elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse Ω dé. (C'est la vitesse mécanique de la génératrice pour la quelle éolienne a démarré).

Zone2 : Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale MPPT (Maximum Power Point Tracking). Pour extraire le maximum de puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale afin d'obtenir un Cp maximal. Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale, la puissance électrique augmente rapidement.

Zone3 : Dans cette zone l'éolienne fonctionne à vitesse constante, et la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale P nom [22].

Zone4 : Arrivée à la puissance nominale P nom, une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales.

II.8. 1 Asservissement de vitesse de la turbine

En générale, l'objectif d'un système de commande est de minimiser l'écart e(t) entre la sortie d'un système et une valeur de consigne désirée. Cet écart peut être dû, soit à un changement de consigne, soit à des perturbations agissant sur le système. Pour choisir un bon réglage du

régulateur, on prend en compte l'amplitude maximum de l'écart et la durée nécessaire pour qu'il s'annule après une perturbation ou un changement de consigne. Dan notre travail, le régale de vitesse est réalisé par types de régulateurs PI [22].

II.8. 2 Réglage de vitesse par régulateur de type classique PI :

L'approche la plus classique utilisée dans notre travail consiste à contrôler la vitesse par un régulateur PI. Dans l'objectif d'annuler l'erreur statique et réduire le temps de réponse tout en conservant la stabilité du système, un correcteur proportionnel intégral est utilisé (MADA). Les performances obtenues (stabilité, précision, temps de réponse) sont satisfaisantes pour un tel système électromécanique. Cependant le couple peut présenter un dépassement important qui peut nuire au fonctionnement du système, pour palier à ce problème on utilise une limitation de la référence du couple à la sortie du correcteur, la vitesse à régler se définit à partir de l'équation mécanique, la structure du régulateur de vitesse est montrée sur cette **Figure II.15** [22].

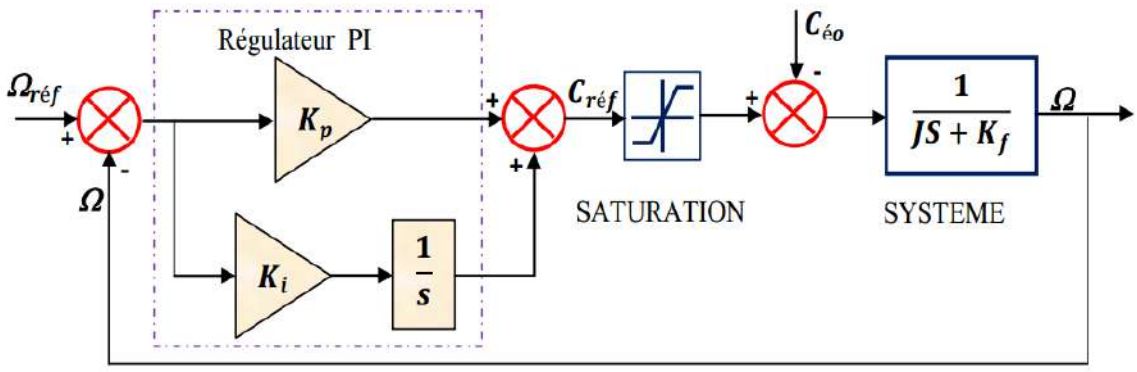


Fig. II.15 Schéma bloc de la régulation de vitesse par régulateur PI.

La partie mécanique du système est représentée par l'équation de transfert établie à partir de l'équation mécanique de la machine utilisée. Le calcul des paramètres du régulateur (les deux gains Kp et Ki sont réalisés en spécifiant une réponse en boucle fermée).

Les expressions des paramètres du régulateur sont alors calculées selon (II.35) :

$$K_P = 2j\rho - f$$
$$K_i = 2j\rho^2 \qquad \text{(II.37)}$$

$$s_{1,2} = -\rho \mp \rho j$$

II.9 Résultats obtenus avec la structure de MPPT avec asservissement de vitesse :

Dans cet algorithme, l'asservissement de vitesse est réalisé à l'aide de types des régulateurs (PI). Les résultats de simulation pour ce type des régulateurs inhérents à cet algorithme sont montrés sur les figures Figure II.15, ces résultats montrent qu'un meilleur contrôle en boucle fermée de la vitesse est obtenu en régime transitoire et en régime permanent.

Ce contrôle est très dynamique et la puissance aérodynamique obtenue en régime transitoire est donc plus importante. Le coefficient de puissance et le rapport de vitesse sont ajustés à leurs valeurs optimales. Les résultats obtenus montrent les meilleures performances statiques et dynamiques.

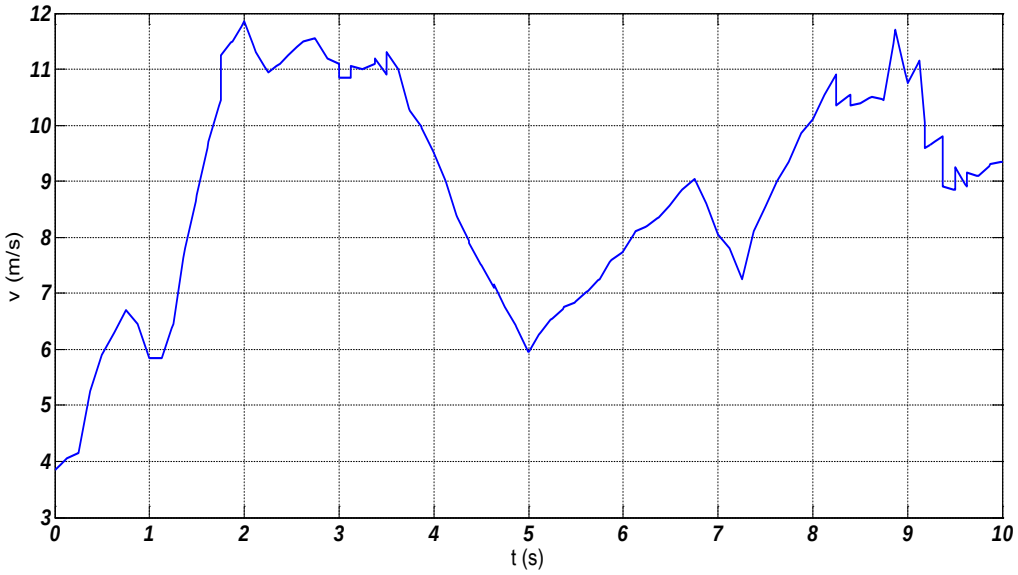


Fig. II.16 : Profil du vent appliqué à la turbine pendant 10 secondes.

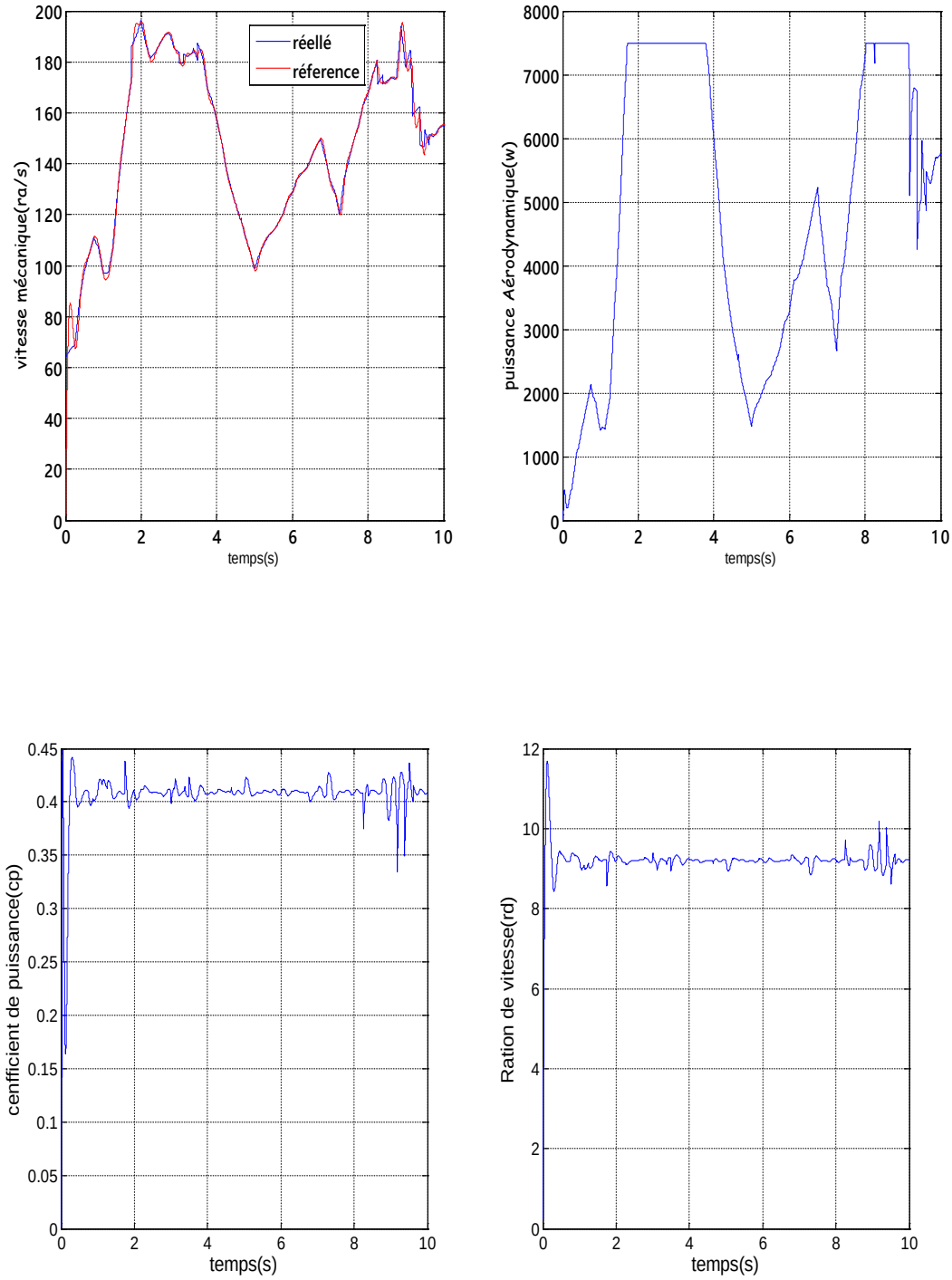


Fig.II.17:Résultats du MPPT obtenus avec régulateur PI.

II.10 Interprétation des résultats de simulation de MADA :

Afin de simuler notre machine, on a fait appel au logiciel MATLAB/SIMULIK. Les paramètres de la machine sont donnés en annexe A.

