الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique et de l'Informatique



Projet de Fin d'Etudes

Présenté pour l'obtention du Diplôme
de Master en Génie Électrique

Spécialité : *Commande et Electronique Industrielle*

THEME

Commande des puissances active et réactive de la Machin

Asynchrone à Double Alimentation, en utilisant la commande neuronale et neuro-flou

Proposé et dirigé par,

Dr. BOUDANA DJAMEL

Dr .BOULKHRACHEF SALAH

Préparé et présenté par,

M. BENSLIMANE HACENE

M. CHERIET LOKMAN

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 BOUDANA DJAMEL, ainsi que Monsieur BOULKHRACHEF SALEH, 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.

DEDICACES

A mes cher parents

A toute ma famille

A tous mes frères et mes amis

A tous les enseignants et les éducateurs qui ont contribué à ma formation durant

A tout le parcours de mes études jusqu'à ce jour

A…..je dédie ce modeste travail.

Hacene et Lokman

Sommaire

Introduction générale .....

Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliennes

I.1 Introduction 01
I.2 Historique 01
I.3 principes et éléments constitutifs de l'éolien 03
I.3.1 descriptif d'une éolienne 04
I.3.2 principaux composant d'une éolienne 05
I.3.3 le principe de fonctionnement d'une éolienne 08
I.4 les différents types d'éoliennes 09
I.4.1 éoliennes a axe vertical 11
I.4.2 éoliennes a axe horizontal 12
I.5 avantages et inconvénients de l'énergie éolienne 12
I.5.1 les avantages 12
I.5.2. les inconvénients 14
I.6 conversion de l'énergie éolienne 15
I.6.1 loi de BETZ 15
I.6.2 Production d'énergie mécanique 18
I.7 système de régulation 18
I.7.1 bilan des forces sur la pale 18
I.7.2 moyens de réglage de la conversion de l'énergie 19
I.7.2.1 Système à décrochage aérodynamique « stall » 19
I.7.2.2 Système d'orientation des pales « Pitch » 20
I.8 Intérêt de la vitesse variable 21
I.9 Modélisation de la turbine éolienne 22
I.9.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine 23
I.9.2 Modélisation de la vitesse du vent 23
I.9.3 Modélisation de la turbine 25
I.9.4 Modèle du multiplicateur 26
I. 9.5 Equation dynamique de l'arbre de la génératrice 26
I.10-conclusion 28

Chapitre II : Modélisation et fonctionnement de la MADA

II.1 Introduction 29
II.2 Structure de la machine 29
II.3 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation 29
II.4 Classification des machines à double alimentation 30
II.5 Domaine d'application de la MADA 32
II.5.1 Fonctionnement moteur dans les applications industrielles 32

II.5.1.1 Fonctionnement en moteur avec deux convertisseurs 32
II.5.1.2 Fonctionnement en moteur avec un seul convertisseur 33
II.5.2 Systèmes de génération éolienne à vitesse variable 34
II.6 Différentes structures d'alimentation de la MADA dans les systèmes éoliens 35
II.6.1 Machine asynchrone à double alimentation « type brushless » 35
II.6.2 MADA à énergie rotorique dissipée 35
II.6.3 Structure de kramer 36
II.6.4 Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI 36
II.6.5 Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur 37
II.6.6 Convertisseur Matriciel 38
II.7 Mode de fonctionnement de la MADA 38
II.7.1 Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone 39
II.7.2 Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone 39
II.7.3 Fonctionnement en mode générateur hyposynchrone 40
II.7.4 Fonctionnement en mode générateur hypersynchrone 40
II.8 Modélisation de la machine à double alimentation 41
II.8.1 Hypothèses simplificatrices 41
II.8.2 Modèle de la MADA dans le repère abc 41
II.8.3 Changement de repère 44
II.8.3.1 La transformation de Park 44
II.8.3.2 Equations électriques et magnétiques dans le système d'axes (d, q) 45
II.8.4 Choix du référentiel 46
II.8.5 Modèle biphasé de la MADA lié au champ tournant 47
II. 8.6 Mise sous forme d'équation d'état 47
II.9 Modélisation de l'alimentation de La MADA 48
II.9.1 Modélisation du redresseur 49
II.9.2 Modélisation du filtre 49
II.9.3 Modélisation de l'onduleur 50
II.9.4 Commande par modélisation de largeur d'impulsion (MLI) 52
II.10 résultent de Simulation de la machine asynchrone a double alimentation 53
II.11 Interprétation des résultats 56

II.12 Conclusion 57

Chapitre III
Commande vectorielle de la MADA

III.1-Introduction 58
III.2 Principe de la commande vectorielle 58
III.3 Modèle pour le contrôle indépendant des puissances 60
III.3.1 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques 62
III.3.2 Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques 63
III.4 Commande indirecte 65
III.5 commande directe 65

III.6 Simulation de la commande indirecte de puissance 66
III.6.1 fonctionnement à vitesse fixe 66
III.6.2 interprétation des résultats 69
III.6.3 fonctionnement en MPPT 70
III.6.3.1 Stratégie MPPT 70
III.6.3.2 Résultats de simulation 71
III.6.3.3 interprétation des résultats 73
III.7 Robustesse de la régulation 74
III.7.1 Robustesse vis-à-vis de la variation de la résistance rotorique 74
III.7.2 Robustesse vis-à-vis de la variation des inductances 75
III.8 Conclusion 76

Chapitre IV
Commande par réseaux neurone et neuro-flou
de la MADA

IV.1 Introduction 77
IV.2 le système neuronal 78
IV.2.1 neurone biologique 78
IV.2.2 neurone formel 79
IV.2.3 réseaux de neurones artificiels 79
IV.2.3.1 les réseaux non bouclés 79
IV.2.3.2 les réseaux bouclés 80
IV.2.4 apprentissage des réseaux de neurones 80
IV.2.4.1 apprentissage supervisé 80
IV.2.4.2 apprentissage non supervisé 80
IV.2.4.3 apprentissage par renforcement 80
IV.2.5 rétropropagation 81
IV.2.5.1 principe de la rétropropagation 81
IV.2.5.2 algorithme d'apprentissage 82
IV.2.5.3 étude du taux d'apprentissage 83
IV.2.6 commande par réseaux de neurones de la MADA 84
IV.2.7 résultats de simulation 84
IV.2.8 interpeétation des résultats 90
IV.3 le système neuro-flou 91
IV.3.1 avantages et inconvénient de la logique flou et réseaux de neurons 91
IV.3.2 Le système neuro-flou hybride 92
IV.3.3 Le système neuro-flou hybride type mamdani 93
IV.3.4 Le système neuro-flou type takagi sugeno 94
IV.3.5 les avantages des système neuro-flou 96
IV.3.6 applications des système neuro-flou au réglage des puissance de la MADA 96
IV.3.7 résultats de simulation 97
IV.3.8 interprétation des résultats 103

IV. 4. conclusion 104

Listes des Figure

Chapitre I

Figure I-1	La génération d'électricité éolienne	02
Figure I-2	Puissance éolienne cumulée dans le monde en MW	0 3
Figure I-3	Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur	04
Figure I-4	Tour d'une turbine	05
Figure I-5	Rotor d'une turbine	06
Figure I-6	Constitution d'une nacelle	07
Figure I-7	Différents types d'éoliennes.	10
Figure I-8	Tube de courant d'air autour d'une éolienne	15
Figure I-9	Coefficient de puissance	17
Figure I-10	Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes	17
Figure I-11	Bilan des forces sur une section de pale	19
Figure I-12	Flux d'air sur un profil de pale " stall	20
Figure I-13	Variation de l'angle de calage d'une pale	20
Figure I-14	Influence de l'angle de calage sur le coefficient de puissance	21
Figure I-15	Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et de la vitesse du vent.	22
Figure I-16	Modèle mécanique simplifié de la turbine	23
Figure I-17	Différents profils de vent	24
Figure I-18	Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine (λ) pour une éolienne de 1.5 MW	25
Figure I-19	Schéma bloc du modèle de la turbine	27

chapitre II

Figure II-1	Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA	29
Figure II-2	Schéma de principe d'une simple MADA	30
Figure II-3	Schéma de principe de deux MADA en cascade	31
Figure II-4	**:** Schéma de principe de deux machines asynchrones reliées mécaniquement et électriquement par le rotor.	31
Figure II-5	**:** Schéma d'un system utilisant une MADA en moteur alimenté par deux convertisseurs	3 3

Figure II-6	Schéma d'un système utilisant une MADA en moteur alimenté par un seul convertisseur	33
Figure II-7	Schéma de l'alimentation de la MADA pour une application génératrice	34
Figure II-8	Machine asynchrone à double bobinage	35
Figure II-9	Variation de la vitesse par réglage de la résistance du rotor	36
Figure II-10	Structure de kramer	36
Figure II-11	Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI	37
Figure II-12	Structure de scherbius avec cycloconvertisseur	37
Figure II-13	Structure avec convertisseur matriciel	38
Figure II-14	Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone	39
Figure II-15	Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone	39
Figure II-16	Fonctionnement en mode générateur hypersynchrone	40
Figure II-17	Fonctionnement en mode générateur hypersynchrone	40
Figure II-18	Représentation schématique du modèle d'une MADA	41
Figure II-19	Représentation de la MADA dans le repère de Park	44
Figure II-20	Schéma du convertisseur statique	48
Figure II-21	Schéma du redresseur triphasé à diodes	49
Figure II-22	Représentation d'un filtre	50
Figure II-23	Onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC	51
Figure II-24	Principe de la commande MLI	53
Figure II-25	Réponses du système avec V_r= 0 V, f_r = 50 Hz, C_r=0 N.m	53
Figure II-26	Réponses du système avec V_r= 0 V, f_r = 50 Hz, C_r=55 N.m	54
Figure II-27	Réponses du système avec Vr= 12 V, fr = 5 Hz, C_r=27 N.m	54
Figure II-28	Réponses du système avec Vr = 12 V, fr = 15 Hz ,C_r=27N.m	55
Figure II-29	Réponses du système avec Vr= 30 V, fr= 5 Hz ,cr=27N.m	55

chapitre III

Figure III-1	Principe de la commande vectorielle	59
Figure III-2	Schéma bloc de la MADA	64
Figure III-3	Schéma bloc de la commande indirecte	65
Figure III-4	Schéma bloc de la commande directe des puissance	66
Figure III-5	Puissance active et réactive du stator	67

Figure III-6	Le courant rotorique selon l'axe d et q	67
Figure III-7	Puissance active et réactive du rotor	68
Figure III-8	Le flux statorique selon l'axe d et q	68
Figure III-9	Tensions et courants rotoriques	68
Figure III-10	Couple électromagnétique	69
Figure III-11	Schéma-bloc de la stratégie MPPT sans mesure de la vitesse du vent	71
Figure III-12	Vitesse du vent V(m/s) et coefficient de puissance Cp	72
Figure III-13	Puissance active et réactive du stator	72
Figure III-14	Puissance active et réactive du rotor	72
Figure I-15	Tensions et courants rotoriques	73
Figure I-16	Vitesse de rotation de la génératrice et glissement	73
Figure III-17	Puissance active statorique (Teste de robustesse avec variation de 50% la résistance rotorique)	74
Figure III-18	Puissance réactive statorique (Teste de robustesse avec variation de 50% la résistance rotorique	75
Figure III-19	Puissance active statorique (Teste de robustesse avec variation Ls ,Lr et M à la fois.)	75
Figure III-20	Puissance réactive statorique (Teste de robustesse avec variation Ls ,Lr et M à la fois.)	76

chapitre IV

Figure IV-1	Schéma d'un réseau de neurones biologiques	78
Figure IV-2	Schéma d'un neurone formel	79
Figure IV-3	Schéma bloc global de commande de la MADA par les réseaux de neurones	84
Figure IV-4	Réglage de la MADA par RRN	85
Figure IV-5	Réglage de la MADA par RLF	85
Figure IV-7	Réglage de la MADA par RRN	86
Figure IV-8	Réglage de la MADA par RLF	86
Figure IV-8	Courant rotorique selon l'axe d et q	87
Figure IV-9	Puissance active et réactive du rotor	88
Figure IV-10	Le flux statorique selon l'axe d et q	89
Figure IV-11	Le couple électromagnétique	90
Figure IV-12	Principe du Neuro-flou	91

Figure IV-13 Principe de fonctionnement du neuro-flou hybride 93
Figure IV-14 Le système neuro-flou de Mamdani 93
Figure IV-15 Le réseau de neuro-flou de takagi-sugeno 95
Figure IV-16 Schéma bloc global de la commande neuro-floue de la MADA 97
Figure IV-17 Réglage de la MADA par RNF 98
Figure IV-18 Réglage de la MADA par RRN 98
Figure IV-19 Réglage de la MADA par RNF 99
Figure IV-20 Réglage de la MADA par RRN 99
Figure IV-21 Courant rotorique selon l'axe d et q 100
Figure IV-22 Puissance active et réactive du rotor 101
Figure IV-23 Le flux statorique selon l'axe d et q 102
Figure IV-24 Le couple électromagnétique 10 3

Listes des tableaux

tableau I-1 classification des turbines éoliennes 09
tableau IV-1 Comparaison entre la logique floue et les réseaux de neurones 92
tableau IV-2 Les avantages des systèmes neuro-flous 96
tableau IV-3 résume les performances de MADA commandée par RRN , RNF 103

V_{vent} : Vitesse du vent

P_{vent} : Puissance du vent

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.

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

C_P : Coefficient de puissance

λ : La vitesse relative de l'éolienne.

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

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

K : Multiplicateur mécanique

β : Angle de calage

i : Angle d'incidence.

V_{rot} :Composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur.

V_{res} :Vecteur du vent résultant.

F_{res} : Force produite par L'action du vent sur la pale.

F_{ax} : Force représentant la poussée axiale.

F_{rot} : Force produisant le déplacement de la pale.

Γ_T : Couple de la turbine

$C_T(\lambda)$: coefficient de couple

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

sa , sb , sc : Phases du enroulement statorique.

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

f_r : Coefficient de frottements visqueux.

Ω : Vitesse de rotation de la machine

J : Moment d'inertie de la machine.

p : Nombre de paire de pôles.

P : Operateur de LAPLAS.

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.

P_S : Puissance active transitant par le stator.

P_r : Puissance active transitant par le rotor.

Q_S : Puissance réactive transitant par le stator.

Q_r : Puissance réactive transitant par le rotor

R : Règle d'inférence.

w_j : Point où la fonction de type réduit atteint le maximum.

e :L'erreur

Δe : Variation de l'erreur.

J_x : Appartenance primaire de x.

Psids : flux statorique selon l'axe d

Psiqs : Le flux statorique selon l'axe q

ABREVIATIONS

MADA : Machine asynchrone à double alimentation.

MLI : Modulation de largeurs d'impulsions

MAS : Machine Asynchrone

MPPT : poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale

MCC : machine a courant contenue

RRN : régulateur réseau de neurone

RNF : régulateur neuro-flou

TS : takage-sugeno

MFS : système flou-mamdani

SIF : système d'inférence flou

التحكم في الماكنة اللامتزامنة مضاعفة التغذية بواسطة تقنيات الذكاء الصناعي

ملخّص:

تتعرض الاطروحة المقدمة لدراسة التحكم في الماكنة الامتزامنة مضاعفة التغذية بواسطة تقنيات الذكاء الصناعي بعدما قدمنا نبذة حول الماكنة الامتزامنة مضاعفة التغذية و طرق استعمالها سواء كمحرك او كمولد للطاقة ا قمنا بإيجاد الصيغة الرياضية للماكنة و ذلك لتسهيل تطبيق التحكم الشعاعي الذي يرتكز أساسا على ضابط تناسبي وتكاملي بمبدأ كلاسيكي .وبعد استعمال هذا الأخير لا حضنا عدم كفاءته في المجال الديناميكي المؤقت و كذا في حال تغيرات في الماكنة. ولذلك لجانا الى استخدام طرق أخرى تعتمد على تقنيات الذكاء الصناعي ونذكر منها المنطق الغامض. الشبكات العصبية الاصطناعية. والشبكات العصبية –الغامضة هذه التقنيات الأخيرة جلبت تحسنات كبيرة ومعتبرة في التحكم في هذه الماكنة وقد عرضنا النتائج المفصلة لكل تقنية لمقارنتها بباقي التقنيات الأخرى.