La tension d'attaque de la MADA à t=0 coté stator c'est la tension de réseau électrique à fréquence et tension constantes (*Vs= 311 V ; fs= 50 Hz*). Dans le coté rotorique on a étudies les cas suivent :

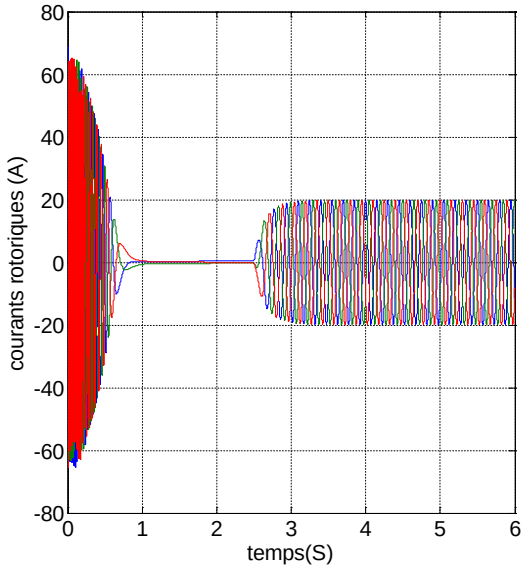
- 1er cas : Fonctionnement en moteur :
  - 1er test machin à cage (Vra, Vrb, Vrc=0).
  - 2^{éme} test (Vrac, Vrb, Vrc=10v et fr=15hz).
  - 3^{éme} test (Vra, Vrb, Vrc=10v et fr=30hz).
- 2^{éme} cas : Fonctionnement en générateur :
  - 1er test (Vra, Vrb, Vrc=15et fr=15hz et W=100).
  - 2^{éme} test (Vra, Vrb, Vrc=15et fr=15hz et W=200).

La figure (II.18) représente le fonctionnement de la MADA après un démarrage à vide (Elle fonctionne comme une machine asynchrone classique). Après l'introduction de la charge à l'instant t = 3s, on remarque que la vitesse diminue puis elle se stabilise.

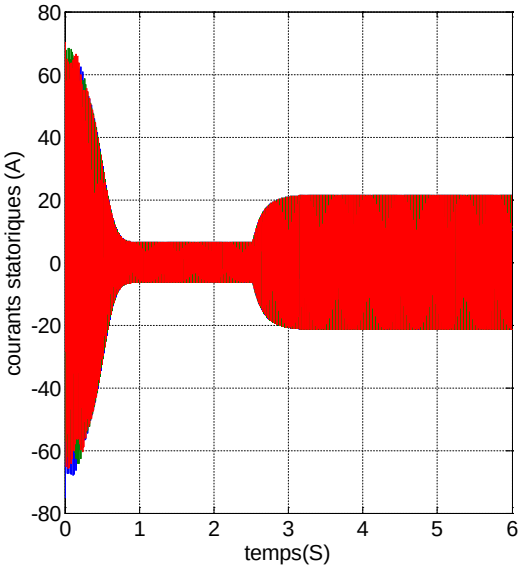
Dans le cas où on fait varier la fréquence rotorique de (15 Hz à 30 Hz) et on maintient la tension rotorique constante (15V), on remarque qu'elle a une influence directe sur la vitesse, et implique des oscillations plus importantes au niveau des grandeurs par rapport au cas précédent comme il est illustré sur les figures (II.19-20).

On remarque également que le couple varie avec la variation de la charge ce qui montre l'existence d'un fort couplage entre le couple et la vitesse.

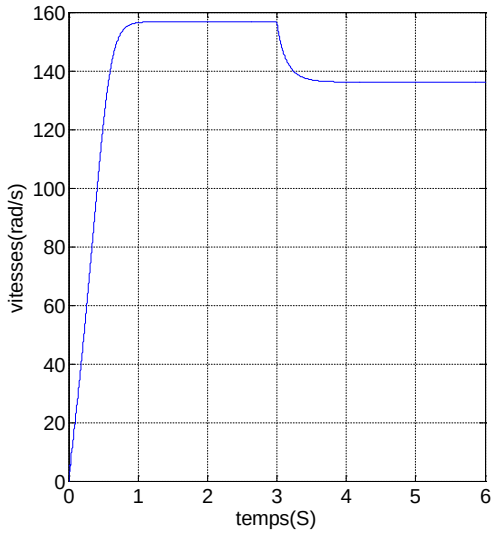
D'après les résultats de simulation obtenus, on observe que toute variation au niveau de la fréquence ou tension rotoriques a une influence directe sur la vitesse et le couple pour la figures (II.21-22).



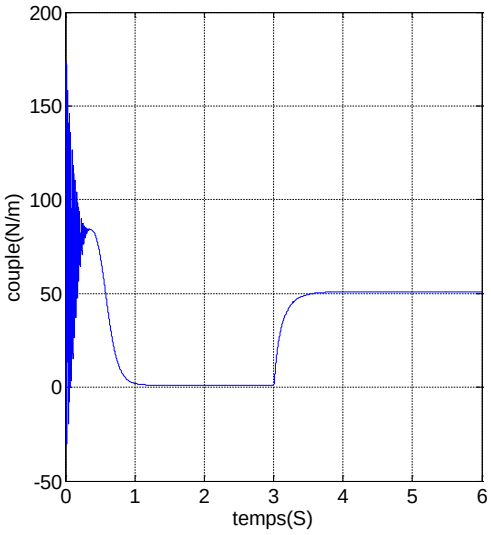
Courants rotoriques (A)



Courants statoriques (A)

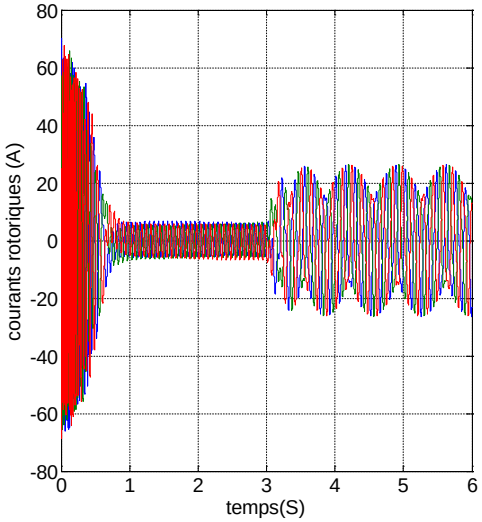


Vitesse (rad/s)

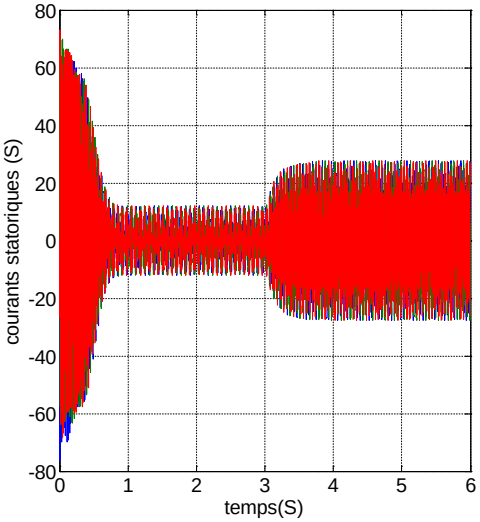


couple (N/m)

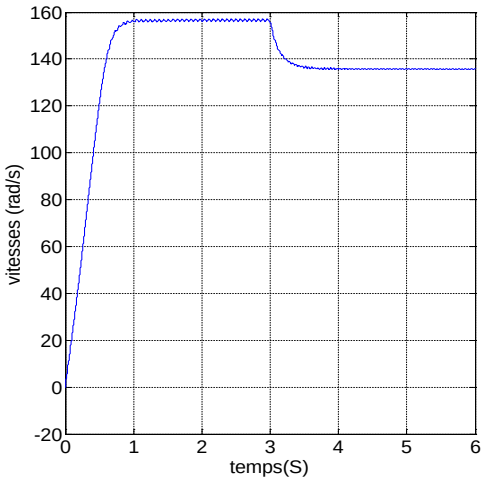
Fig II.18: résultats 1er cas et 1er test **(**Vra, Vrb, Vrc)=0



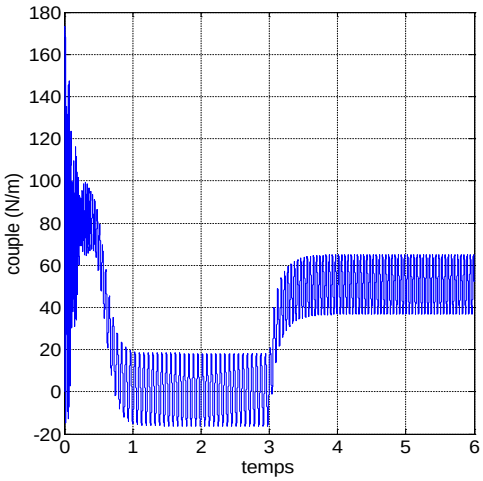
Courants rotoriques (A)



Courants statoriques (A)

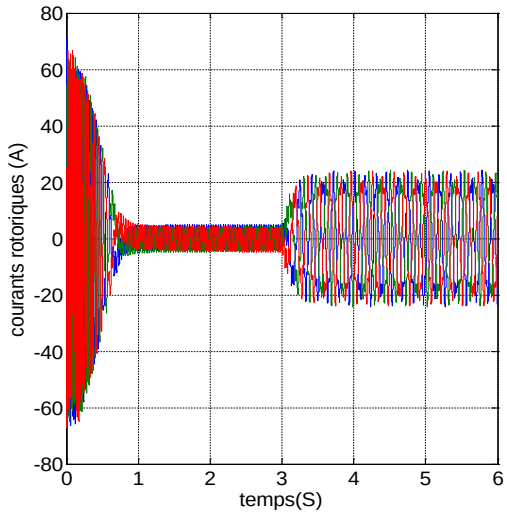


Vitesse (rad/s)

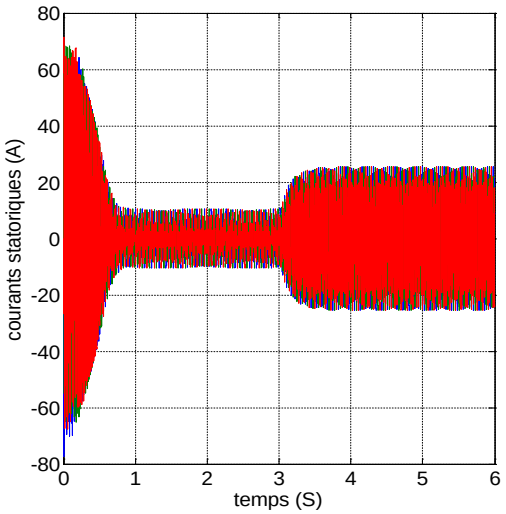


couple (N/m)

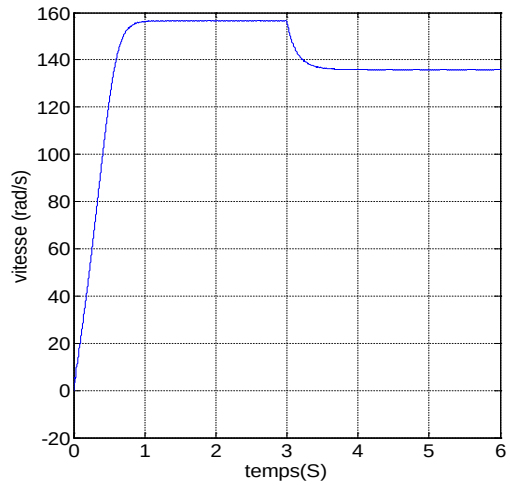
Fig II.19: résultats de 1er cas et 2er test (Vra, Vrb, Vrc=10v et fr=15hz).



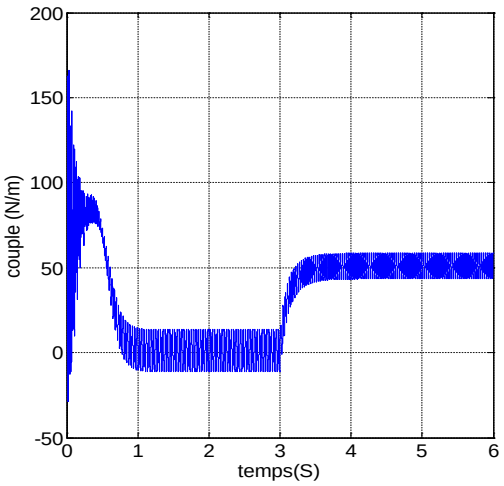
Courants rotoriques (A)



Courants statoriques (A)

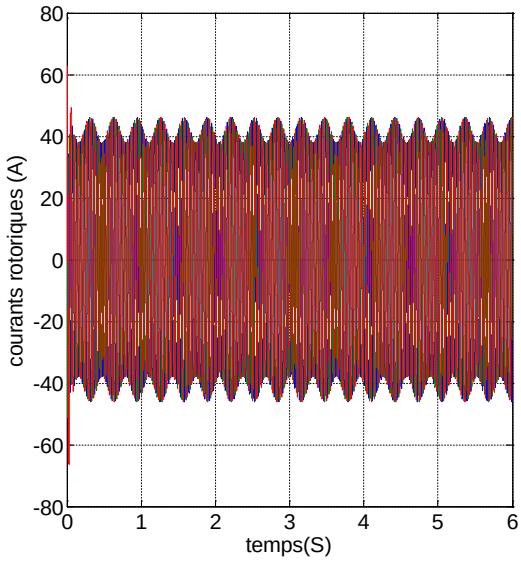


Vitesse (rad/s)

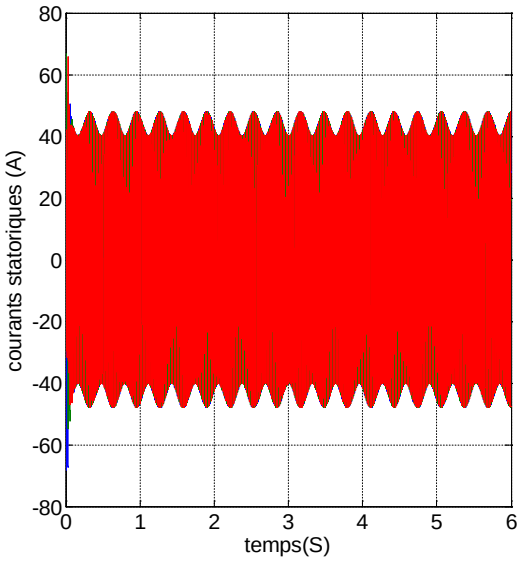


couple (N/m)

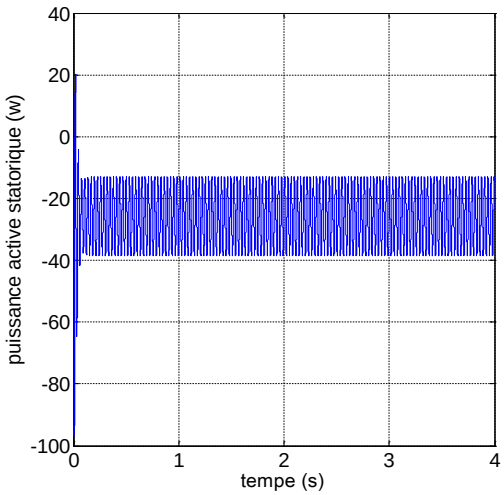
Fig II.20: résultats de 1er cas et 3er test (Vra,Vrb,Vrc=0 et fr=15hz).

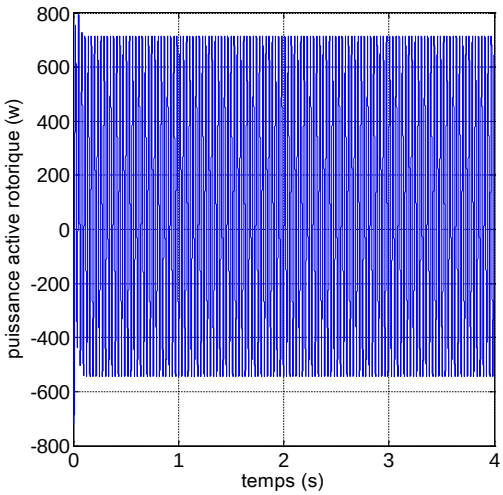


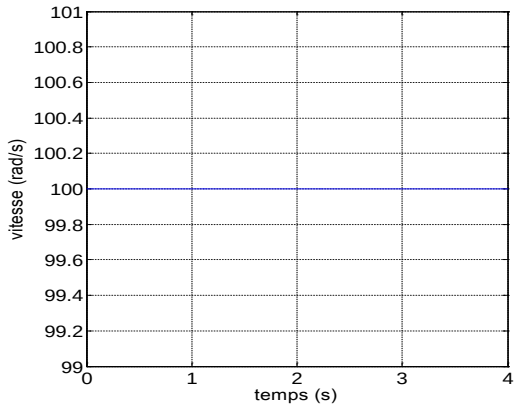
Courants rotoriques (A)



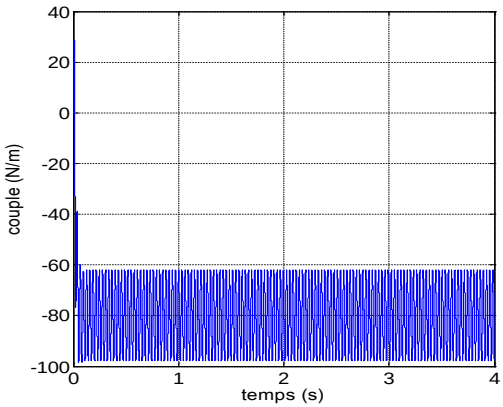
Courants statoriques (A)





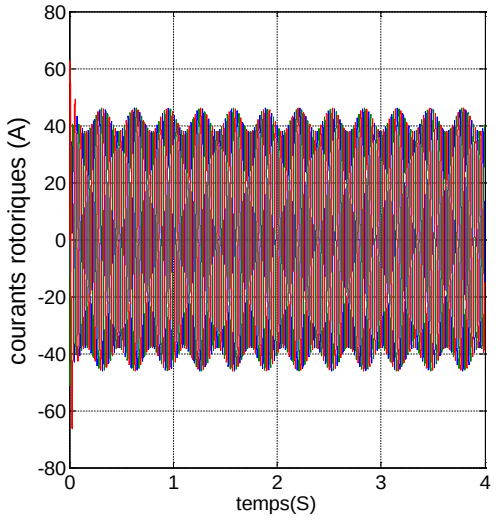


Vitesse (rad/s)

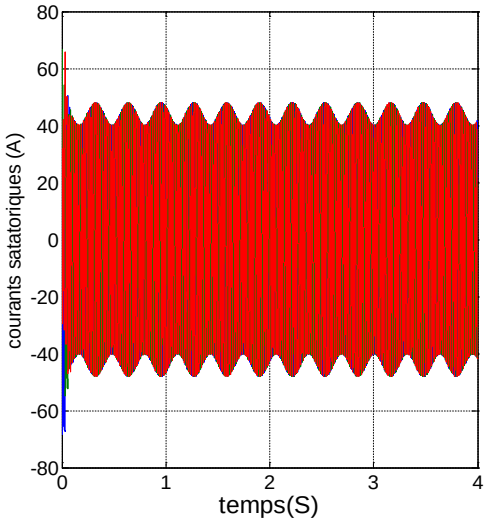


couple (N/m)

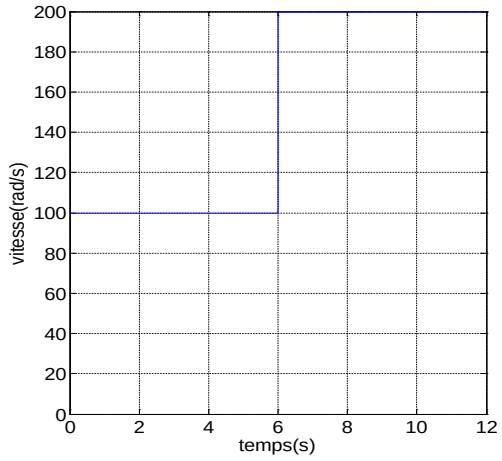
Fig II.21: résultats de 2er cas et 1er test (Vra, Vrb, Vrc=15et fr=15hz et W=100).



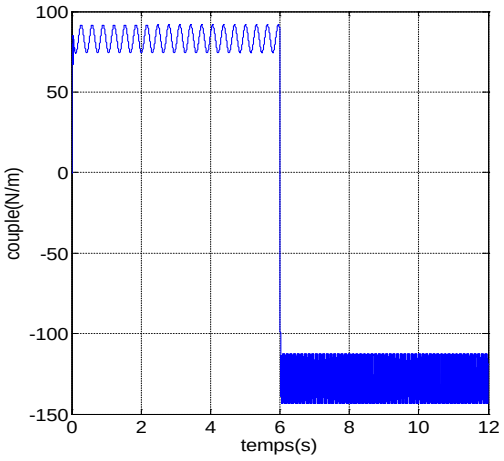
Courants rotoriques (A)



Courants statoriques (A)



Vitesse (rad/s)



couple (N/m)

Fig II.22 résultats de 2er cas et 1er test (Vra, Vrb, Vrc=15et fr=15hz et W=100/200).