كلمات مفتاحية: ماكنة لامتزامنة ذات تغذية مزدوجة, التحكم الشعاعي, المنطق الغامض, الشبكات العصبية الاصطناعية الشبكات العصبية-الغامضة

Commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation par des Techniques de l'Intelligence Artificielles

Résumé :

Cette thèse présente la commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) par des Techniques de l'Intelligence Artificielles. Après avoir présenté l'état de l'art des ensembles *MADA*– Convertisseurs et leurs applications, nous avons abordé la commande vectorielle de la *MADA* par orientation du flux statorique. Nous nous sommes intéressés au régulateur PI pour les courants rotoriques et à l'impact de son remplacement par d'autres régulateurs basés sur les techniques de l'intelligence artificielle tels que les, logique floue, neuronaux et le neuro-flous, les quelles surpassent les limites des techniques classiques et possèdent des caractéristiques essentielles pour l'amélioration des performances de la commande proposée. Les résultats de simulations par Matlab/simulink et des tests de robustesse seront présentés.

Mots Clés : Machine asynchrone à double alimentation (*MADA*), Commande vectorielle logique floue, Réseaux de neurones artificiels, Réseaux neuro-flous.

Intelligent Artificial Control of a Doubly Fed Asynchronous Machine

Abstract :

In this thesis, an intelligent artificial control of a doubly fed asynchronous machine (*DFAM)* is proposed. First, a mathematical model of *DFAM* written in an appropriate d-q reference frame is established to investigate simulations results. In order to control the rotor currents of *DFAM*, a torque tracking control law is synthesized using PI controllers, the stator side power factor is controlled at unity level. Then, an intelligent artificial control such as, artificial neural network and neuro-fuzzy control are applied. Its simulated performances are then compared to those of a classical PI controller. Specifically neuro-fuzzy systems are created to overcome the disadvantages of neural networks and fuzzy systems. Results obtained in Matlab/Simulink environment show that the neuro-fuzzy control is more robust, has superior dynamic performance and hence found to be a suitable replacement of the conventional PI controller for the high performance drive applications.

Keywords: Doubly fed asynchronous machine (*DFAM*), Field oriented control, Fuzzy control, Neural network control, Neuro-fuzzy control.

Introduction générale

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, [1]. 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. Mais si elle est connectée directement au réseau, ce dernier impose la fréquence et dans ce cas la vitesse d'entraînement doit être constante, [2]. De plus, si on utilise un convertisseur à son stator, on trouve que la plage de variation de vitesse est plus limitée.

Si on utilise un alternateur classique (machine synchrone triphasée) entraîné à vitesse variable, dans ce cas le système est composé d'un convertisseur statique de fréquence placé entre le stator et le réseau et qui permet de transformer la fréquence variable de l'alternateur. Il faut ajouter un compensateur synchrone afin de fournir la puissance réactive consommée par le convertisseur statique, ce qui augmente le coût du système, [3-5]. Tout ceci explique pourquoi on recherche à remplacer ce système.

L'étude, que nous présentons, consiste à utiliser une machine asynchrone à double alimentation (Doubly-fed Asynchrounos 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-dir que la fréquence du réseau reste constante lors de la variation de la vitesse mécanique. Aussi la puissance traitée par le convertisseur associé au rotor ne dépasse pas 30% de toute la puissance du système, [6-10]. Cela permet de réduire les pertes et le coût de la production.

Afin d'obtenir avec la machine asynchrone à double alimentation des performances semblables à celle de la MCC, il est nécessaire d'appliquer la commande vectorielle par orientation du flux afin d'assurer le contrôle du flux et celui du courant générant le couple électromagnétique.

La commande vectorielle basée sur les régulateurs classiques (réglage à action proportionnelle, intégrale et dérivée), ne permet pas dans tous les cas de maîtriser les régimes

transitoires, et en général, les variations paramétriques de la machine. Cependant, il existe des commandes modernes qui s'adaptent mieux avec ces exigences et qui sont moins sensibles et robustes.

L'intelligence artificielle apparut en 1950, est une branche de l'informatique qui traite la reproduction par la machine de certains aspects de l'intelligence humaine tels qu'apprendre à partir d'une expérience passée à reconnaître des formes complexes et à effectuer des déductions, [11].

Les résultats les plus aboutis de l'intelligence artificielle concernent la résolution de problèmes complexes dans un domaine délimité de compétences.

En revanche, l'Intelligence Artificielle (IA) tel que la logique floue, réseaux de neurones et neuro-flou offre des outils totalement découplés de la structure du système, ne nécessitant pas la modélisation préalable de ce dernier et permettant un suivi en temps réel de son évolution. Par ailleurs, le raisonnement en ligne fait que l'approche de l'Intelligence Artificielle est plus robuste à des changements de modes opératoires, comme pour les systèmes ayant plusieurs configurations ou étant obligés de changer régulièrement de configuration. Cette approche s'avère par conséquent évolutive, [12].

La logique floue a été introduite pour approcher le raisonnement humain à l'aide d'une représentation adéquate des connaissances. Son intérêt réside dans sa capacité à traiter l'imprécis, l'incertain et le vague. Elle est issue de la capacité de l'homme à décider et agir de façon pertinente malgré le flou des connaissances disponibles, [13-14]. Cependant, un système flou est difficile à appréhender. Sa commande et son réglage peuvent être relativement long. Il s'agit parfois beaucoup plus de tâtonnement que d'une réelle réflexion. Il manquait donc à la logique floue un moyen d'apprentissage performant pour régler un système flou, c'est les réseaux de neurones.

Les réseaux de neurones peuvent fournir une solution intéressante pour des problématiques de contrôle des systèmes non linéaires. En effet, leur utilisation ne nécessite pas l'existence d'une modélisation formelle de ces systèmes. Par ailleurs, leurs capacités de mémorisation, d'apprentissage, d'adaptation et le parallélisme du calcul représentent des fonctions très utiles à tout système complexe, [15-16].

Les réseaux neuro-flous sont nés de l'association des réseaux de neurones avec la logique floue, de manière à tirer profits des avantages de chacune de ces deux techniques. La principale propriété des réseaux neuro-flous est leur capacité à traiter dans un même outil des connaissances numériques et symboliques d'un système. Ils permettent donc d'exploiter les

capacités d'apprentissage des réseaux de neurones d'une part et les capacités de raisonnement de la logique floue d'autre part, [17-19]. Différentes combinaisons de ces deux techniques d'intelligence artificielle existent et mettent en avant des propriétés différentes.

Le contenu de ce mémoire est structuré en quatre chapitres.

Un état de l'art de l'énergie éolienne sera présenté dans le premier chapitre de ce mémoire. Dans ce cadre, la technologie éolienne est alors abordée. Les méthodes de description du gisement éolien sont données, ce qui est un des facteurs du choix de la configuration de la chaîne éolienne. A la fin de ce chapitre, nous avons donné un modèle de la partie mécanique de la chaîne de conversion utilisée (vent et turbine éolienne).

La partie électrique de la chaîne de conversion étudiée est consacrée à la machine asynchrone à double alimentation et les convertisseurs d'électronique de puissance qui sont le sujet du deuxième chapitre. On présentera des généralités sur la MADA, ses applications, ses différents modes de fonctionnement suivis par un état de l'art sur la conversion électromécanique à travers les différents types de génératrices utilisées et les convertisseurs qui leur sont associés. Ensuite, on présentera la modélisation de la MADA, sa mise en équations permettra de simuler son modèle. On terminera cette partie par la modélisation de l'alimentation de la machine

Le troisième chapitre sera consacré à la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation qui est entraînée par la turbine éolienne.

Le quatrième chapitre est consacré au contrôle neuronal. Après avoir présenté l'approche neuronale et les réseaux de neurones, ainsi que leurs propriétés, on étudie, en profondeur, l'algorithme de rétro-propagation du gradient avec ses propriétés et ses limites d'utilisation. Ensuite, nous présentons les résultats de simulation et les tests de robustesse.

Et Après développements concernant l'utilisation des systèmes neuro-flous pour le réglage des courants rotoriques de la *MADA*. Ce travail permet l'exploitation des capacités d'apprentissage des réseaux de neurones d'une part et les capacités de raisonnement de la logique floue d'autre part. Les résultats de simulation obtenus et leurs discussions sont ainsi présentés.

Finalement, on terminera ce mémoire par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et expose quelques perspectives de recherche futures.

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES EOLIENNES

CHAPITRE 2

MODÉLISATION ET FONCTIONNEMENT DE LA MADA

CHAPITRE 3

COMMANDE VECTORIELLE

DE LA MADA

CHAPITRE 4

COMMANDE PAR RÉSEAUX DE NEURONE ET NEURO-FLOU DE LA MADA

I.1 Introduction

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

I.2 Historique

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 [4]. La génération d'énergie électrique par le vent a débuté à la fin du 19^{eme} 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.

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. Les systèmes les plus récents se dirigent d'une part vers la vitesse variable pour maximiser la puissance captée du vent avec 1'insertion d'électronique entre la génératrice et le

réseau, et d'autre part vers l'utilisation de génératrices spéciales tournant à basse vitesse afin de s'affranchir du réducteur de vitesse [5].

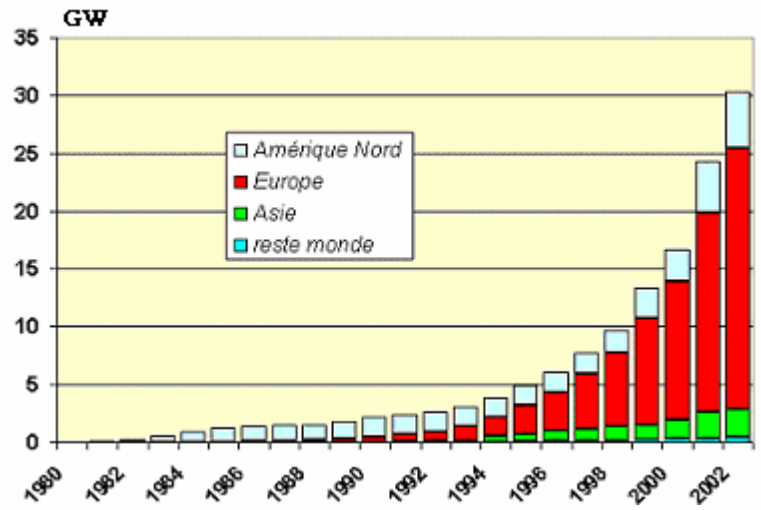


Fig. I-1 : La génération d'électricité éolienne

· **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 (moteur, 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

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 [3].

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.

Dans l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. En Europe, principalement sous l'impulsion Allemande, Scandinave et Espagnole, on comptait en 2000 environ 15 GW de puissance installée. Ce chiffre a presque doublé en 2003, soit environ 27 GW pour 40 GW de puissance éolienne installée dans le monde.

Parmi les avantages de la production éolienne, le coût de fonctionnement est relativement faible [3].

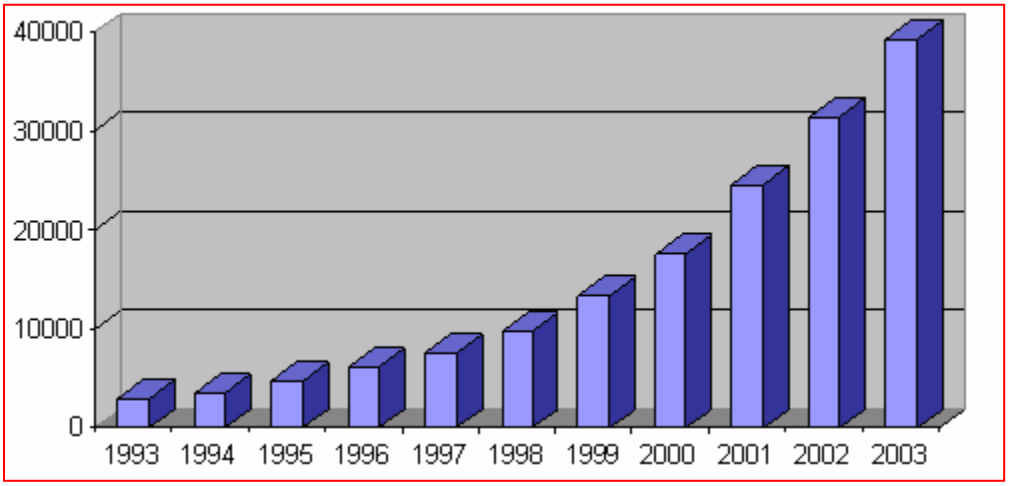


Fig. I-2 : Puissance éolienne cumulée dans le monde en MW.

I.3 Principes et éléments constitutifs de l'éolien

Une éolienne est une machine qui transforme l'énergie cinétique du vent (déplacement d'une masse d'air) en énergie mécanique ou électrique [5]. Les éoliennes sont conçues de manière à produire un maximum de puissance pour des vents de forces moyennes fréquemment rencontrées. Elles atteignent leur puissance nominale pour une vitesse de vent de 50 km/h (14 m/s). Si le vent devient plus violent, la machine subit des contraintes plus importantes. Elle est alors freinée grâce à un système de régulation électronique qui lui permet de rester à la puissance maximale (atteinte dès 50 km/h) tout en limitant les efforts sur la structure. Au delà d'un certain seuil (90 km/h, soit 25 m/s), la régulation ne suffit plus. La machine est alors stoppée afin de lui éviter de subir des charges trop importantes [6].

I.3.1 Descriptif d'une éolienne

Une éolienne permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. L'hélice d'une éolienne entre en rotation par la force du vent et permet ainsi la production d'énergie mécanique ou électrique [9].

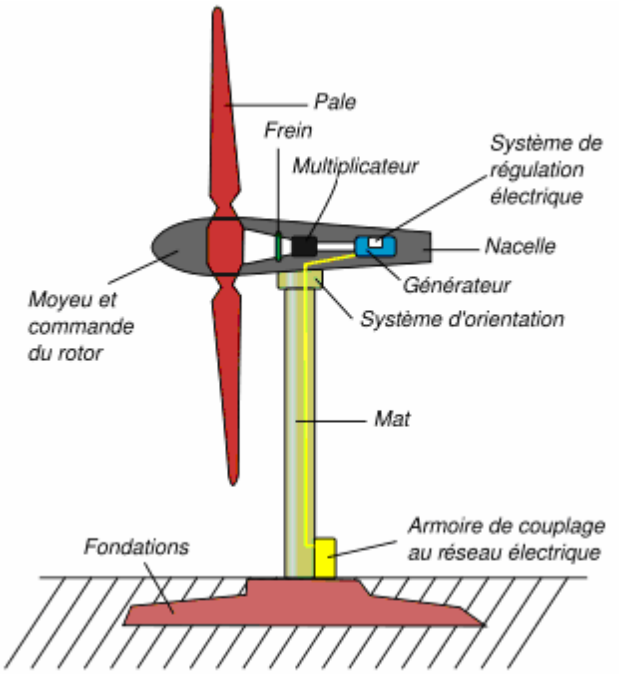


Fig I-3 : Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur

Pour convertir l'énergie éolienne en énergie électrique le générateur va utiliser le phénomène d'induction. En effet ce dernier est composé de deux parties, une partie mobile le rotor et une partie fixe, le stator, permettant de créer un champ magnétique et de générer un courant électrique. L'éolienne est également équipée d'une girouette permettant l'orientation des pales en fonction de la direction du vent.