II.11 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté une brève étude sur la machine asynchrone à double alimentation. On a aussi présenté le modèle de la machine dans le repère (abc) auquel on a appliqué la transformation de Park pour le rendre linéaire et plus adapté à la commande. Ensuite, on a modélisé le système d'alimentation qui comporte l'onduleur. Pour ce dernier, on a applique la technique de la MLI triangulo-sinusoïdale pour le commander. La modélisation de la MADA et son système d'alimentation ont pour but de faciliter la mise en œuvre de la commande DTC (direct torque control). Cette dernière est le sujet du troisième chapitre.

CHAPITRE 3

Commande DTC de l'aérogénérateur à dounle alimantation

III.1 Introduction

La commande directe du couple (DTC, Direct Torque Control) appliquée aux machines asynchrones était une alternative aux méthodes classiques de contrôle par modulation de largeur d'impulsions. (PWM. Pulse Width Modulation) et à la commande par orientation du flux rotorique (FOC. Field Oriented Control). Elle est basée sur la régulation séparée du flux rotorique et du couple en utilisant deux régulateurs d'hystérésis et une table de commutation pour générer de façon directe les ordres de commande de l'onduleur de tension afin d'obtenir des dynamiques de couple et de flux plus importantes [23].

Ce chapitre est alors consacré à la présentation du principe de commande directe du couple appliquée à machine asynchrone, en expliquent le principe de réglage du flux, du couple électromagnétique, et la sélection du vecteur de tension rotorique.

II.2 Principe du contrôle directe du couple

L'objectif de la DTC est la régulation directe du couple de la machine, par l'application des différents vecteurs de tensions de l'onduleur, qui détermine son état. Les variables contrôlées sont : Le flux rotorique et le couple électromagnétique qui sont habituellement commandées par des régulateurs à hystérésis. Il s'agit de maintenir les grandeurs de flux rotorique et de couple électromagnétique à l'intérieur de ces bandes d'hystérésis. La sortie de ces régulateurs détermine le vecteur de tension de l'onduleur optimal à appliquer à chaque instant de commutation. Dans une commande DTC, il est préférable de travailler avec une fréquence de calcul élevée afin de réduire les oscillations du couple provoquées par les régulateurs à hystérésis [24].

Les caractéristiques générales d'une commande directe de couple sont :

- ✓ La commande directe de couple et de flux, à partir de la sélection des vecteurs optimaux
- ✓ de commutation de l'onduleur.
- ✓ L'obtention des flux et des courants rotorique proches de formes sinusoïdales.
- ✓ Une réponse dynamique de la machine très rapide.

- ✓ L'existence des oscillations du couple qui dépend, entre autres, des facteurs de la largeur des bandes des régulateurs à hystérésis.
- ✓ La fréquence de commutation de l'onduleur dépend de l'amplitude des bandes à hystérésis [25]

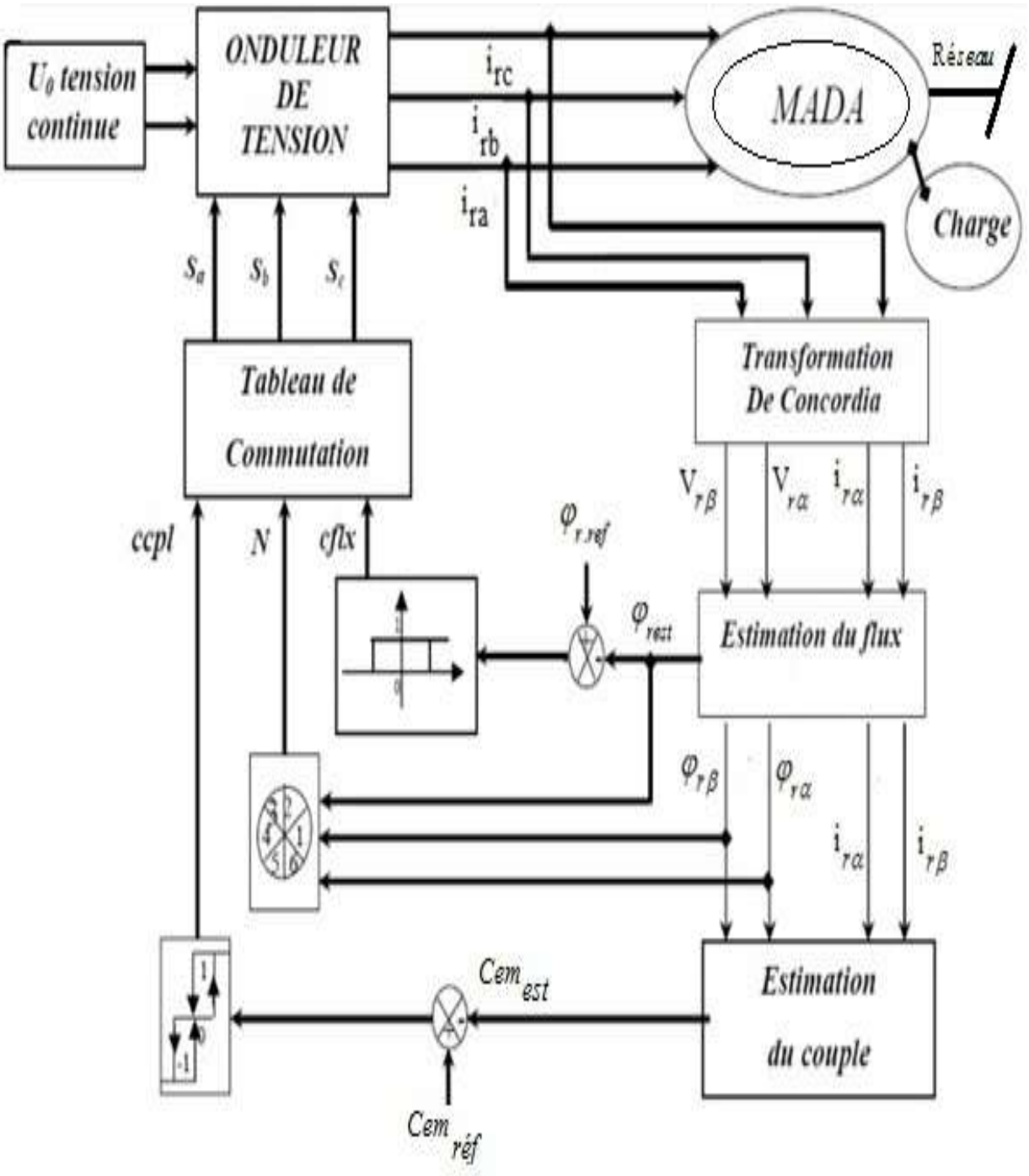


Fig.III.1 : Structure de la Commande Directe du Couple DTC.

III.2.1 : Contrôle du flux

Comme on l'a déjà mentionné, le contrôle direct du couple est basé sur l'orientation du flux rotorique. L'expression de ce flux dans le référentiel de Concordia est :

$$\phi_{ra}(t) = \int (V_{ra} - R_r . i_{ra})dt \quad \text{et} \quad \phi_{rb}(t) = \int (V_{rb} - R_r . i_{rb})dt \qquad \text{(III.1)}$$

Durant un intervalle périodique de contrôle [$0\ T_{ec}$] où T_{ec} correspond à la période d'échantillonnage, les signaux de commande (S_a, S_b, S_c) sont fixes. Donc on peut écrire :

$$\phi_{ra} = V_{ra} t - R \int i_{ra} dt + \phi_{ra}\big|_{t=0} \qquad \text{(III.2)}$$

Où : $\phi_r\big|_{t=0}$ est la valeur initiale du flux rotorique.

Dans notre étude, on négligera la résistance rotorique (ce qui est vérifié pour les grandes vitesses), sur l'intervalle [0, T_{ec}] l'extrémité du vecteur flux ϕ_r se déplace sur une droite dont la direction est donnée par V_s. La figure (III.2**)** représente ce principe lorsqu'on sélectionne le vecteur de tension V_r=V_3 [24].

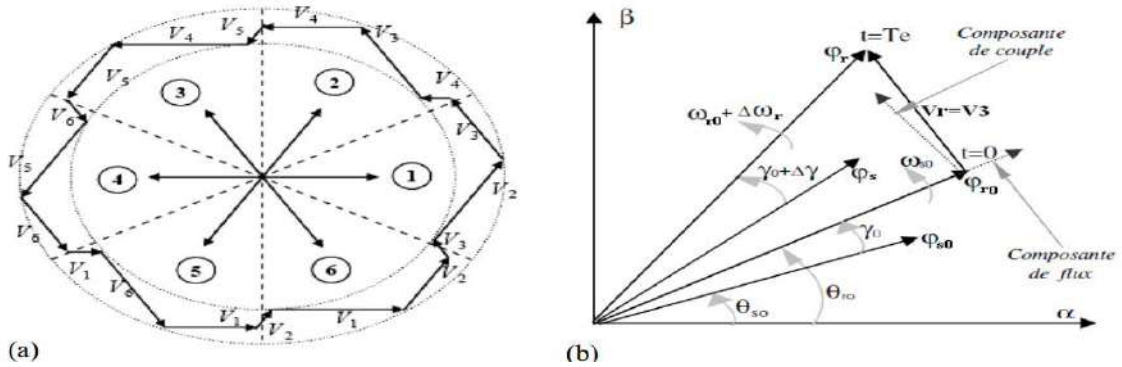


Figure III.2 : a.) Sélection de la vectrice tension V_i correspondant au contrôle de l'amplitude de flux,

b.) Évolution du vecteur flux rotorique dans le plan (α, β)

La "composante du flux" du vecteur tension (composante radiale) change l'amplitude du vecteur flux et sa "composante du couple" (composante tangentielle) change la position du vecteur flux. C'est à dire que les variations du couple sont contrôlées à partir de la vitesse de rotation du vecteur de flux rotorique.

Si la période de contrôle est assez petite, en choisissant une séquence appropriée des vecteurs de tension de l'onduleur, l'extrémité du vecteur flux peut suivre correctement la trajectoire désirée. Pour fonctionner avec un module du flux pratiquement constant, il suffit de choisir une trajectoire presque circulaire pour l'extrémité du vecteur flux. Cela n'est possible que si la période de contrôle est très faible devant la période de rotation du flux [23].

III.2.2 : Contrôle du couple électromagnétique

La transformation de PARK est faite avec conservation de puissance, l'expression du couple électromagnétique durant l'intervalle de commande peut être écrite sous la forme [5]:

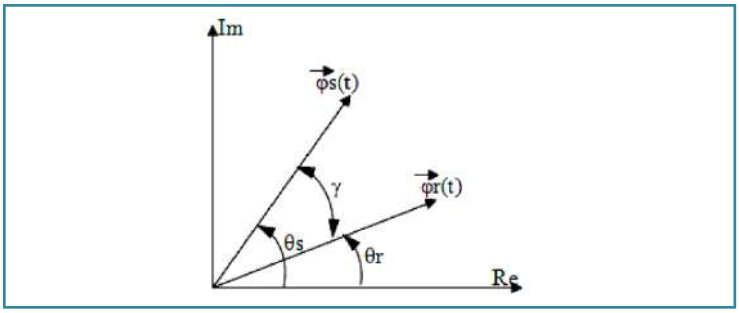
$$C_{em} = k\ \phi_s\ \phi_r \sin\gamma \qquad \text{(III.3)}$$

Avec :

- ✓ ϕ_s, ϕ_r c'est le vecteur de flux statorique et rotorique ;
- ✓ $\gamma = \theta_s - \theta_r$ est l'angle entre les vecteurs flux statorique et rotorique.;

Le contrôle du couple dépend directement du contrôle de la rotation du vecteur flux rotorique. En utilisant la notation complexe du flux statorique et du flux rotorique on obtient [26]:

$$\bar{\phi}_s = [\phi_s, \theta_s] = \phi_s e^{j\theta_s},\ \bar{\phi}_r = [\phi_r, \theta_r] = \phi_r e^{j\theta_r} \qquad \text{(III.4)}$$



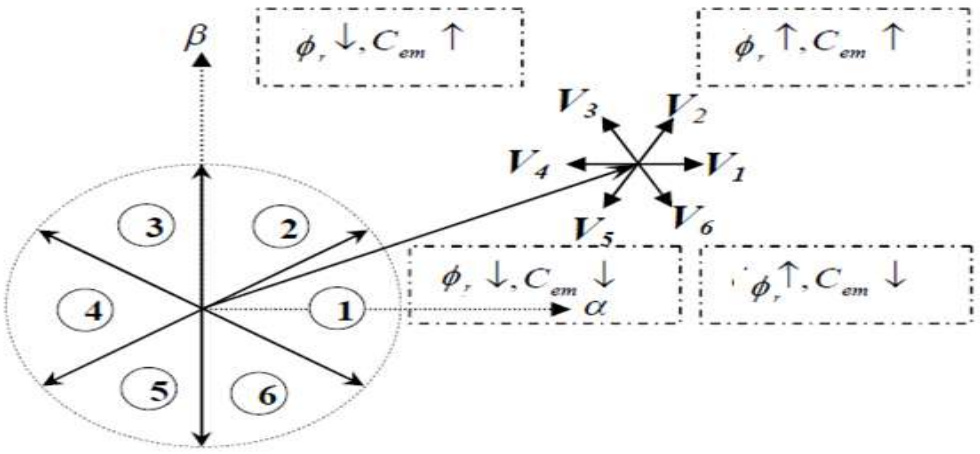
III.3 : Représentation complexe des vecteurs flux statorique et rotorique

III.3 Sélection de vecteur tension:

Pour fixer l'amplitude du flux rotorique, l'extrémité du vecteur flux, doit avoir une trajectoire circulaire, la vectrice tension appliquée, doit toujours être perpendiculaire au vecteur flux. Le choix de V_r dépend alors de la variation souhaitée pour le module de flux rotorique, et du sens de rotation, également de l'évolution souhaitée pour le couple.

Ainsi, nous pouvons délimiter l'espace d'évolution de φ_r dans le référentiel rotorique en le décomposant en six zones N= i, avec i=1,...., 6, lorsque le vecteur flux φ_r se trouve dans une zone numérotée N= i, le contrôle du flux et du couple peut être assuré en sélectionnant l'un des huit vecteurs tensions suivants [27]:

- ✓ si V_{i+1}est sélectionné alors ϕ_r croît et C_{em} croît.
- ✓ si V_{i-1}est sélectionné alors ϕ_r croît et C_{em} décroît.
- ✓ si V_{i+2}est sélectionné alors ϕ_r décroît et C_{em} croît.
- ✓ si V_{i-2}est sélectionné alors ϕ_r décroît et C_{em} décroît.
- ✓ si V_0 et V_7 sont sélectionnés alors la rotation du flux $\overline{\phi_r}$est arrêtée, d'ou une décroissance du couple alors que le module de flux $\overline{\phi_r}$reste inchangée.



III.4 : Sélection de vecteur tension selon la zone 1.

Lorsque le vecteur flux se trouve dans une zone numérotée i, les deux vecteurs V_i et V_{i+3} ont la composante de flux la plus importante. En plus leur effet sur le couple dépend de la position du vecteur flux dans la zone (ambiguïté sur le couple). Ainsi ils ne sont jamais appliqués. Le contrôle du flux et du couple est assuré en sélectionnant un des quatre vecteurs non nuls ou un des deux vecteurs nuls. Le rôle de un vecteur sur la figure (III.4).

III.4 Estimation du flux rotorique

Essentiellement, la structure DTC exige l'estimation du flux et du couple. Le flux rotorique peut être estimé par différentes techniques. Dans la structure de la DTC, le modèle de tension est couramment utilisé. Ainsi, l'amplitude du flux rotorique est estimée à partir de ses composantes suivant les axes (α,β), soit :

$$\phi_r = \phi_{r\alpha} + j\,\phi_{r\beta} \quad \text{et} \quad \begin{cases} \mathbf{V}_r dq = C.V_{abc} \\ \dot{\imath}_r dq = C.\dot{\imath}_{abc} \end{cases} \quad \begin{cases} \mathbf{V}_r = V_{rd} + jV_{rq} \\ \dot{\imath}_r = \dot{\imath}_{rd} + j\,\dot{\imath}_{rq} \end{cases} \tag{III.5}$$

Le module du flux rotorique s'écrit :

$$\begin{aligned} \phi_r &= \sqrt{\phi^2_{r\alpha} + \phi^2_{r\beta}} \\ \phi_{r\alpha} &= \int (V_\alpha - R_r.i_{r\alpha})dt + \phi_{r\alpha} \\ \phi_{r\beta} &= \int (V_\beta - R_r.i_{r\beta})dt + \phi_{r\beta} \end{aligned} \tag{III.6}$$

Les composantes des courant ir_α, ir_β sont obtenues par l'application de la transformation de Concordia aux courants mesurés ir_a, ir_b et ir_c:

$$\begin{aligned} i_r &= i_{r\alpha} + j.i_{r\beta} \\ i_{r\alpha} &= \sqrt{\frac{3}{2}}.i_{ra} \\ i_{r\beta} &= \frac{1}{\sqrt{2}}(i_{rb} - i_{rc}) \end{aligned} \quad \text{et} \quad c = \frac{\sqrt{3}}{2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -0.5 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -0.5 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \tag{III.7}$$

On reconstruit les composantes du vecteur tension à partir de la mesure de la tension d'entrée de l'onduleur et des états des interrupteurs (S_a, S_b, S_c). En appliquant la transformation de Concordia, on a :

$$V_r = V_{r\alpha} + j.V_{r\beta}$$
$$V_{r\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}}.(V_{ra} - \frac{1}{2}(V_{br} - V_{cr})) = \sqrt{\frac{2}{3}}.U_{dc}(S_{ar} - \frac{1}{2}(S_{br} + S_{cr})) \quad \text{(III.8)}$$
$$V_{r\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}}(V_{br} - V_{cr}) = \frac{1}{\sqrt{2}}U_{dc}(S_{br} - S_{cr})$$

Ces équations représentent les étapes de calcul nécessaire à l'estimation de l'amplitude du flux rotorique. Cette méthode d'estimation du flux rotorique présente l'avantage de la simplicité, de la robustesse vis-à-vis des variations des paramètres de la machine et de la précision, notamment à vitesse moyenne et élevée, la chute de tension ohmique devient négligeable [28].

III.5 Elaboration du correcteur de flux

Comme on l'a déjà vu, lorsque le vecteur flux se trouve dans la zone i, les vecteurs tensions V_{i+1} ou V_{i+1} sont choisis pour augmenter l'amplitude du flux et les vectrices tensions V_{i+2} ou V_{i-2} sont choisis pour diminuer l'amplitude du flux. Ce qui montre que le choix du vecteur tension dépend du signe de l'erreur du flux et ne dépend pas de l'amplitude de l'erreur. Donc la sortie du correcteur du flux peut être une variable logique.

- ✓ 1 : lorsque l'erreur de flux est positive.
- ✓ -1 : lorsque l'erreur de flux est négative.

III.6 Estimation de couple

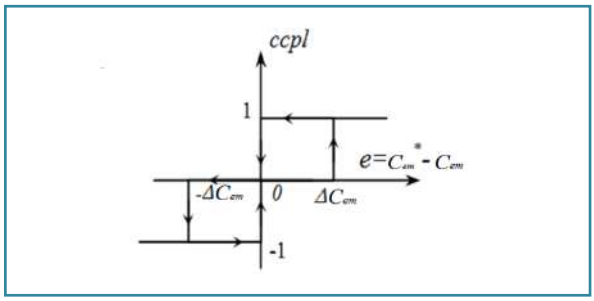
Le couple électromagnétique peut être estimé à partir des grandeurs estimées du flux, et les grandeurs mesurés des courants de ligne, par l'équation :

$$C_{em} = P(\phi_\alpha.i_\beta - \phi_\beta.i_\alpha) \quad \text{(III.9)}$$

III.6.1 Elaboration du correcteur du couple

Il est évident que si on choisit un vecteur tension non nul, le couple décroît plus rapidement que si on applique un vecteur tension nul [29]. L'avantage d'utiliser le vecteur nul est que grâce aux changements moins rapides de couple, on diminue le nombre de commutations.

Par conséquent en peut envisager un correcteur hystérésis à trois niveaux pour le couple (figure III.5).



III.5 : Fonction de sortie du correcteur du couple (hystérésis à trois niveaux)

III.6.2 Elaboration de table de commutation

D'après le principe de la structure de commande directe du couple, la sélection d'un vecteur adéquat, à chaque période d'échantillonnage, est faite pour maintenir le couple et le flux dans les limites des deux bandes à hystérésis. En particulier la sélection est faite sur la base de l'erreur instantanée du flux et de couple [28].

FLUX	COUPLE	N=1	N=2	N=3	N=4	N=5	N=6	REGULATEURS
cflx=0	ccpl=1	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2	Deux Niveaux
	ccpl=0	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7	
	ccpl=-1	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	Trois niveaux
cflx=1	ccpl=1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	Deux Niveaux
	ccpl=0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0	
	ccpl=-1	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	Trois niveaux

Tableau .III.1. Stratégie de contrôle avec un comparateur à hystérésis à trois niveaux.