L'éolienne doit être adaptée au site et à ses besoins, Il faut vérifier le vent, on considère qu'un site est exploitable lorsque l'on dispose d'une vitesse minimale de vent de 4m/s, à une hauteur du sol de 10m. La donnée 'vent' est essentielle à l'installation d'une éolienne, cependant le coût d'une étude précise, à l'aide d'un anémomètre peut se révéler élevé. L'observation du site (la présence de moulins, d'éoliennes altitude, vents dominants, végétation…) et l'intuition peuvent se révéler de bons indicateurs du potentiel éolien dans un premier temps. Ce potentiel conditionnera le choix d'une machine de puissance nominale adaptée. Un autre critère important reste l'évaluation de ses besoins en électricité au regard de ces consommations

journalières et annuelles. Cette étape permettra également de réfléchir plus largement à maîtriser ses consommations électriques.

Pratiquement, c'est beaucoup plus complexe : les éoliennes doivent résister à des tempêtes aussi violentes que celles que nous connaissons en Bretagne. Les principaux avantages de l'énergie éolienne sont l'autonomie en électricité, la possibilité de produire de jour comme de nuit et un impact environnemental réduit par des précautions simples vis à vis de la population et du paysage. L'énergie produite peut être soit stockée dans des batteries, soit injectée aux normes dans le réseau. Cette dernière solution étant économiquement et techniquement beaucoup plus pertinente [7].

I.3.2 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 :

Le mât, généralement en métal, supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle + rotor). Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne. Le mât des éoliennes atteint aujourd'hui 80m de haut pour les plus puissantes (exceptionnellement jusqu'à 100 m). Les éoliennes sont-elles si haut perchées c'est parce que le vent souffle plus fort à quelques dizaines de mètres de hauteur, où il n'est pas perturbé par l'effet des obstacles : relief, arbres, maisons…Et la puissance fournie par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent [8].



Fig. I- 4 : Tour d'une turbine.

La tour doit être suffisamment solide pour supporter non seulement la nacelle et le rotor, mais aussi les charges puissantes provoquées par le vent : d'une part la puissance exercée par le vent irectement sur la tour, d'autre part la puissance transmise par le rotor [8].

Un rotor, composé de plusieurs pales (en général 3) et du nez de l'éolienne. Les pales sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes : polyester renforcé de fibre de verre et/ou fibre de carbone. Leur longueur atteinte actuellement entre 30 et 55 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 110 mètres. La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales (un cercle), donc au carré de son diamètre rotor [8].



Fig. I.5: Rotor d'une turbine

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 $\boldsymbol{r}$ est le rayon du disque circulaire, $\boldsymbol{d}$ 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 [8].

· **Une nacelle,** montée au sommet du mât, abrite les composants mécaniques, pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine [8]. Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne.

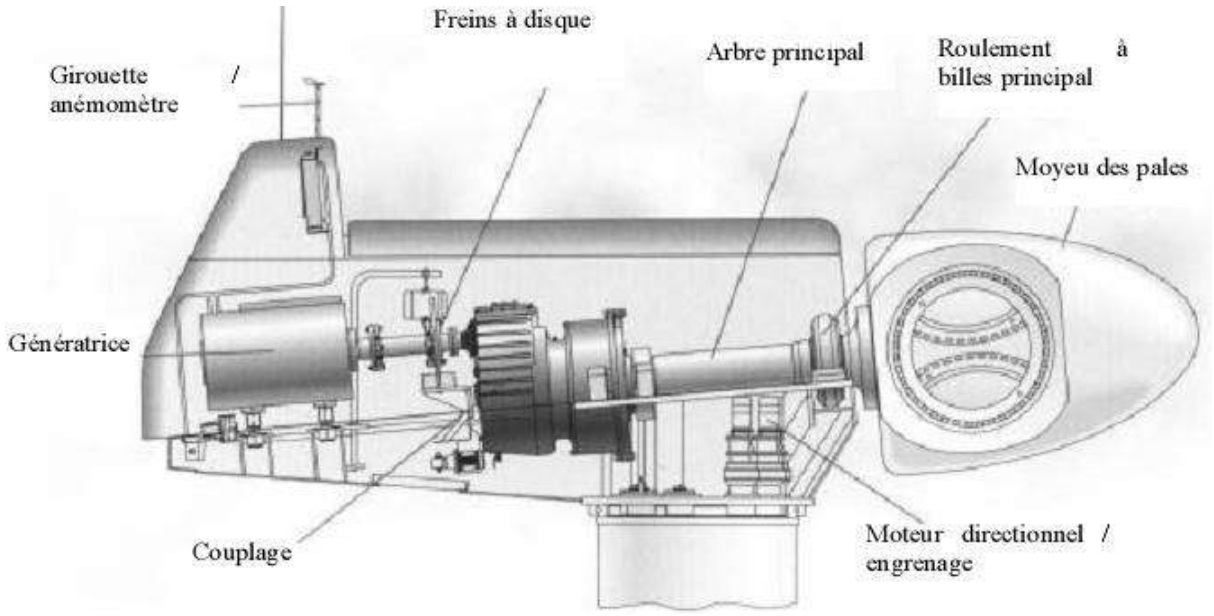


Fig. I.6 : Constitution d'une nacelle

Les différents composants d'une nacelle [9] :

- Le multiplicateur de vitesse : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.

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

- 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.

Divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile.

Grâce à un système de supervision et de contrôle une éolienne peut être arrêtée automatiquement et très rapidement en cas de nécessité. La sécurité du fonctionnement des éoliennes est ainsi assurée en continu. Dans le cas des éoliennes produisant de l'électricité, un poste de livraison situé à proximité du parc éolien permet de relier ce parc au réseau électrique pour y injecter l'intégralité de l'énergie produite [9].

I.3.3 le Principe de fonctionnement d'une éolienne

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un alternateur qui produit l'électricité. La vitesse de rotation du rotor (de 12 à 15 tours/minute) doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tours/minute, vitesse nécessaire au bon fonctionnement de l'alternateur. Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée (50 Hz en Europe), tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent. La tension de l'électricité produite par l'alternateur, de l'ordre de 600 à 1000 volts, est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mât, jusqu'à un niveau de 20 ou 30 KV. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public. La tension de l'électricité produite par la centrale peut alors être de nouveau transformée, en fonction du niveau de tension de raccordement de la centrale au réseau public.

Pour pouvoir démarrer, une éolienne on a besoin d'une vitesse de vent minimale, de l'ordre de 10 à 15 km/h. Et au-delà de 90 km/h, les turbines s'arrêtent de tourner. Tout d'abord, la fréquence d'occurrence des vents d'une vitesse supérieure à 90 km/h est généralement faible (inférieure à 1 %), et si les éoliennes fonctionnaient dans ces conditions, elles subiraient des efforts importants qui entraîneraient une usure prématurée de leurs équipements. Compte tenu du faible gain relatif sur la production que représente un fonctionnement par vent fort, les

ingénieurs préfèrent, dans ces conditions, stopper les machines et attendre le retour de vents plus modérés et plus réguliers. Si les éoliennes ne fonctionnent pas au-delà d'une vitesse de vent de 90 km/h, leurs fondations n'en sont pas moins conçues pour résister à des vents beaucoup plus importants… La puissance d'une éolienne classique est de 1 à 1,5 MW, mais les éoliennes de la nouvelle génération atteignent 2 à 3 MW et des modèles de 5 MW sont d'ores et déjà testés par les constructeurs [7].

I.4 Les différents types d'éoliennes.

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. Le tableau I-1 présente une classification des turbines éoliennes.

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 [10].

Les raisons pour choisir une grande éolienne pour choisir une grande éolienne il ya plusieure raisons

1. Le principe des économies d'échelle vaut évidemment également pour les éoliennes. Ainsi, une grande éolienne produit normalement de l'électricité à un moindre coût qu'une petite. La raison pour cela est que les coûts de fondations, de construction, de raccordement au réseau et d'autres composants de l'éolienne (le système contrôle commande, p.ex.) sont plus ou moins les mêmes, quelque soit la taille de l'éolienne.
2. Les grandes éoliennes sont particulièrement appropriées à l'installation en mer. Le coût des fondations n'augmente pas proportionnellement avec la taille de l'éolienne, et les coûts d'entretien sont dans une large mesure indépendants de la taille.
3. Dans les zones où il est difficile de trouver des sites pour plus qu'une seule éolienne, une grande éolienne avec une tour haute tire mieux partie de la ressource éolienne qu'une petite.

Les raisons pour choisir une éolienne plus petite

1. Il arrive que le réseau électrique local soit trop faible pour supporter la production électrique d'une grande éolienne. C'est souvent le cas dans les parties les plus extérieures du réseau où la densité de la population et les besoins en électricité est très basse.
2. La production d'électricité est moins fluctuante dans un parc éolien composé de plusieurs petites éoliennes, étant donné que les variations du vent sont aléatoires, ayant donc tendance à s'annuler. Et en plus, comme déjà mentionné, le choix d'éoliennes plutôt petites peut se révéler avantageux dans un réseau électrique faible.
3. Les coûts liés à l'usage de très grandes grues et à la construction de chemins suffisamment robustes pour supporter le transport des composants de l'éolienne constituent un autre facteur qui, dans certains endroits, rend plus économique le choix de petites éoliennes.
4. Avec plusieurs éoliennes d'une moindre puissance, on assure la répartition du risque en cas de défaillance temporaire d'une éolienne (p.ex. par suite d'une foudre).

Des considérations esthétiques du paysage peuvent parfois dicter le choix d'éoliennes plus petites. Cependant, il faut savoir, que la vitesse de rotation d'un grand rotor est en général beaucoup moins rapide que celles d'un petit, ce qui a pour résultat qu'une seule grande éolienne attire souvent moins l'attention que plusieurs petites.

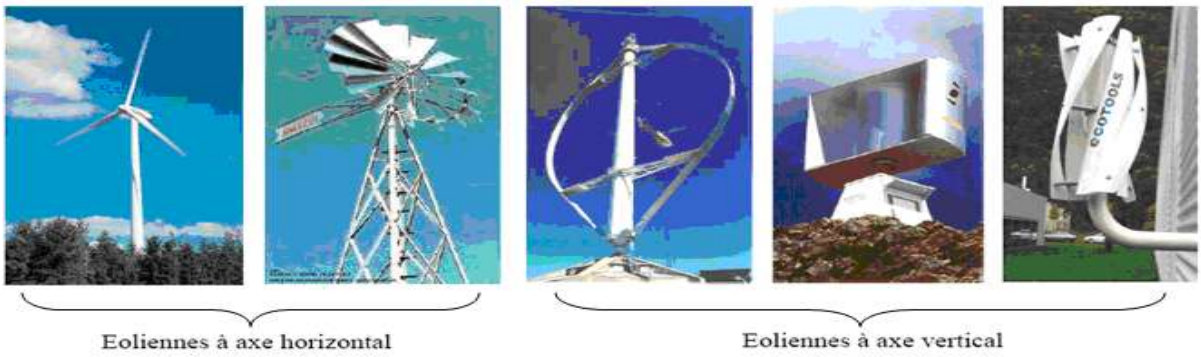


Fig. I.7 : Différents types d'éoliennes.

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal :

I.4.1 Eoliennes a axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles et il s'agit d'une turbine à axe vertical de forme cylindrique qui peut facilement être installée sur le toit d'une maison moderne et dont les avantages sont : faible impact visuel, pratiquement pas de bruit et très grande tolérance aux vents forts [11]. Il existe des systèmes grâce auxquels les ailes se décalent plus ou moins pour augmenter l'étendue des vitesses d'action. Si la vitesse du vent est basse, les ailes sont complètement déployées, si la vitesse est trop forte, les ailes sont complètement fermées et l'éolienne forme un cylindre.

Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées. Selon [9] Les avantages théoriques d'une machine à axe vertical sont les suivantes :

- Elle vous permet de placer la génératrice, le multiplicateur, etc. à terre, et vous n'avez pas besoin de munir la machine d'une tour.
- Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent.

Les inconvénients principaux sont les suivants :

- L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical n'est pas impressionnante.
- L'éolienne ne démarre pas automatiquement. Cependant, ceci ne constitue qu'un inconvénient mineur dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau, étant donné qu'il est alors possible d'utiliser la génératrice comme un moteur absorbant du courant du réseau pour démarrer l'éolienne).

Les éoliennes à axe vertical ont été prometteuses dans les années 80 et au début des années 90, mais leur faible rendement aérodynamique ainsi que les fluctuations élevées de la puissance électrique générée les ont écartées du marché [12].

I.4.2 Eoliennes a axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien.

Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multicritères. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal [11].
Aujourd'hui, pratiquement les seules éoliennes commerciales sont à axe horizontales. Les plus grandes éoliennes mesurent jusqu'à 180m en bout de pale avec un moyeu à 120m pour une puissance de 6 MW.

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 [13], et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement [4].
- Bien que ne pouvoir envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO_2, etc. … [9].

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuit, et inépuisable [14].
- Chaque mégawatheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO_2 rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique [9].
- Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance [2].
- 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 [12].
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique [12].
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace [Site 1].
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales [Site 1].

- La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles [15].
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [16], selon l'article [17] le coût de l'éolienne à diminuer presque 90% depuis le début des années 80. Le coût de l'énergie éolienne continue de diminuer grâce aux percées technologiques, à l'accroissement du niveau de production et à l'utilisation de grandes turbines [15].
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà [12].
- L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple [Site 1].

I.5.2 Les inconvénients

Mêmes s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- L'impact visuel : Ça reste néanmoins un thème subjectif [12]. Des images de synthèse sont élaborées pour montrer l'impact visuel. Dans la plus grande majorité des cas, les enquêtes réalisées montrent une réelle acceptation des populations voisines ou visitant un site éolien [9].
- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques ont été réduits par l'utilisation de nouveaux profils [12], extrémités de pale, mécanismes de transmission etc. et ne sont plus une gêne, même proche des machines (50-60 dB équivalent à une conversation). Une distance d'environ huit fois le diamètre permet de ne plus distinguer aucun bruit lié à cette activité (< 40 dB). De plus, il faut souligner que le bruit naturel du vent, pour des vitesses supérieures à 8 m/s, a tendance à masquer le bruit rayonné par l'éolienne [9].
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. Plus le parc éolien est dense plus ce risque est grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger. Cependant, aucune étude sérieuse ne semble actuellement avoir démontré la réalité du danger pour les oiseaux [Site 1].
- La source d'énergie éolienne étant stochastique [16], la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suit, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien [Site 2]. Selon l'article de [2], il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes silencieuses, esthétiques et résistantes aux conditions météorologiques très capricieuses.

I.6 Conversion de l'énergie éolienne

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

I.6.1 Loi de BETZ

La théorie du moteur éolien à axe horizontal a été établie par BETZ. Il suppose que « le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse V_1 et à l'infini aval d'une vitesse V_2 » [19].