III .7 Modélisation sous MATLAB Simulink

III .7.1 Architecture générale

Les éléments théoriques présentés plus haut nous permettent d'établir un circuit de contrôle d'une machine asynchrone en couple. La figure 6 montre l'allure générale du circuit de commande et de la machine asynchrone.

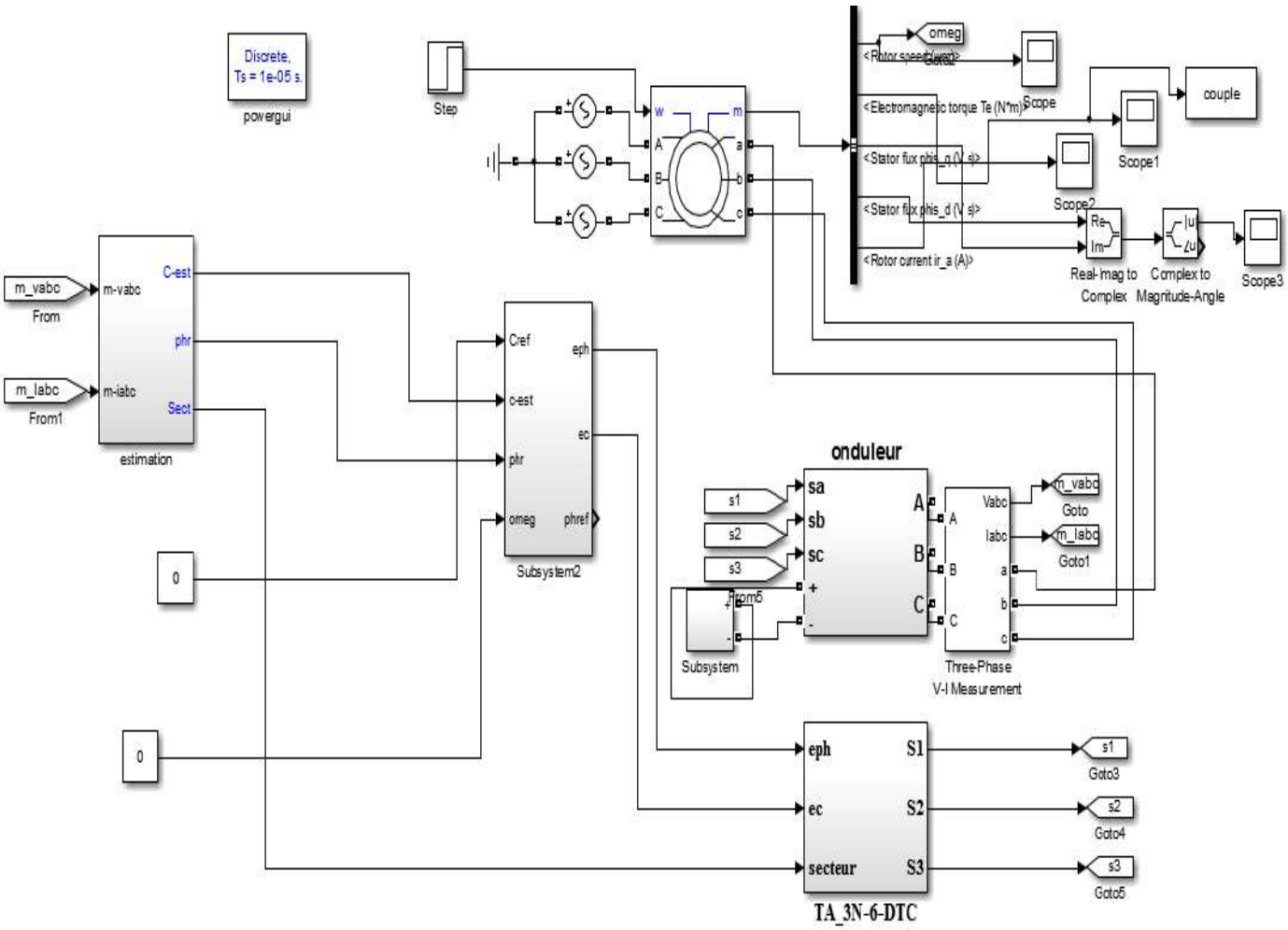


Fig III.6 : Structure générale de DTC sur mathlab Simulink.

Pour contrôler une machine asynchrone directement par son couple, on modélise plusieurs blocs distincts :

– L'estimateur de flux.

– La détection des secteurs pour la tension de commande.

– La commande des interrupteurs fonction des indicateurs de contrôles *ccpl*, *flux*, et *N*.

III .7.2 Bloc estimateur de flux

L'implémentation de ce bloc permet d'estimer le flux en fonction des courants et tensions directs et quadratiques issus du bloc machine asynchrone. Les équations données dans la partie précédentes sont mises en place dans la structure interne du bloc.

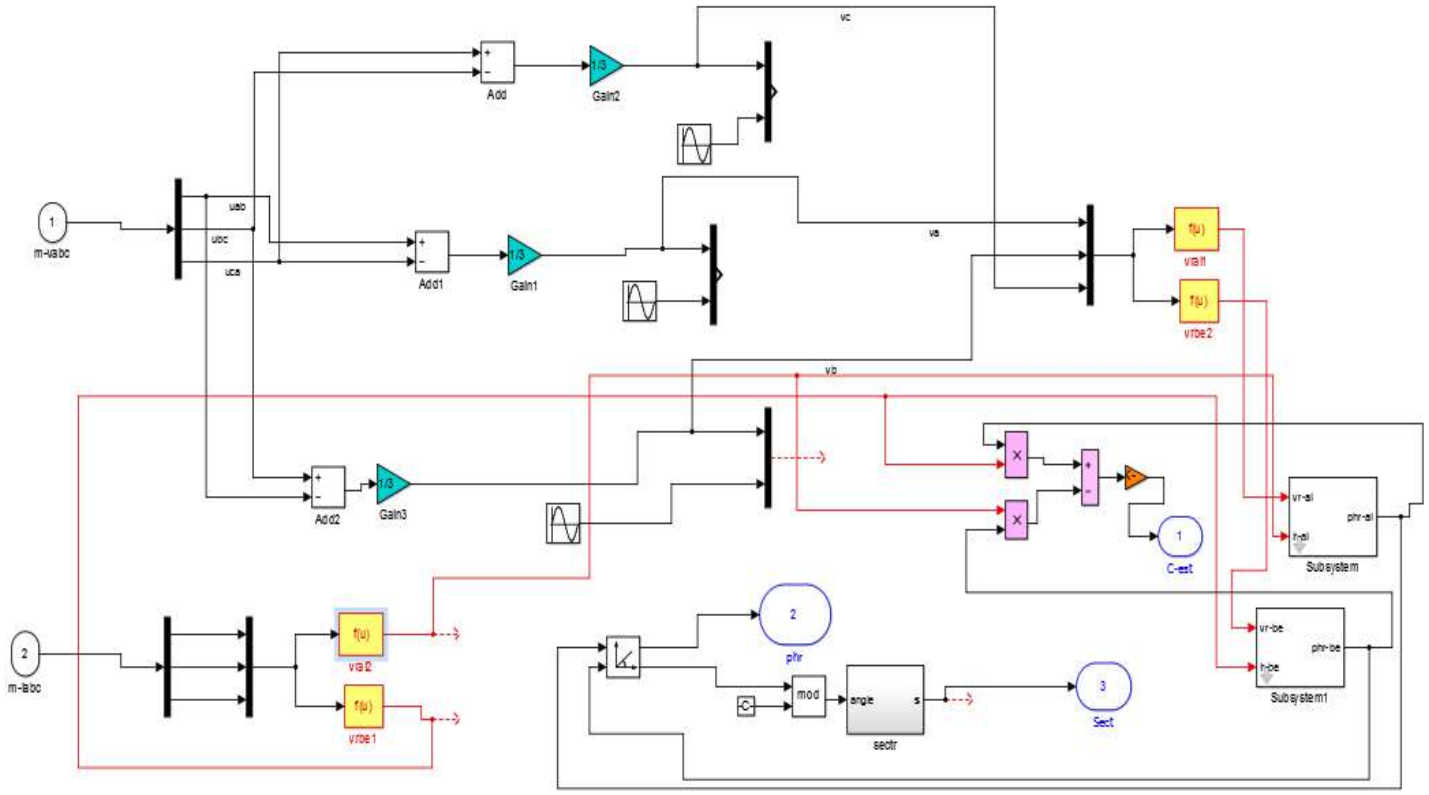


fig.III.7 Structure du bloc d'estimation de flux.

III .7.3 Bloc détection de secteur

La détection de secteur est obtenue en mesurant l'argument du flux de la machine. La structure est présentée en figure 6.

La fonction MATLAB permet de sélectionner le secteur adéquate en fonction de l'argument complexe de *Vs*.

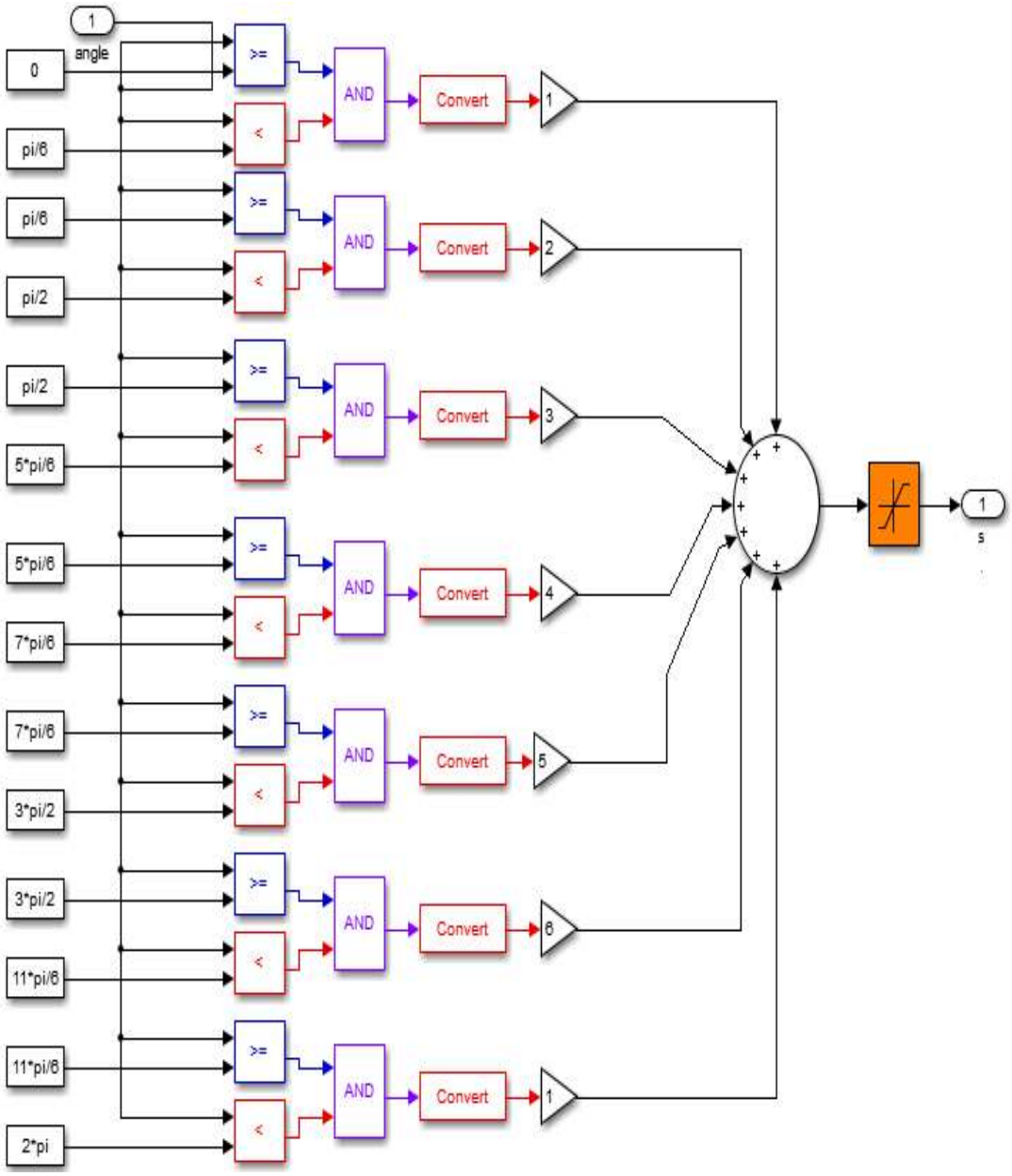


Fig III.8 : Structure du bloc de détection du secteur.

III .7.4 Bloc commande des interrupteurs

Pour asservir la machine asynchrone en couple, il est nécessaire de commander sa tension triphasée d'alimentation en fonction des besoins en couple. En effet, lorsque ce dernier est situé en dessous (respectivement au-dessus) d'un certain seuil défini dans les relais (voir figure 3), on applique une tension de commande en fonction de la table 1. Cette tension permet d'établir ensuite la commande des interrupteurs en composant une tension triphasée.

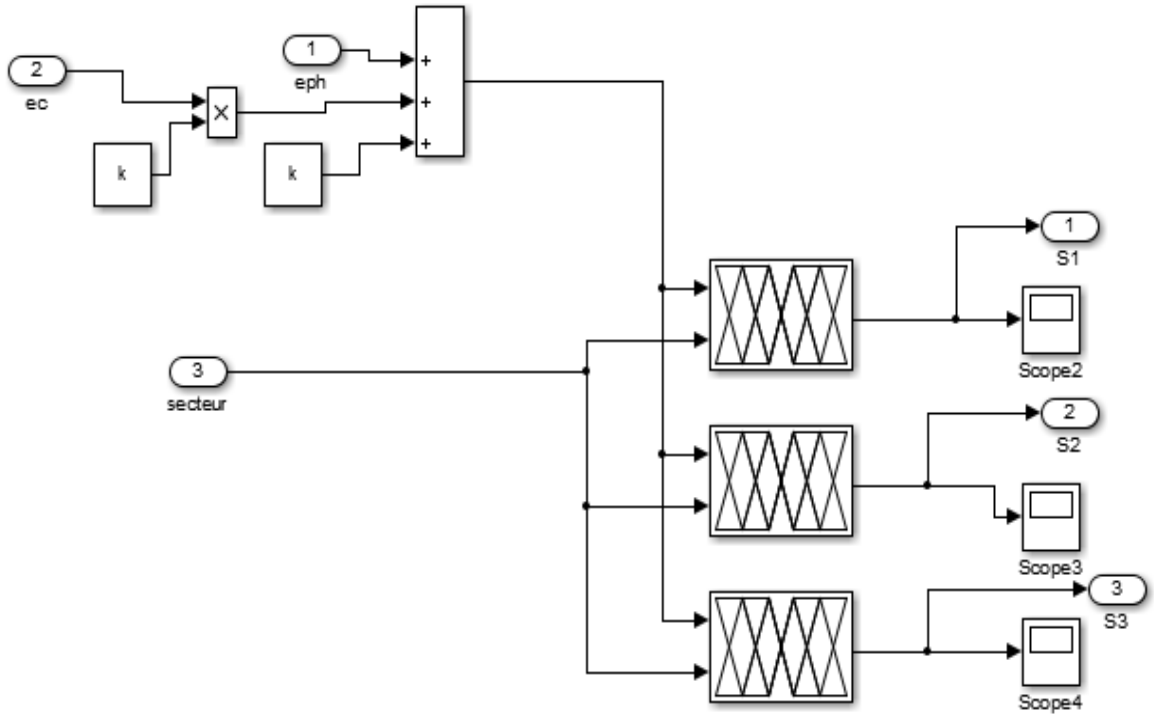


Fig III.9 : Structure du bloc de commande des interrupteurs.

III .8 Simulation de la commande dtc de la MADA

On présente dans cette partie les résultats de simulation, illustrant le comportement de la structure de contrôle direct de couple appliquée à un modèle de machine asynchrone à double alimentation alimentée par un onduleur de tension. Les caractéristiques de cette machine sont définies en annexe c.

Le schéma de principe de la commande est donné par la figure III.1. Dans cette partie de simulation nous utilisons une MADA de 7.5KW Un vent de 4m/s à 11.8 m/s est appliqué sur les pales. Dont les paramètres sont donnés dans le chapitre II.1.

Dans la figure III.11 nous apercevons les performances de réglage de vitesse da la MADA obtenus par la stratégie MPPT. Notons que le bloc MPPT délivre un coulpe de référence optimale.

La figure III.12, illustre les réponses du système et montrent la haute dynamique du couple, on constate que le contrôleur à trois niveaux permet le contrôle de la machine dans les deux sens de rotation, mais avec un nombre de commutations plus élevées ce qui augmente

les pertes par commutation des interrupteurs. On peut ainsi conclure que l'ensemble des six vecteurs tension actifs fournis par le convertisseur à 2-niveaux sont suffisant pour garantir la stabilité de la régulation découplée du couple et du flux rotorique.

La figure III.12 Les différents résultats de simulation montrent que le flux rotorique est commandé à sa référence et le couple électromagnétique suit bien sa valeur de référence, ainsi la trajectoire du flux décrit un cercle comme prévu.

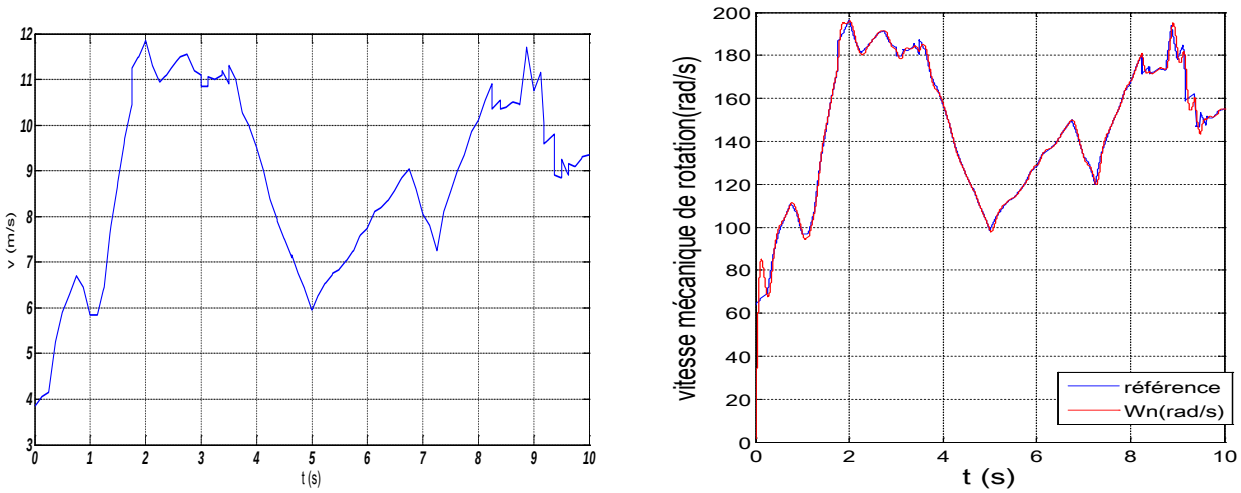


Fig III.10 Profil du vent et la vitesse de rotation avec sa référence.

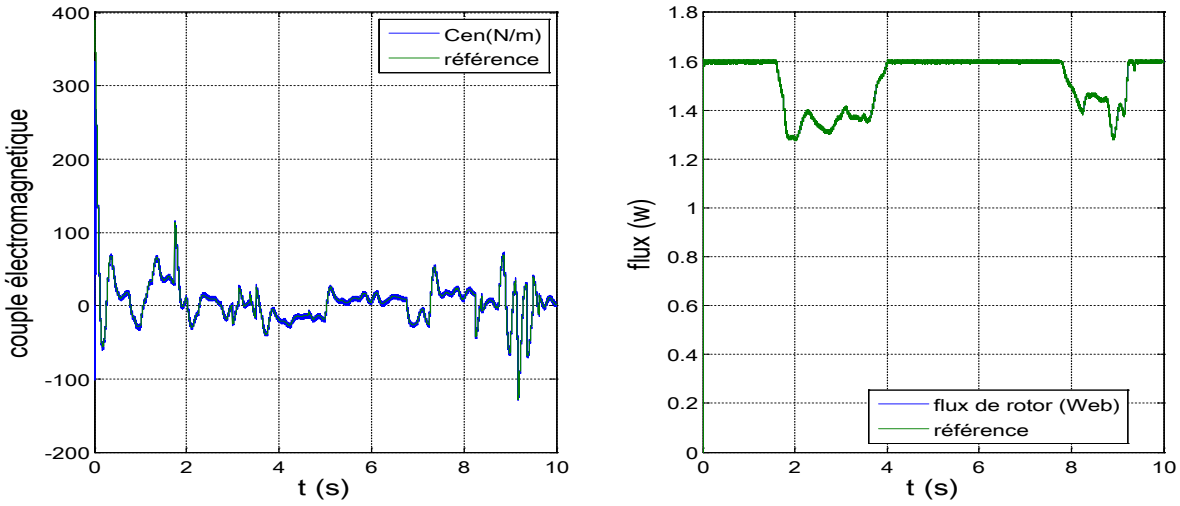


Fig III.11 .Couple électromagnétique et le flux du rotor.