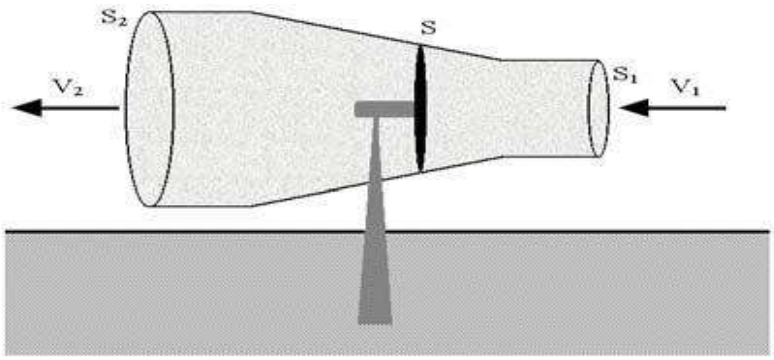


Fig. I.8 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne.

Considérant le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure (I-6) 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 [20]:

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

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

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

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 $\frac{V_1}{V_2} = \frac{16}{27}$ qui égale à 0,59 (Fig I.9). Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie

expérimentalement par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

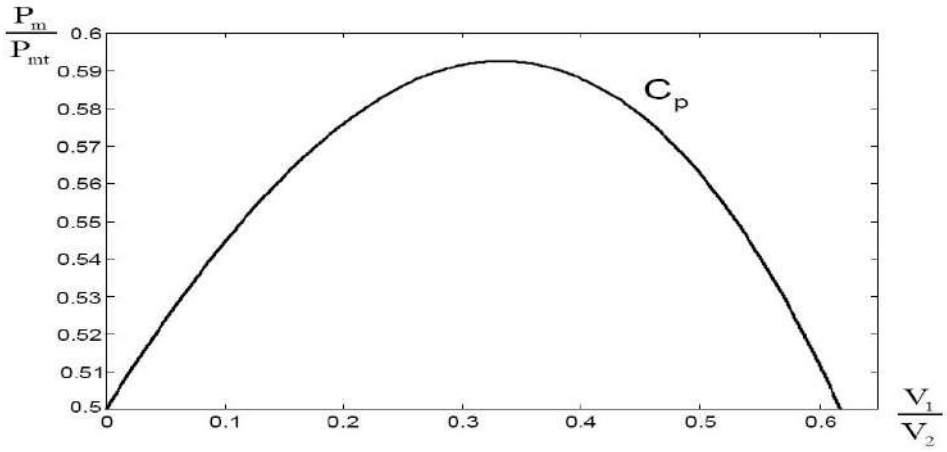


Fig. I.9 : Coefficient de puissance.

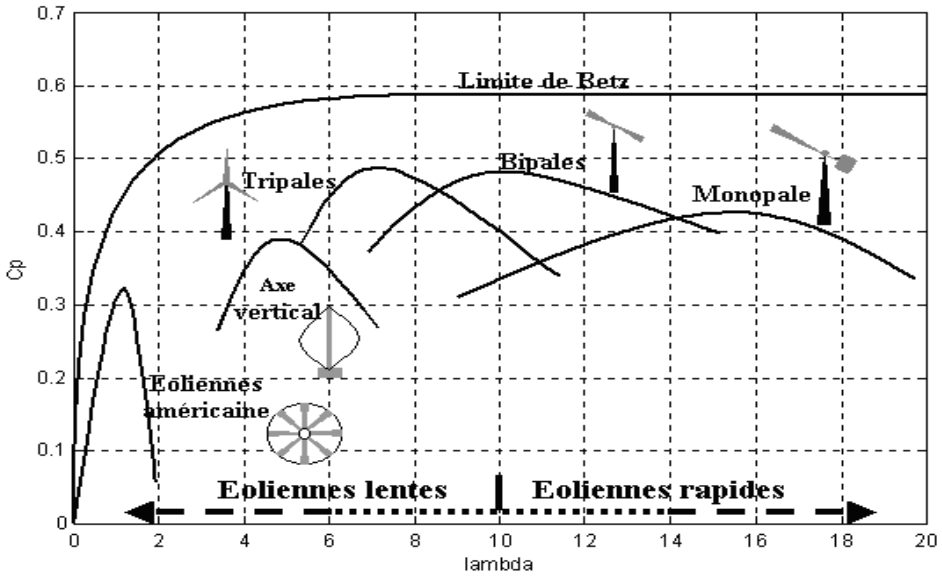


Fig. I.10 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8m. Leur coefficient de puissance (Figure I.10) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique.

Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 45m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts [20]. Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance (Fig I.10) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente.

I.6.2 Production d'énergie mécanique

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

$$P_{aero} = \left(\frac{P_{aero}}{P_{mt}}\right).P_{mt} = C_P(\lambda).P_{mt} = \frac{1}{2}C_P(\lambda).\rho.\pi.R^2V_1^3 \qquad (I.11)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine}.R}{V_1} = \frac{\Omega_{mec}.R}{K.V_1} \qquad (I.12)$$

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

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

R : rayon de l'aérogénérateur. Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse K.

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

I.7 Système de régulation

I.7.1 Bilan des forces sur la pale

La figure (I.11) représente la section d'une pale d'aérogénérateur**.** La vitesse du vent arrivant face à cette pale est représentée par le vecteur *V*, le vecteur V_{rot} représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée V_{res}.

L'action du vent sur la pale produit une force F_{res} qui se décompose en une poussée axiale F_{ax} directement compensée par la résistance mécanique du mât et une poussée F_{rot} en direction de la rotation qui produit effectivement le déplacement.

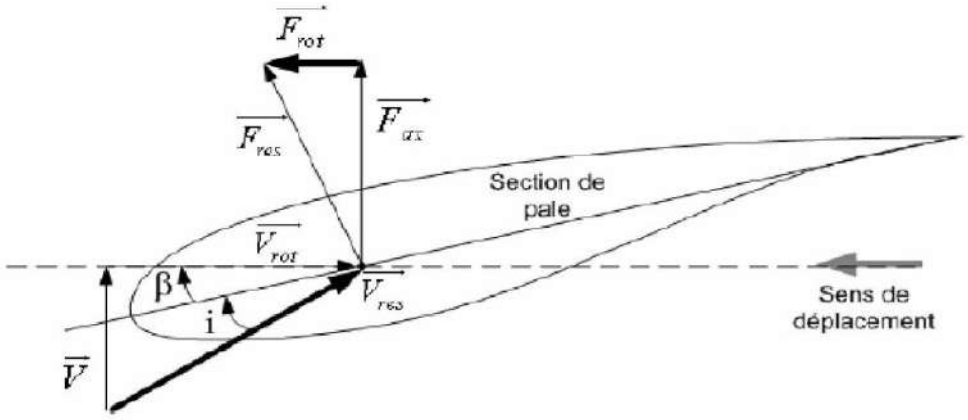


Fig. I.11 : Bilan des forces sur une section de pale.

Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse du vent nominale donnée. Lorsque la vitesse du vent devient trop élevée, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale. Il est à noter que β et *i* sont respectivement l'angle de calage et l'angle d'incidence.

I.7.2 Moyens de réglage de la conversion de l'énergie

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

I.7.2.1 Système à décrochage aérodynamique « stall »

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

une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation [18].

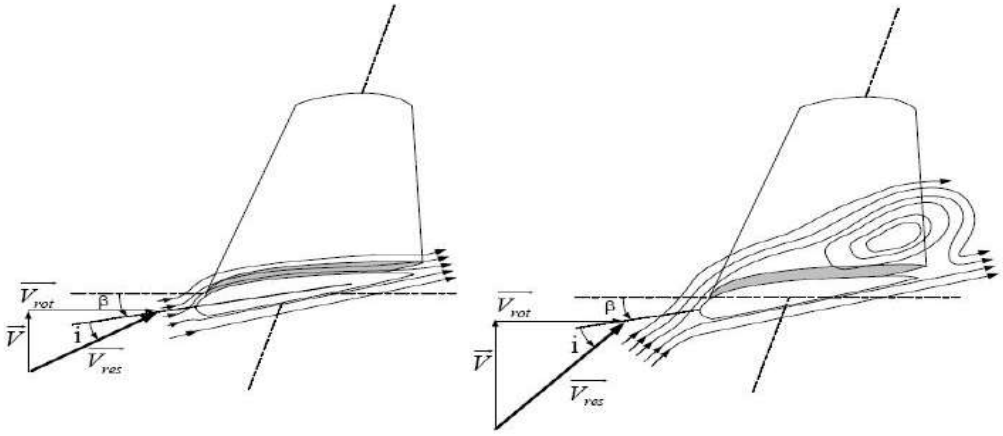


Fig. I.12 : Flux d'air sur un profil de pale " stall "

I.7.2.2 Système d'orientation des pales « Pitch »

Le système de réglage aérodynamique se base sur le principe de l'augmentation de l'angle de calage (Figure I.13) ce qui diminue la valeur du facteur de puissance (Figure I.14) d'où une diminution du rendement de la turbine, ceci empêche l'augmentation de la vitesse de rotation de l'aérogénérateur.

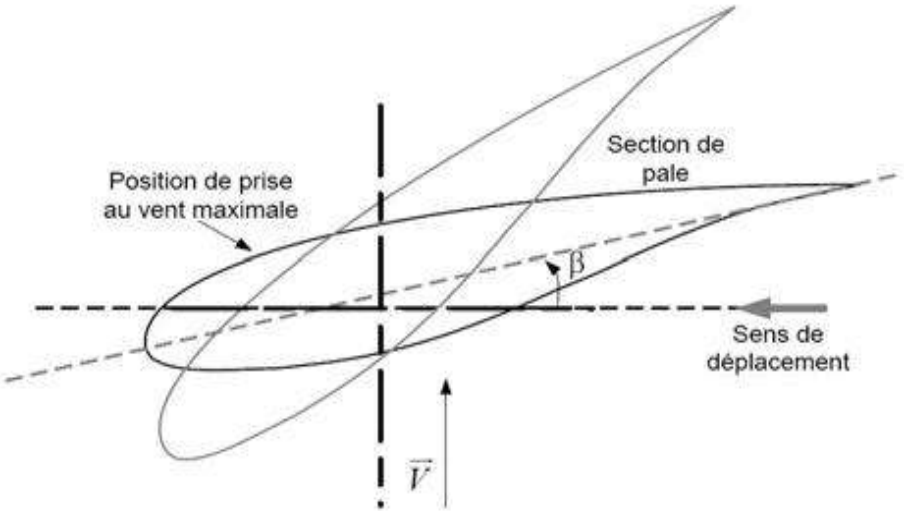


Fig. I.13 : Variation de l'angle de calage d'une pale.

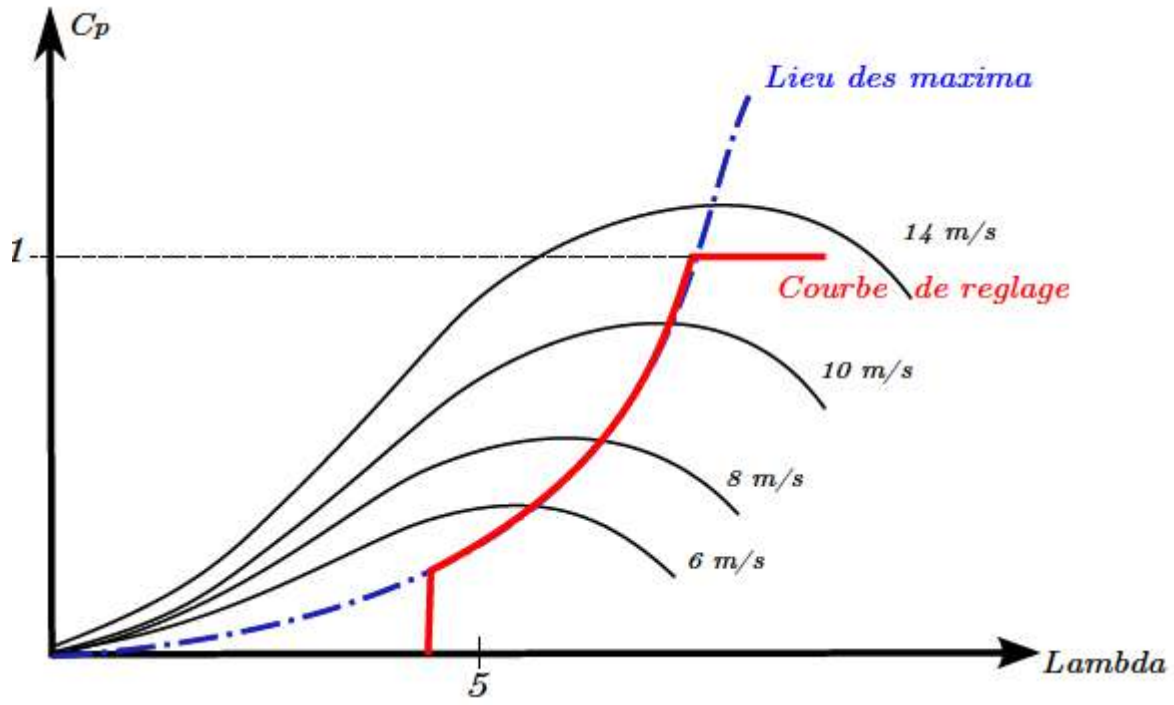


Fig. I.14 : Influence de l'angle de calage sur le coefficient de puissance.[21]

I.8 Intérêt de la vitesse variable

Les premières éoliennes à avoir été adoptées, dans les années 90, fonctionnaient à vitesse fixe. Malgré la simplicité, la robustesse et le faible coût de réalisation, ce type de fonctionnement présentaient quelques inconvénients tels que la consommation en énergie réactive non contrôlée et le control limité de la qualité de puissance. Mais depuis quelques années, les éoliennes fonctionnant à vitesse variable sont devenues le type prédominant parmi les installations éoliennes actuelles. Les éoliennes à vitesse variables sont conçues de sorte à extraire un maximum de puissance dans une large gamme de vitesse de vent.

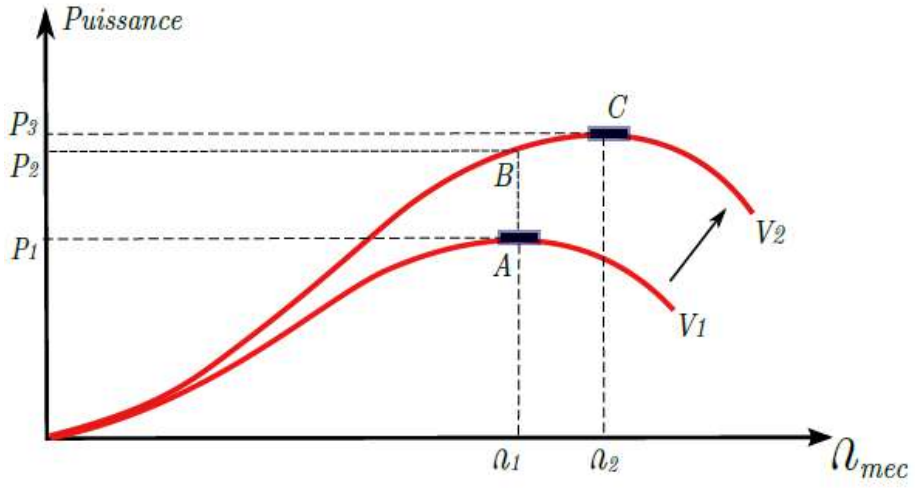


Fig. I.15 : Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et de la vitesse du vent[21].

D'après la fig (I.15), on peut voir que, pour une vitesse du vent V_1, et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1, on obtient une puissance maximale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de V_1 à V_2, et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (vitesse fixe), une puissance P_2 est transmise (point B) alors que la puissance maximale se trouve ailleurs sur la caractéristique (point C). Si on désire extraire une puissance maximale, il est nécessaire d'augmenter la vitesse de la génératrice à une vitesse Ω_2 . Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent. Grâce au caractère variable de la vitesse, on peut de façon continuelle extraire un maximum de puissance, accroitre l'énergie captée et donc, améliorer le rendement énergétique.

I.9 Modélisation de la turbine éolienne

Le système éolien a pour but de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Ce système, dans notre cas, est constitué mécaniquement de quatre organes :

- Trois pales orientables possédant des coefficients propres d'inertie, d'élasticité et de frottement par rapport à l'air et par rapport au support de la turbine ;
- Un arbre d'entraînement des pales avec sa propre inertie, sa propre élasticité et son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur ;
- Un multiplicateur de vitesse, de gain G ;

- Un rotor de génératrice possédant une inertie J_e et un coefficient de frottement f_e.

I.9.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans le cadre d'étude électromécanique sont relativement simples et obéissent aux hypothèses simplificatrices suivantes :

- Les pales sont considérées à conception identique avec les mêmes paramètres d'inertie, d'élasticité et de frottement ;
- Les coefficients des frottements des pales par rapport à l'air et par rapport au support sont très faibles et peuvent être ignorés ;
- La vitesse du vent est supposée à répartition uniforme sur toutes les pales, ce qui permet de considérer l'ensemble des pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de tous les systèmes mécaniques.

On obtient alors un modèle mécanique simple (voir figure I.16) [21].

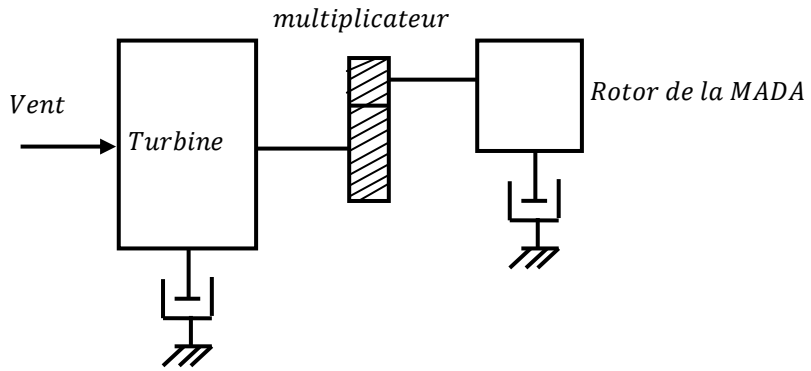


Fig. I.16 : Modèle mécanique simplifié de la turbine.

I.9.2 Modélisation de la vitesse du vent

Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, évolue au cube de la vitesse du vent. La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Néanmoins, la direction du vecteur de vitesse du vent considéré dans ce modèle se limite à la dimension horizontale. Le modèle comportemental de vent peut donc être simplifié considérablement. La

vitesse du vent V est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps.

$$V = f(t) \tag{I. 13}$$

Cette fonction du vent, peut être décomposée en une composante moyenne, variant lentement, et des fluctuations [12] :

$$V(t) = V_0 + \sum_{i=1}^{n} A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \tag{I. 14}$$

Tel que :

V_0 est la composante moyenne ;

A_i, ω_i et φ_i sont respectivement l'amplitude, la pulsation et la phase initiale de chaque composante spectrale fluctuantes.

La fig (I.17) présente deux profils de vent différents, l'un reflétant la stochastiquité que l'on peut trouver sur un site éolien et l'autre c'est un profil filtré et adapté à notre système éolien étudié qui a une dynamique lente.

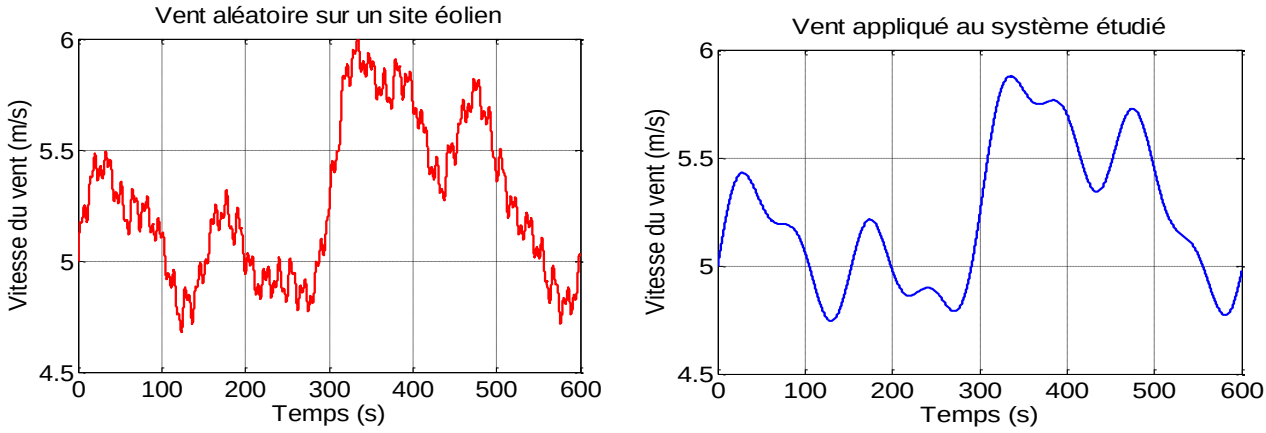


Fig. I. 17 : Différents profils de vent.

I.9.3 Modélisation de la turbine

Précédemment, on a vu que la puissance éolienne du vent est exprimée par la relation (I.8) comme suit :

$$P_v = \frac{1}{2}\rho S V^3$$

Et la puissance aérodynamique au niveau du rotor de la turbine s'écrit sous la forme suivante :

$$P_t = C_p P_v = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta)\rho S V^3$$

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 [21].

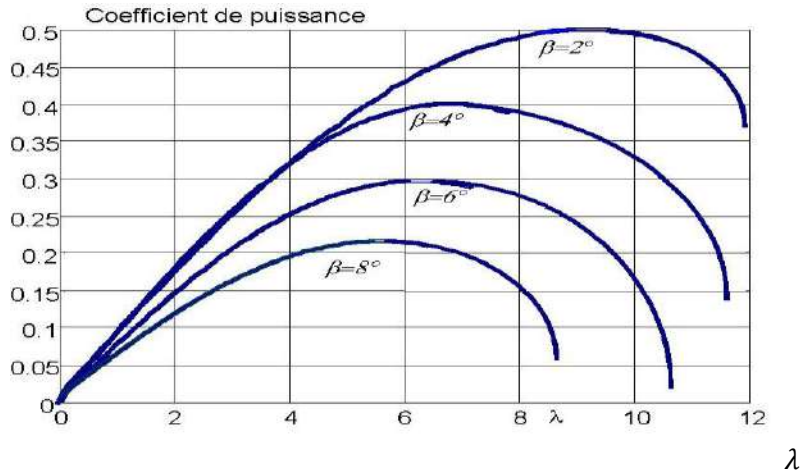


Fig. I.18 : Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine (λ) pour une éolienne de 1.5 MW [21].

A partir des relevés réalisés sur cette éolienne de 1.5 MW, l'expression du coefficient de puissance est interpolée sous la forme suivante [12] :

$$C_p(\lambda, \beta) = \big(0.5 - 0.00167(\beta - 2)\big) \sin\left[\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)}\right] - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \qquad (I.15)$$

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par :

$$C_{aer} = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2\Omega_t} C_p \rho S V^3 \quad \text{(I. 16)}$$

On peut également définir un autre coefficient dit de couple C_t qui dépend de la vitesse du vent et de la vitesse spécifique de la turbine :

$$C_t = \frac{C_p}{\lambda} = C_p \frac{V}{R\Omega_t} \quad \text{(I. 17)}$$

On écrit donc :

$$C_{aer} = \frac{1}{2} C_t \rho S R V^2 \quad \text{(I. 18)}$$

I.9.4 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur de gain G permet d'adapter les grandeurs mécaniques (vitesses et couples) de la turbine et la génératrice qui s'expriment selon les relations mathématiques suivantes :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_e}{G} \quad \text{(I. 19)}$$

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad \text{(I. 20)}$$

Où C_g est l'effet du couple de la turbine sur l'arbre de la génératrice.

I.9.5 Equation dynamique de l'arbre de la génératrice

En ramenant les paramètres mécaniques de la turbine à l'arbre de la génératrice, on obtient le modèle définit par la relation suivante :

$$J \frac{d\Omega_e}{dt} + f\Omega_e = C_g - C_{em} \quad \text{(I. 21)}$$

Avec :

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_e \quad \text{(I. 22)}$$

$$f = \frac{f_t}{G^2} + f_e \quad \text{(I. 23)}$$

Où :

J_t, f_t, J_e, f_e,J et f : sont respectivement l'inertie et le coefficient de frottement de la turbine, de la génératrice et ceux ramenés sur l'arbre de la génératrice.

Basée sur les équations présentées précédemment, la figure (I.19) peut définir un modèle physique de la turbine ayant comme entrées l'angle de calage des pales, la vitesse du vent et le couple électromagnétique fourni par la génératrice.

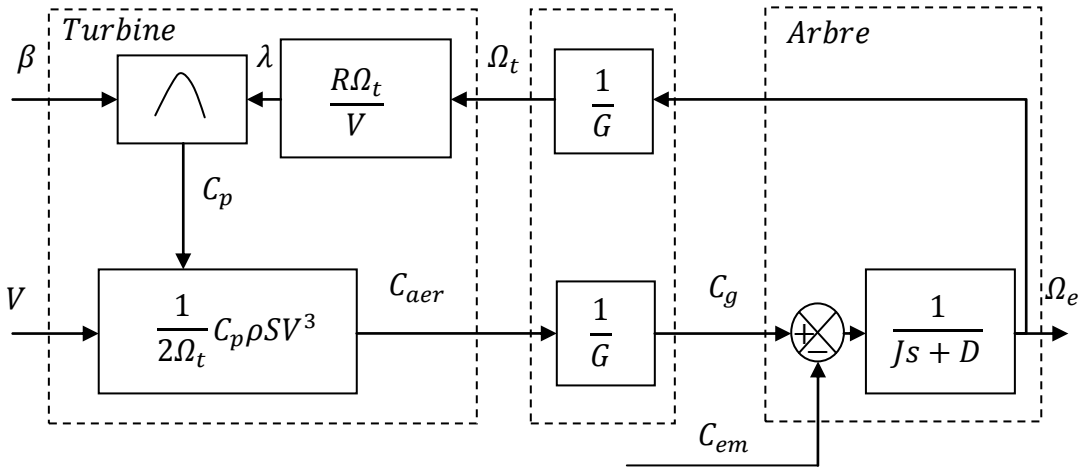


Fig. I.19 : Schéma bloc du modèle de la turbine.

I.10 .Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une vue d'ensemble des différentes turbines éoliennes 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),** nous avons décrit de façon explicite les différents éléments constitutifs de la turbine ainsi que le mode de régulation de la vitesse de rotation (pitch, stall).

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 asynchrones à double alimentation.

II.1.Introduction

L'objectif 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. On présentera aussi sa 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.

II.2.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].

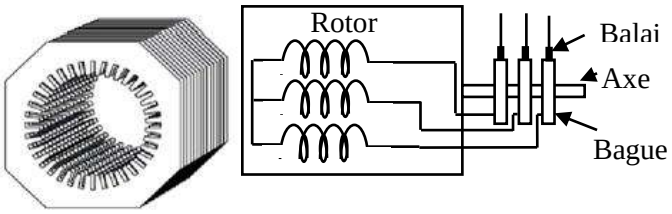


Fig.II.1 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

II.3 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 vitesse w_r, alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur *fmms* des enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitesse w_{gl} telle que :

$$w_{gl} = w_s - w_r = w_s \,.\, g \qquad \text{(II.1)}$$

Où : g est le glissement et w_{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 :

$$f_{\mathrm{r}} = g.f_s \tag{II.2}$$

II.4. 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.

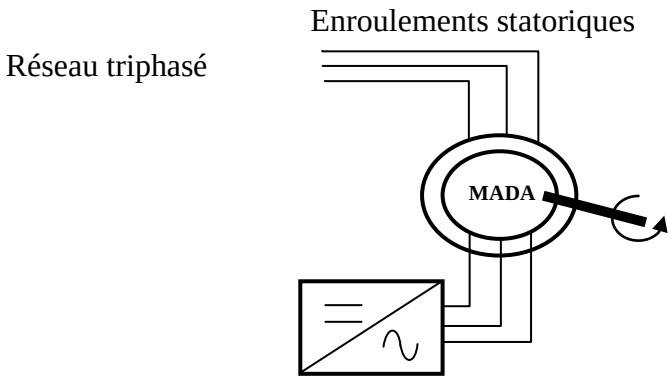


Fig.II.2 : Schéma de principe d'une simple MADA

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.

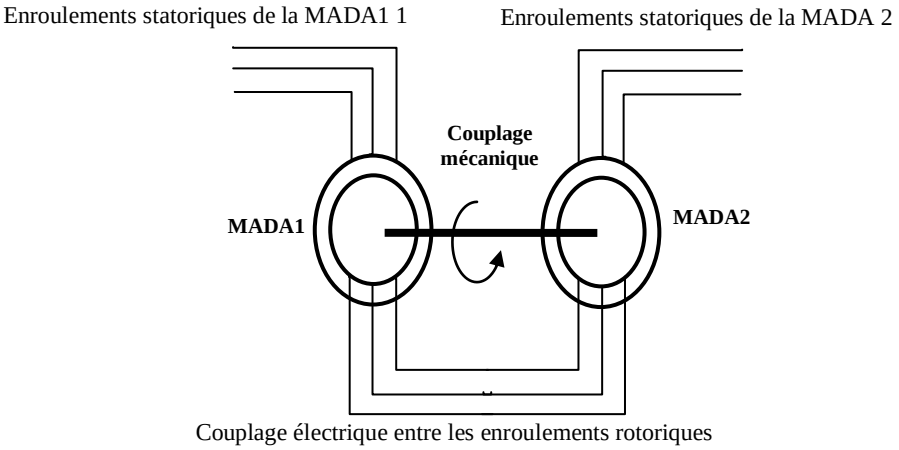


Fig.II.3 : Schéma de principe de deux MADA en cascade

c- 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 CascadedDoubly Fed Induction Machine).

d- MADA sans balai, machine très proche de la précédente sauf que cette fois ci, les deux enroulements statoriques appartiennent à un circuit magnétique commun. Le rotor est commun et à cage d'écureuil. (BrushlessDoubly Fed Machine). Nous présentons sur la figure (II.4) un schéma de principe de ce type de machine.

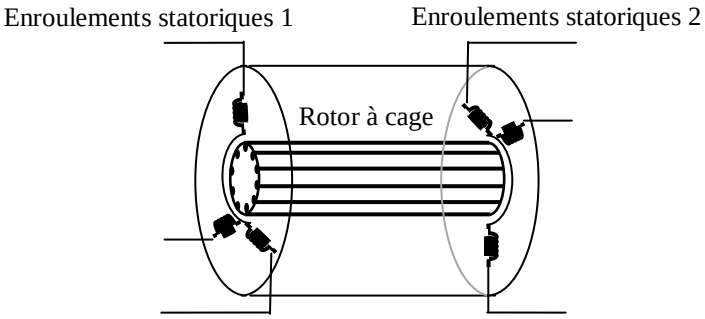


Fig.II.4: Schéma de principe de deux machines asynchrones reliées mécaniquement et électriquement par le rotor.

e- MADA à réluctance, machine utilisant le principe d'un rotor de moteur à réluctance variable. Elle est nommée « Doubly Fed Reluctance Machine».

f- MADA "tandem" (Tandem Induction Machine), machine possédant un rotor à cage et deux enroulements statoriques. Un stator est fixe tandis que l'autre peut être tournant.