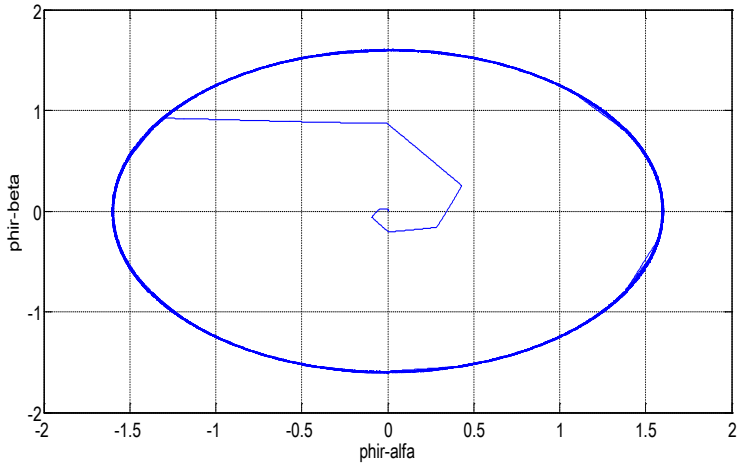


Fig. III.12 : Flux rotorique dans le plan (α,β).

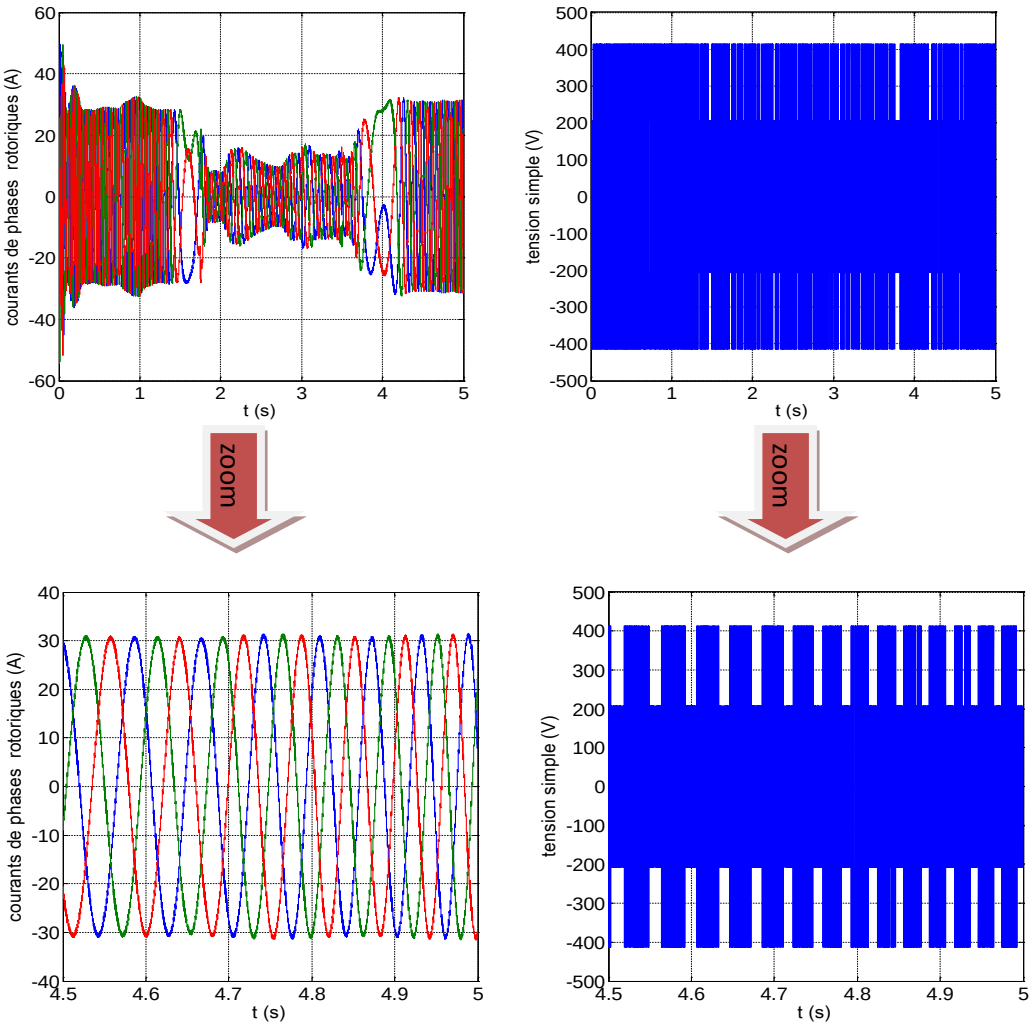


Fig.13 : Tension simple et le courant phase rotorique.

III.9 Conclusion

Dans cet exposé nous avons présenté les concepts généraux de la commande directe du couple d'une machine asynchrone à double alimentation. L'étude principe de la structure de commande a été élaborée à partir des conditions de fonctionnement idéales, cette technique apporte une solution très intéressante aux problèmes de robustesse. L'avantage principal de ce type de contrôle est qu'il permet de contrôler le flux et le couple de la machine sans avoir besoin à utiliser un capteur mécanique. Les résultats de simulation obtenus, nous ont permis de juger la qualité de la commande. La commande DTC permet d'obtenir des performances dynamiques du couple très satisfaisantes, caractérisées par des faibles temps de réponse et par une absence de dépassement de consigne où oscillations transitoires.

Conclusion général

L'objectif préalablement défini de ce travail consistait à la modélisation et à la commande d'une chaîne de conversion éolienne par DTC. Dans le contexte des énergies renouvelables, un état de l'art de la génération éolienne est présenté dans le premier lieu, on rappelle les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique ainsi que les différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement. est consacré à une étude générale de la machine asynchrone à double alimentation (MADA), ses applications et ses variantes de fonctionnement.

Le deuxième chapitre de ce mémoire Nous avons développé la modélisation d'une machine asynchrone à double alimentation en tenant compte des hypothèses simplificatrices et la modélisation d'un onduleur. Nous avons pu établir un modèle mathématique simplifié de la MADA en vue d'une alimentation par convertisseurs statiques en utilisant la transformation de PARK. On a utilisé une stratégie MPPT sans asservissement de vitesse au niveau de la turbine éolienne pour capter le maximum de puissance du vent.

Dans le troisième chapitre, nous nous présenté les concepts généraux de la commande DTC (direct torque control) d'une machine asynchrone à double alimentation. L'étude principe de la structure de commande a été élaborée à partir des conditions de fonctionnement idéales, cette technique apporte une solution très intéressante aux problèmes de robustesse. Les grandeurs flux rotorique et couple électromagnétique sont calculés uniquement à partir de capteur mécanique .La DTC présente un temps de réponse en couple et en vitesse réduit. De même, il n'est pas nécessaire de connaître la position angulaire du rotor car seule la position du flux statorique est utilisée.

Par contre, cette stratégie présente l'inconvénient majeur de l'absence de maîtrise de la fréquence de commutation de l'onduleur.

Annexe a

Paramètres mécaniques et électriques du système éolien étudié

Les paramètres de la turbine

Paramètre	Signification
V=11.8m/s	La vitesse de vent
β =0°	Angle de calage
ρ =0.3126kg/m^2	La Masse volumique de l'aire
R=3m	Rayon de la pale
G=5.4	Rapport de transmission du multiplicateur
KF=0.00681	Coefficient de frottement visqueux du générateur

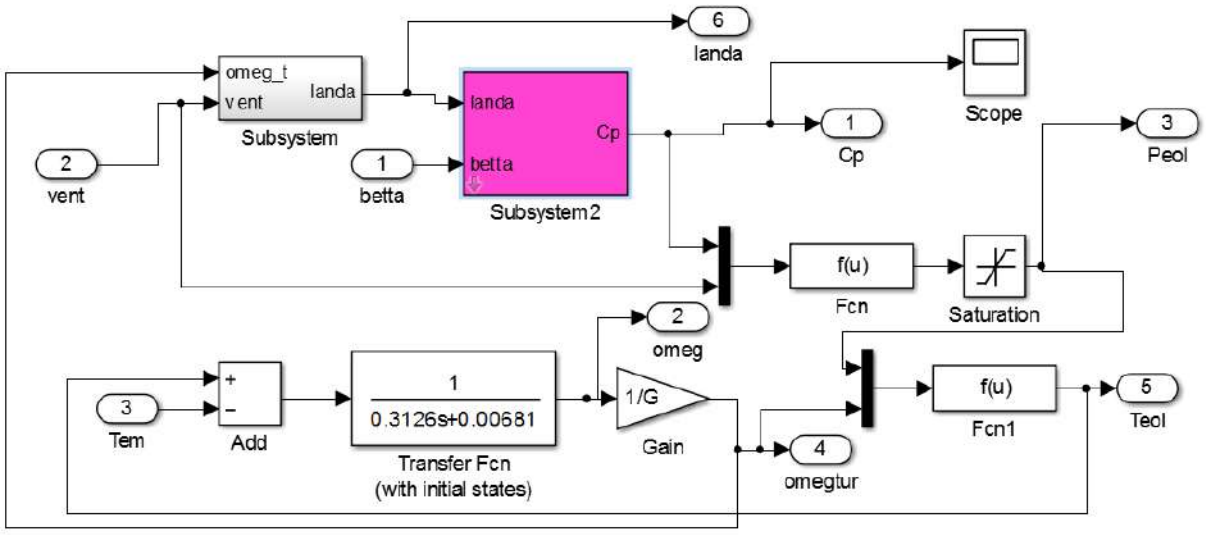


Schéma de simulation la turbine

Annexe b

Programme cp

```
clc,clear all,close all
lam=0:.2:20;bet=[0 5 10 15 20];
for jj = 1:length(bet)
for ii = 1:length(lam)
cp(ii)=.18*(90/(.4+.5*lam(ii))-6.8-
.115*bet(jj)^2)*exp(-8/(.4+.5*lam(ii))+.16);
end
figure(1),hold on,plot(lam,cp)
end
ylabel('cp'),xlabel('lam'),grid
AXIS([min(lam) max(lam) 0 .05 ]) ,hold off
```

Annexe c

Les paramètres de la machine asynchrone à double alimentation (MADA)

Paramètres	Signification
P =7.5kw	Puissance nominale consommé
Ω =1440 tr/min	Vitesse nominal
p=2	Paire de poles

V=220v/380v/50HZ	Tension d'alimentation-fréquence
Rs=1.2 Ω	Resistance statorique
Rr=1.8 Ω	Resistance rotorique
Ls=0.1554H	Inductance statorique
Lr=0.1568H	Inductance rotorique
M=0.154H	Inductance Mutuell
J=0.22kg.m^2	Inertie du rotor
Kf=0.002N.m/rad	Coefficient de frottement