II.5 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 [15].

II.5.1 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% [16].

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.

II.5.1.1 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.5.
- Deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun.

- Deux cyclo-convertisseurs.

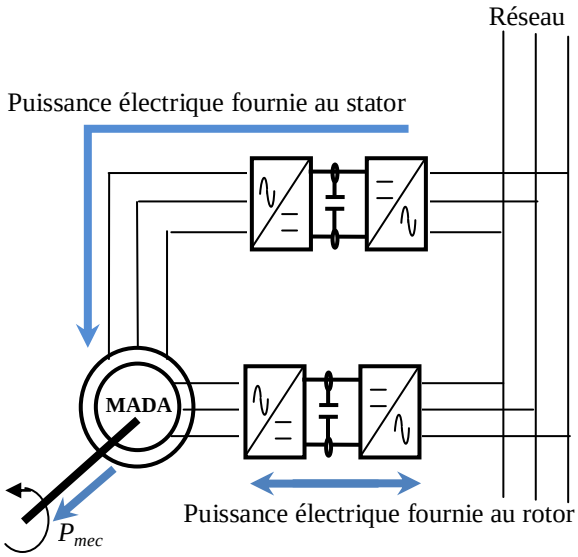


Fig.II.5: Schéma de la MADA alimenté par deux convertisseurs

II.5.1.2 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 [18].

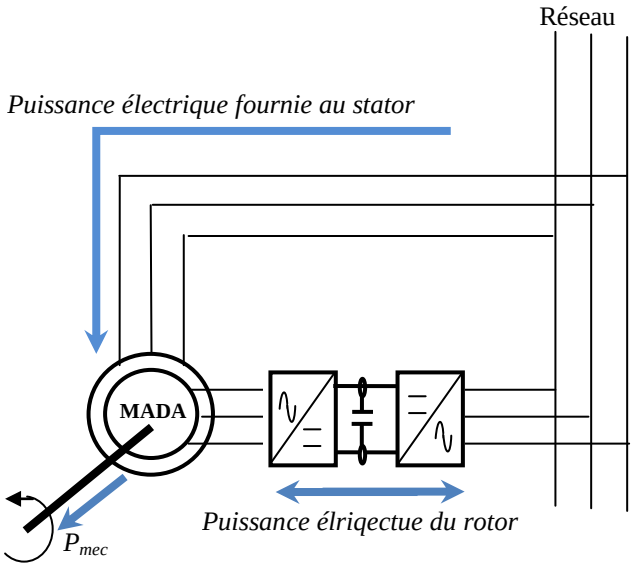


Fig.II.6 : Schéma de la MADA alimenté par un seul convertisseur

II.5.2 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 [18].

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 [15].

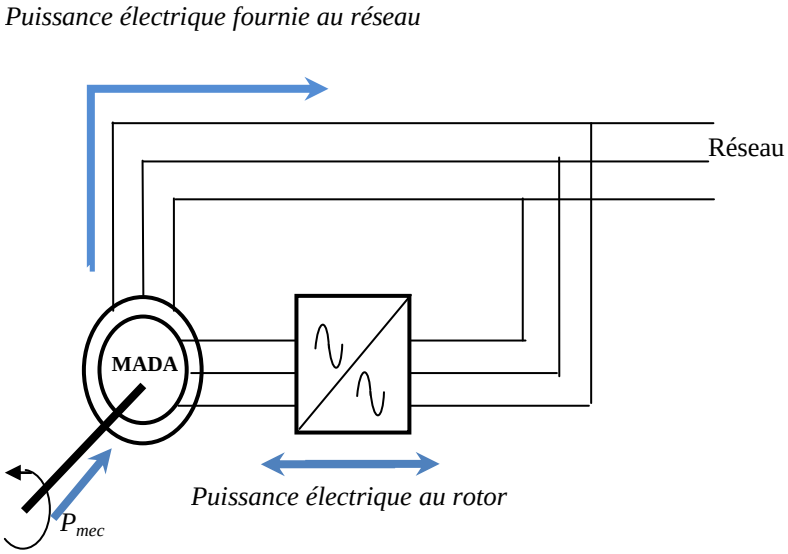


Fig.II.7 : Schéma de l'alimentation de la MADA pour une application génératrice

II.6 Différentes structures d'alimentation de la MADA dans les systèmes éoliens

II.6.1 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 [09]. Ce système n'a pas été exploité industriellement mais existe à l'état de prototype

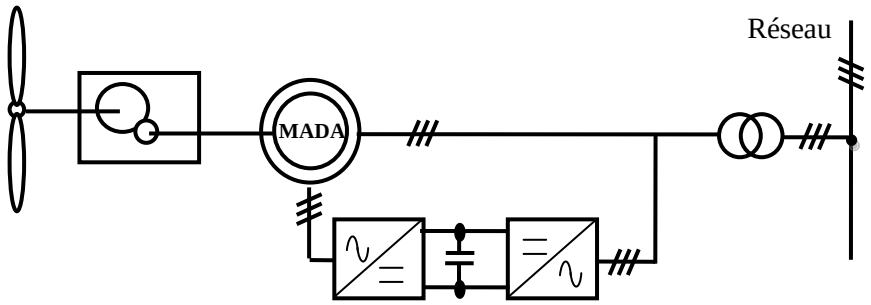


Fig. II.8 : Machine asynchrone à double bobinage

II.6.2 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.9) [19].

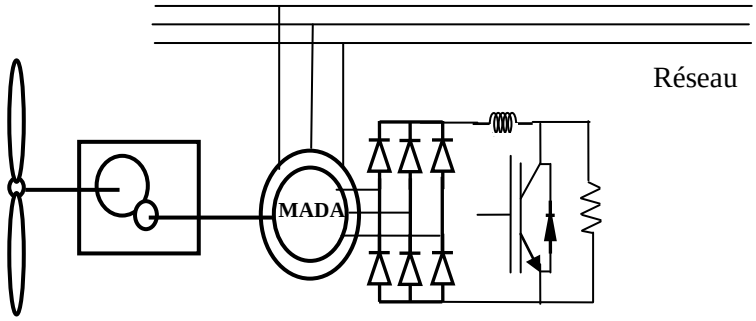


Fig.II.9 : Variation de la vitesse par réglage de la résistance du rotor

II.6.3 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 [21].

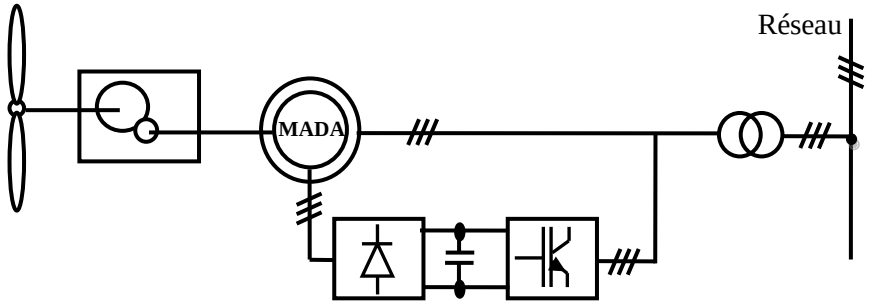


Fig.II.10 : Structure de Kramer

II.6.4 Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Le stator de la génératrice est directement couplé au réseau et transfère la plus grande partie de la puissance alors que le rotor de moindre puissance permet de faire varier les courants rotoriques d'excitation de la MADA figure (II.11). C'est sur ce bobinage de moindre puissance que le convertisseur de puissance, composé d'un ensemble à deux convertisseurs à IGBT commandés en MLI, en cascade, est inséré afin de contrôler le flux et la vitesse de rotation de la génératrice asynchrone du côté de la machine et contrôler aussi des puissances actives et réactives transitées du côté du réseau [22].

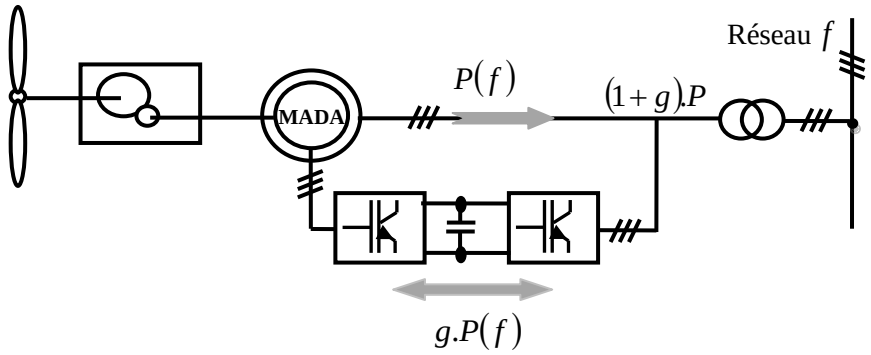


Fig.II.11: Structure de **Scherbius** avec convertisseurs MLI

II.6.5 Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur onduleur peut être remplacée par un cyclo-convertisseur figure (II.12), l'ensemble est alors appelé structure de Scherbius. Comme le flux de la puissance est bidirectionnel, il est possible d'augmenter ou de diminuer l'énergie de glissement et ainsi faire fonctionner la machine en génératrice ou en moteur. Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif. Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cycloconvertisseur par une structure à deux convertisseurs à **IGBT** commandés en **MLI** [22].

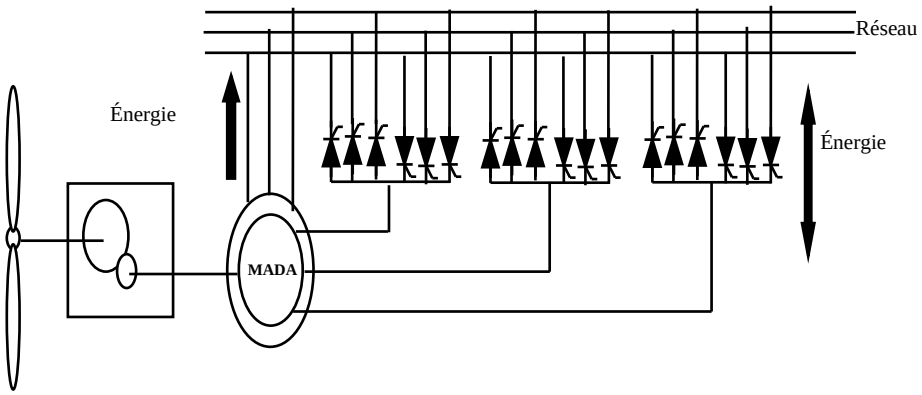


Fig.II.12: Structure de **scherbius** avec cyclo-convertisseur

II.6.6 Convertisseur Matriciel

Le convertisseur matriciel est une nouvelle génération de convertisseurs directs AC /AC, qui est constitué par des interrupteurs de puissance bidirectionnels ultra rapides. Généralement il a une topologie d'une source de tension. L'apparition des IGBTs et des contrôleurs puissants DSP permettent de mettre en évidence le convertisseur matriciel et d'exploiter les hautes performances apportées par celui-ci par rapport aux convertisseurs de puissances traditionnels. La tension à la sortie de celui-ci est formée par des sections de tensions d'entrée à 1'aide de techniques de commande MLI intelligentes. A 1'entrée du convertisseur matriciel, on place un filtre *LC* pour le filtrage des harmoniques.

La réalisation pratique du convertisseur matriciel exige des interrupteurs bidirectionnels capables de bloquer la tension et le courant dans les deux directions, mais jusqu'à nos jour ce genre d'interrupteurs ne sont pas disponibles ce qui mène à réaliser ces derniers par la combinaison d'interrupteurs comme les **IGBTs**, **MCTs,IGCTs** et **MOSFETs** avec les diodes (figure II.13) [22].

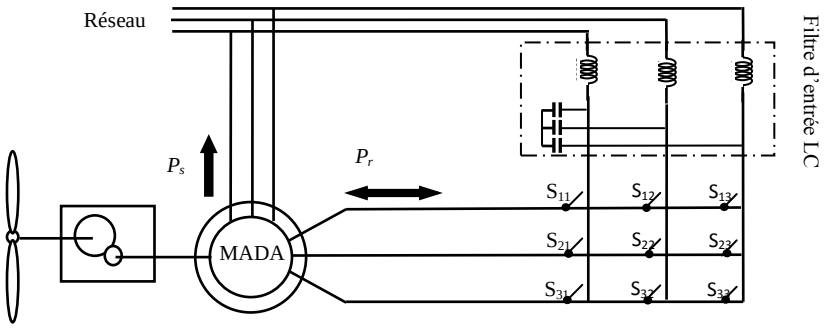


Fig.II.13: Structure avec convertisseur matriciel

II.7 Mode de fonctionnement de la MADA

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence réside dans le fait que la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. Effectivement, une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et en dessus pour être en générateur. Ici, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de

fonctionner en hyper ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement [23] :

II.7.1 Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone

La figure (II.14) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjecter au réseau. On a donc un fonctionnement moteur au-dessous de la vitesse de synchronisme. Ce régime est généralement connu comme mode de récupération de l'énergie de glissement. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes joule dans le rotor.

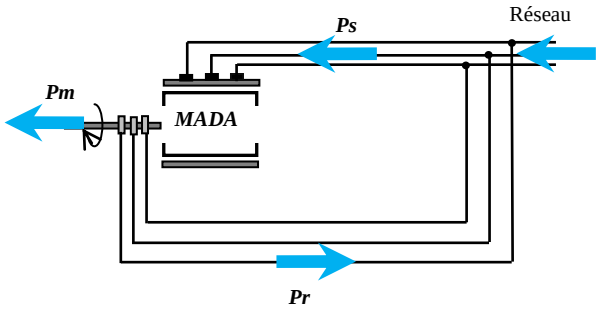


Fig.II.14 : Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone

II.7.2 Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone

La figure (II.15) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator, la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor, on a donc un fonctionnement moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

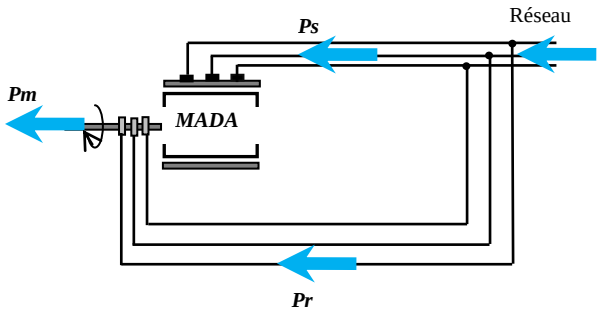


Fig.II.15 : Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone

II.7.3 Fonctionnement en mode générateur hyposynchrone

La figure (II.16) montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

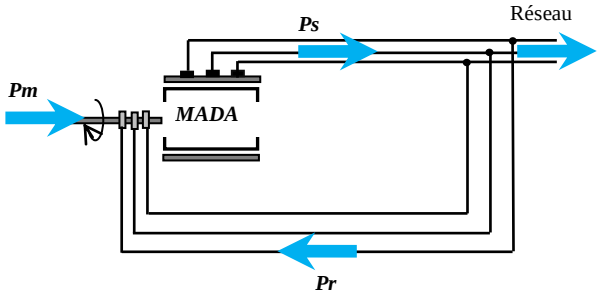


Fig.II.16 : Fonctionnement en mode générateur hyposynchrone

II.7.4 Fonctionnement en mode générateur hypersynchrone

La figure (II.17) montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée comme des pertes joule dans le rotor.

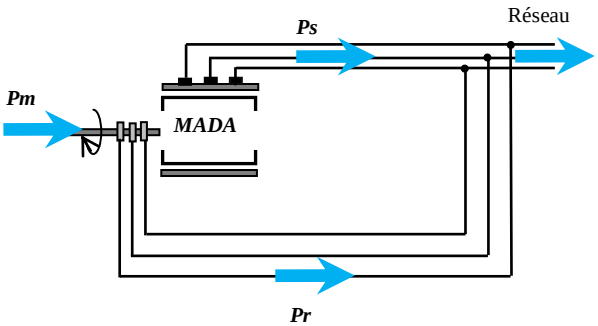


Fig.II.17 : Fonctionnement en mode générateur hypersynchrone

II.8 Modélisation de la machine à double alimentation

La machine asynchrone est représentée sur la figure (II.18) 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*).

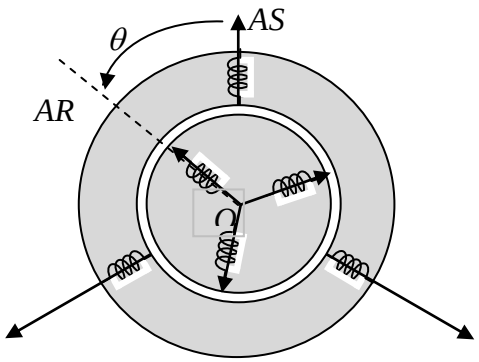


Fig.II.18 : Représentation schématique du modèle d'une MADA

II.8.1 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 :

- 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.8.2 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 :

$$\begin{cases} [V_S] = [R_S].[I_S] + \dfrac{d}{dt}[\phi_S] \\ [V_r] = [R_r].[I_r] + \dfrac{d}{dt}[\Phi_r] \end{cases} \quad \text{(II.3)}$$

Avec :

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

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

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 : $\begin{cases} [R_s] = R_s.[I]_{3\times3} \\ [R_r] = R_r.[I]_{3\times3} \end{cases}$ (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 [25] :

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

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 :

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

Où :

$$\Omega_r = \frac{\omega_r}{n_p} \tag{II.15}$$

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.8.3 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.8.3.1 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 [23]. 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.19).

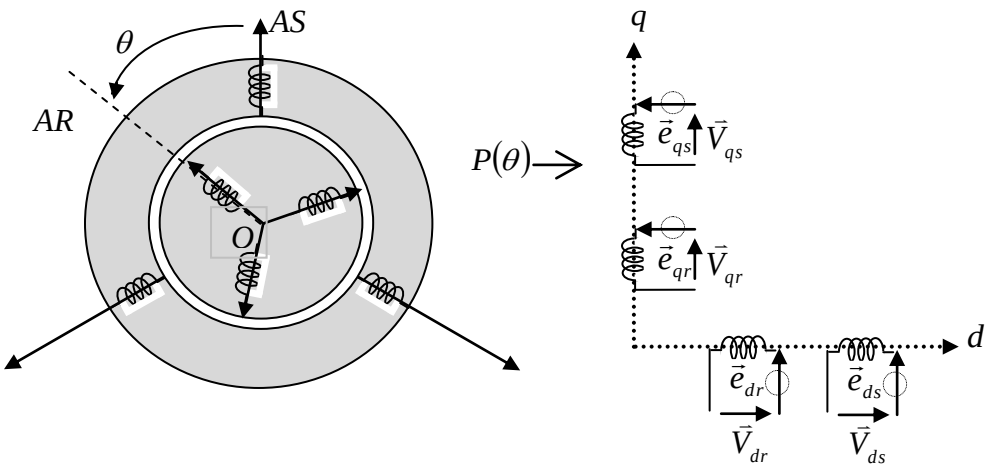


Fig.II.19 : Représentation de la MADA dans le repère de Park

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.8.3.2 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 :

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

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.8.4 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.8.5 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 [17]. La forme générale du couple électromagnétique d'une machine asynchrone triphasée modélisée dans le repère de Park est donnée par la relation suivante:

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

II.8.6 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 :

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

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

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

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

II.9 Modélisation de l'alimentation de la MADA

Le long de tout notre travail, les différentes structures de commande sont constituées de l'association d'une machine asynchrone à double alimentation avec un onduleur de tension. La tension de sortie de ce dernier est contrôlée par une technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI). L'association redresseur-filtre-onduleur de tension est représentée dans la figure (II.20).

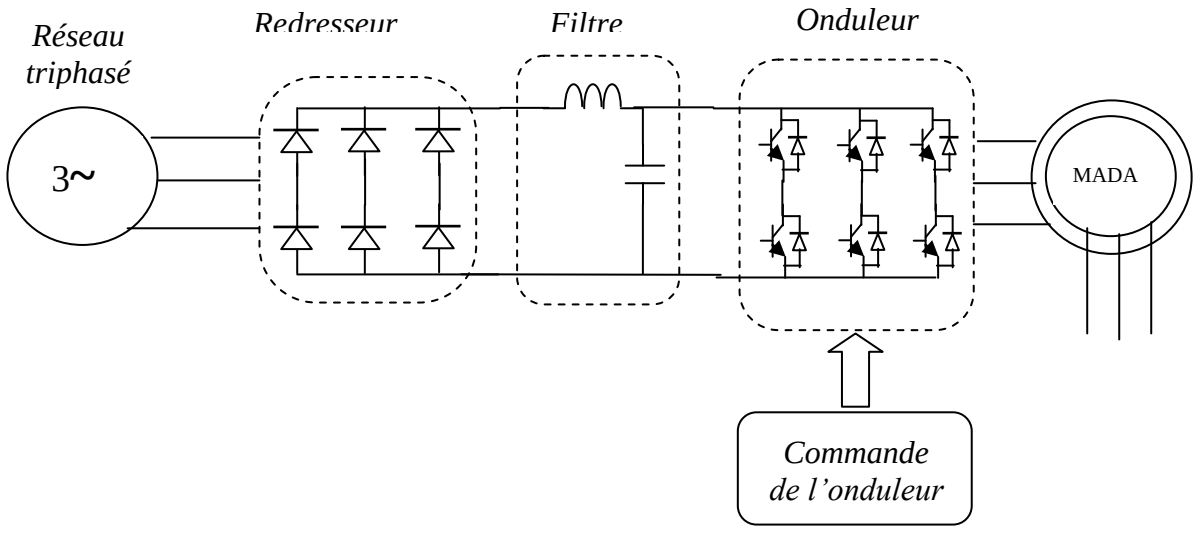


Figure II.20 : Schéma du convertisseur statique

II.9.1 Modélisation du redresseur

Le redresseur est un convertisseur « alternatif / continu ». Une conversion d'énergie électrique permet de disposer d'une source de courant continu à partir d'une source alternative [25].

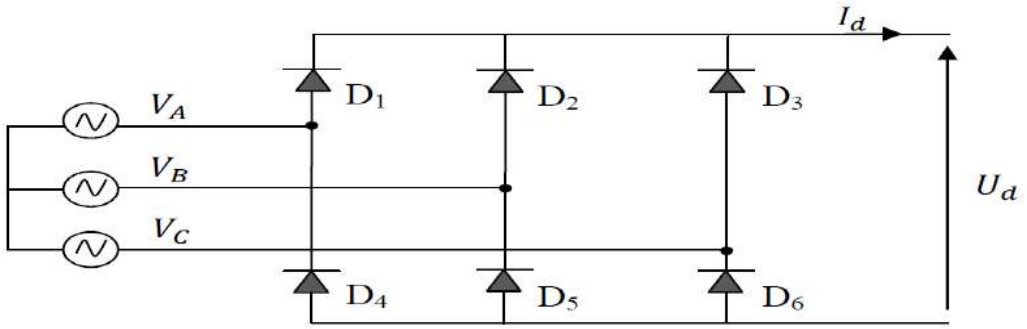


Figure II.21 : Schéma du redresseur triphasé à diodes

Ce redresseur comporte trois diodes D_1, D_2, D_3 à cathode commune assurant l'aller du courant I_d et trois diodes D_4, D_5, D_6 à anode commune assurant le retour du courant I_d. Si on suppose que le redresseur est alimenté par un réseau triphasé équilibré de tension :

$$\begin{cases} U_a(t) = V_{max} sin(2\pi ft) \\ U_b(t) = V_{max} sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) \\ U_c(t) = V_{max} sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad \text{(II-24)}$$

Et si on néglige l'effet d'empiètement, la tension de sortie du redresseur sera définie comme suit :

$$U_{\boldsymbol{d}}(t) = Max[U_a(t), U_b(t), U_c(t)] - Min[U_a(t), U_b(t), U_c(t)] \quad \text{(II-25)}$$

La tension redressée présente des ondulations. Pour réduire ces ondulations il faut placer un filtre passe bas entre le redresseur et l'onduleur.

II.9.2 Modélisation du filtre

Le filtre est constitué par une inductance L_{ft} et une capacité C_{ft} comme il est représenté à la figure (II.22).

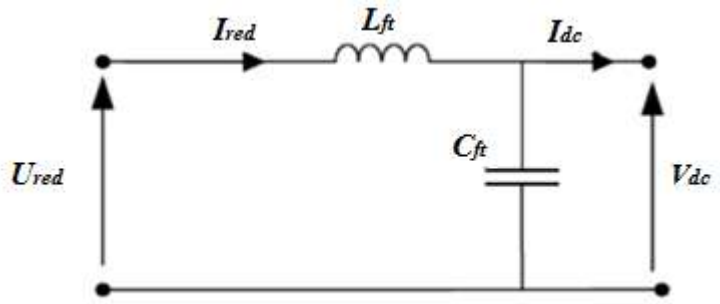


Figure II.22 : Représentation d'un filtre

Le modèle du filtre est défini par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_{red} = \frac{1}{L_{ft}} (U_{red} - V_{dc}) \\ \frac{d}{dt} V_{dc} = \frac{1}{C_{ft}} i_c = \frac{1}{C_{ft}} (i_{red} - i_{dc}) \end{cases} \quad \text{(II-26)}$$

La fonction de transfert du filtre est donnée par :

$$F(s) = \frac{V_{dc}(s)}{U_{red}(s)} = \frac{1}{1+\left(\sqrt{L_{ft} C_{ft}} s\right)^2} \quad \text{(II-27)}$$

C'est un filtre de deuxième ordre avec une fréquence de coupure égale à :

$$f_c = \frac{1}{\sqrt{L_{ft} C_{ft}}}$$

II.9.3 Modélisation de l'onduleur

L'onduleur est un convertisseur statique permettant, à partir d'un signal continu, d'imposer un signal alternatif à fréquence et amplitude variables [26]. Il joue un rôle très important dans la commande des machines, particulièrement la machine asynchrone. La Figure (II.23) illustre le schéma structurel d'un onduleur à 3 niveaux.

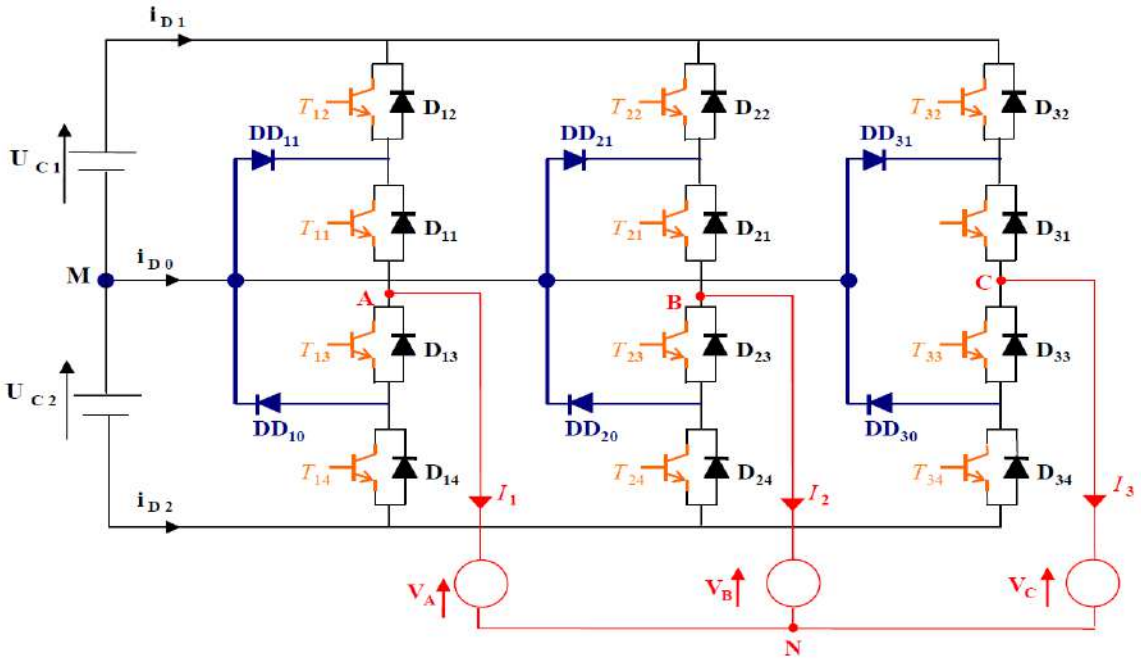


Fig.II.23: Onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC

Pour l'onduleur à trois niveaux, on définit la fonction de connexion d'un demi-bras notée F_{km}^{b}

$$\begin{cases} F_{k1}^{b} = F_{k1}.F_{k2} \\ F_{k0}^{b} = F_{k3}.F_{k4} \end{cases} \qquad \text{(II.29)}$$

Où K : Numéro du bras (K=1; 2; 3)

$$m = \begin{cases} 0 & pour\ le\ demi-bras\ du\ bas \\ 1 & pour\ le\ demi-bras\ du\ haut \end{cases}$$

Les fonctions de connexion des demi-bras s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit:

Avec: F_{ki} commande des transistors (K = 1, 2,3 et i = 1, 2,3, 4).

Les tensions simples de charges sont données par le système suivant:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3}.\begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}.\left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^{b} \\ F_{21}^{b} \\ F_{31}^{b} \end{bmatrix} U_{C1} - \begin{bmatrix} F_{10}^{b} \\ F_{20}^{b} \\ F_{30}^{b} \end{bmatrix} U_{C2} \right\} \qquad \text{(II.29)}$$

Les courants d'entrée $_{id1}$ et i_{d2} sont exprimés en fonction des courants de la charge i_1, i_2, i_3, par les relations suivantes:

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{11}^{b}.i_1 + F_{21}^{b}.i_2 + F_{31}^{b}.i_3 \\ i_{d2} = F_{10}^{b}.i_1 + F_{20}^{b}.i_2 + F_{30}^{b}.i_3 \end{cases} \quad \text{(II.30)}$$

Le courant i_{d0} est lié aux courants de charge comme suit:

$$i_{d0} = (1 - F_{11}^{b} - F_{10}^{b}).i_1 + (1 - F_{21}^{b} - F_{20}^{b}).i_2 + (1 - F_{31}^{b} - F_{30}^{b}).i_3 \quad \text{(II.31)}$$

II.9.4 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'une succession de créneau de largeurs convenables [27]. Cela permet d'obtenir des tensions ne contenant pas d'harmoniques à basses fréquences.

La technique de modulation de largeur d'impulsion retenue dans cette étude est la méthode à MLI triangulo-sinusoïdale présentée en [27]. Les commandes des interrupteurs du convertisseur sont définies à l'aide d'un algorithme comportant uniquement des expressions algébriques, directement adaptables à un système numérique de contrôle. Pour commander l'onduleur à trois niveaux par la modulation de largeurs d'impulsions (MLI), on a utilisé la commande triangulo-sinusoïdale à deux porteuses.

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 [26].

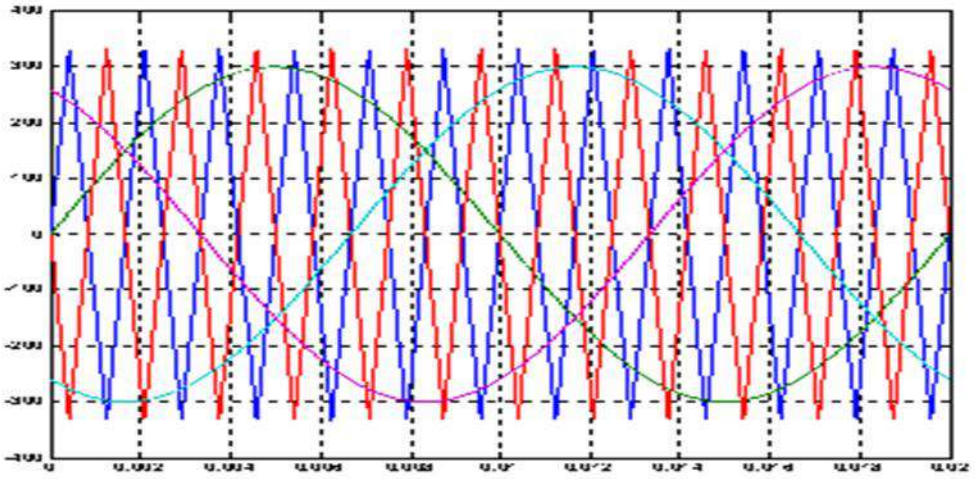


Figure II.24: Principe de la commande MLI

II-10. résultats de simulation :

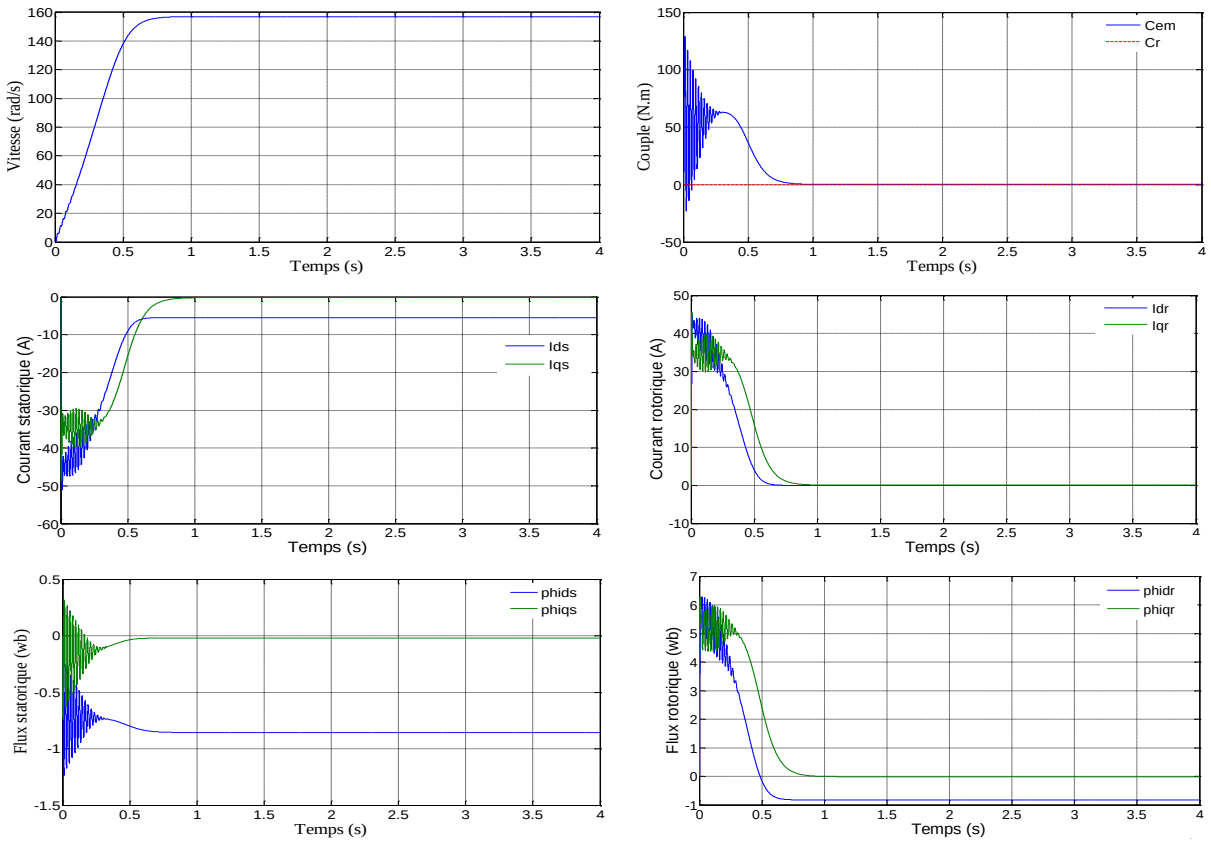


Figure II.25 : Réponses du système avec V_r= 0 V, f_r= 50 Hz, C_r=0

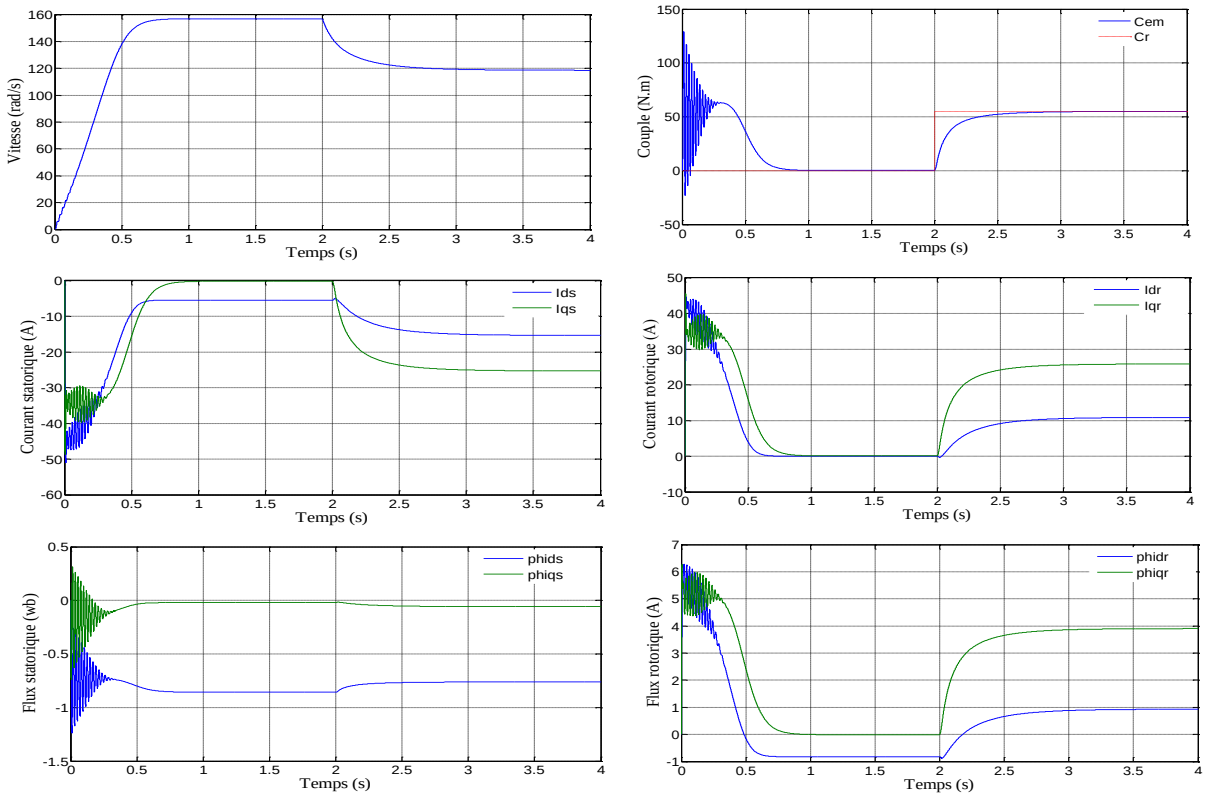


Figure II.26 : Réponses du système avec V_r= 0 V, f_r= 50 Hz, C_r=55

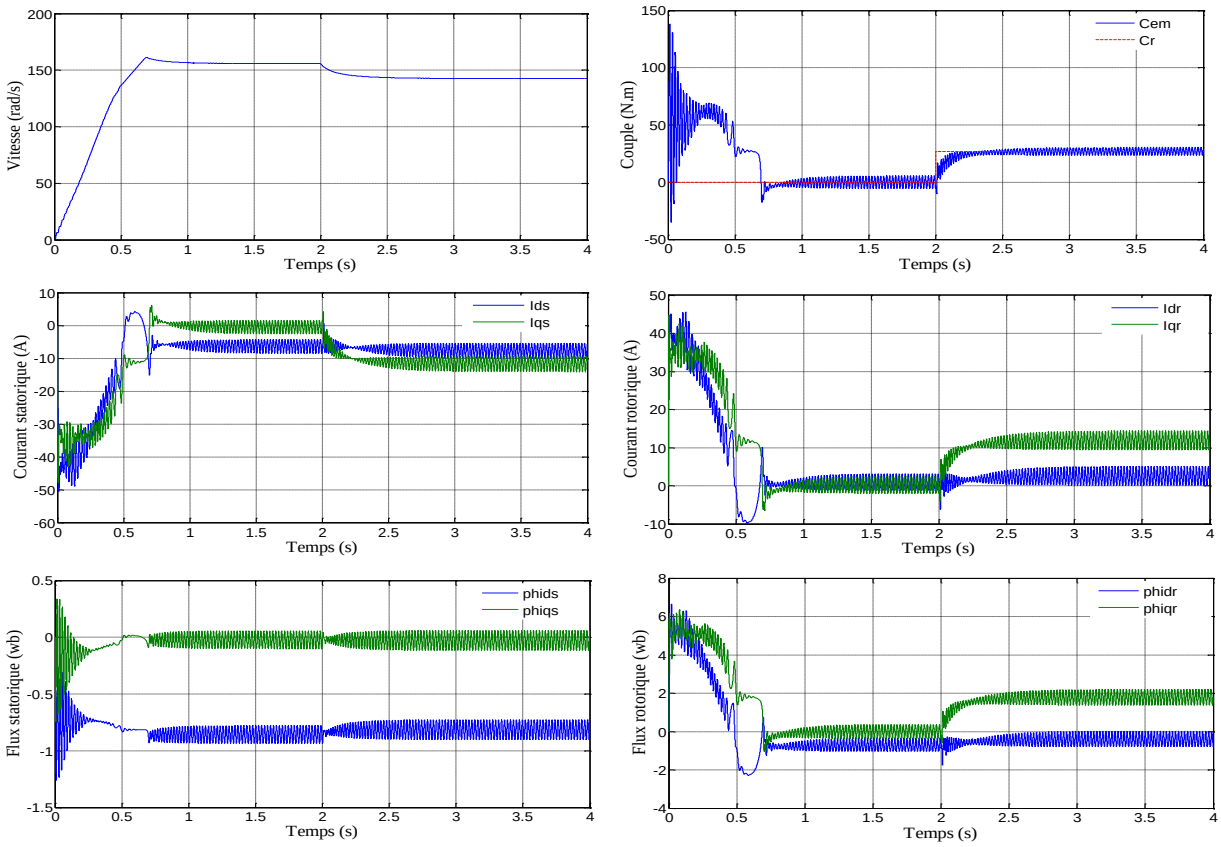


Figure II.27 : Réponses du système avec Vr= 12 V, fr= 5 Hz, C_r=27 N.m

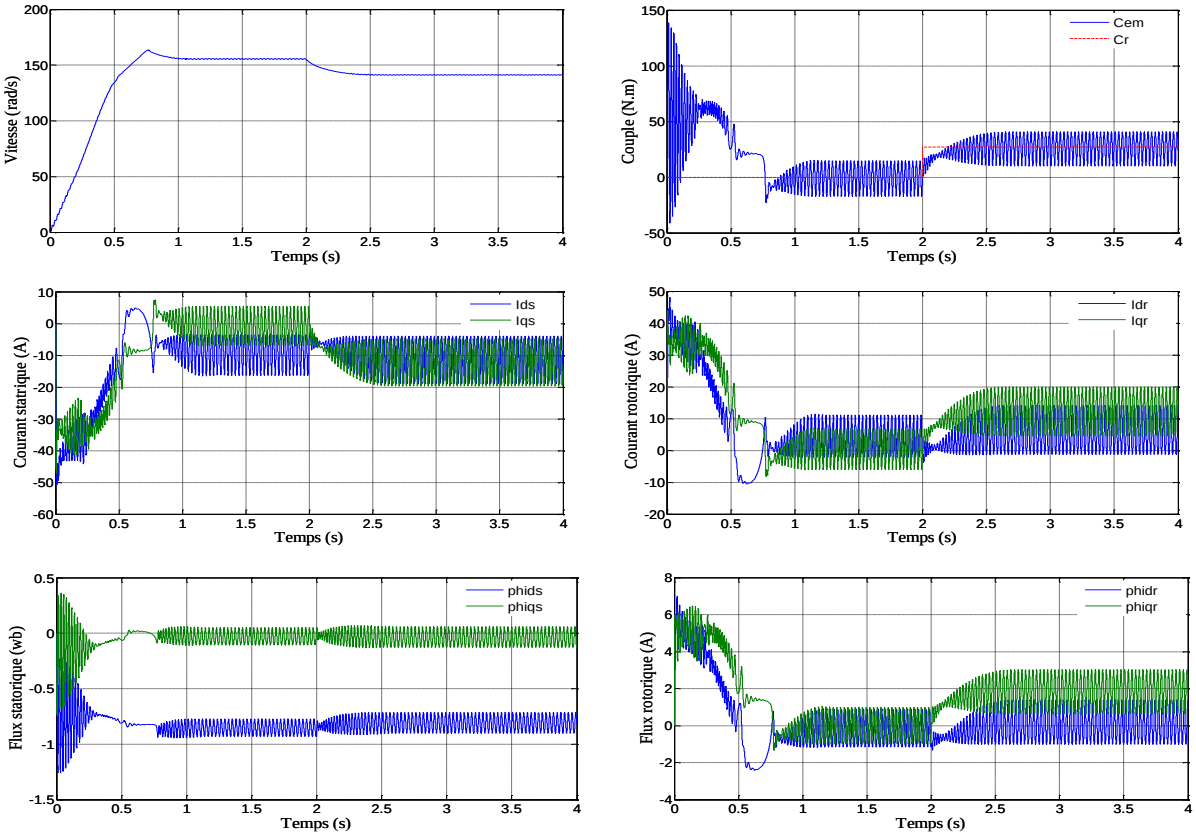


Figure II.28 : Réponses du système avec Vr= 12 V, fr= 15 Hz ,Cr=27 N.m

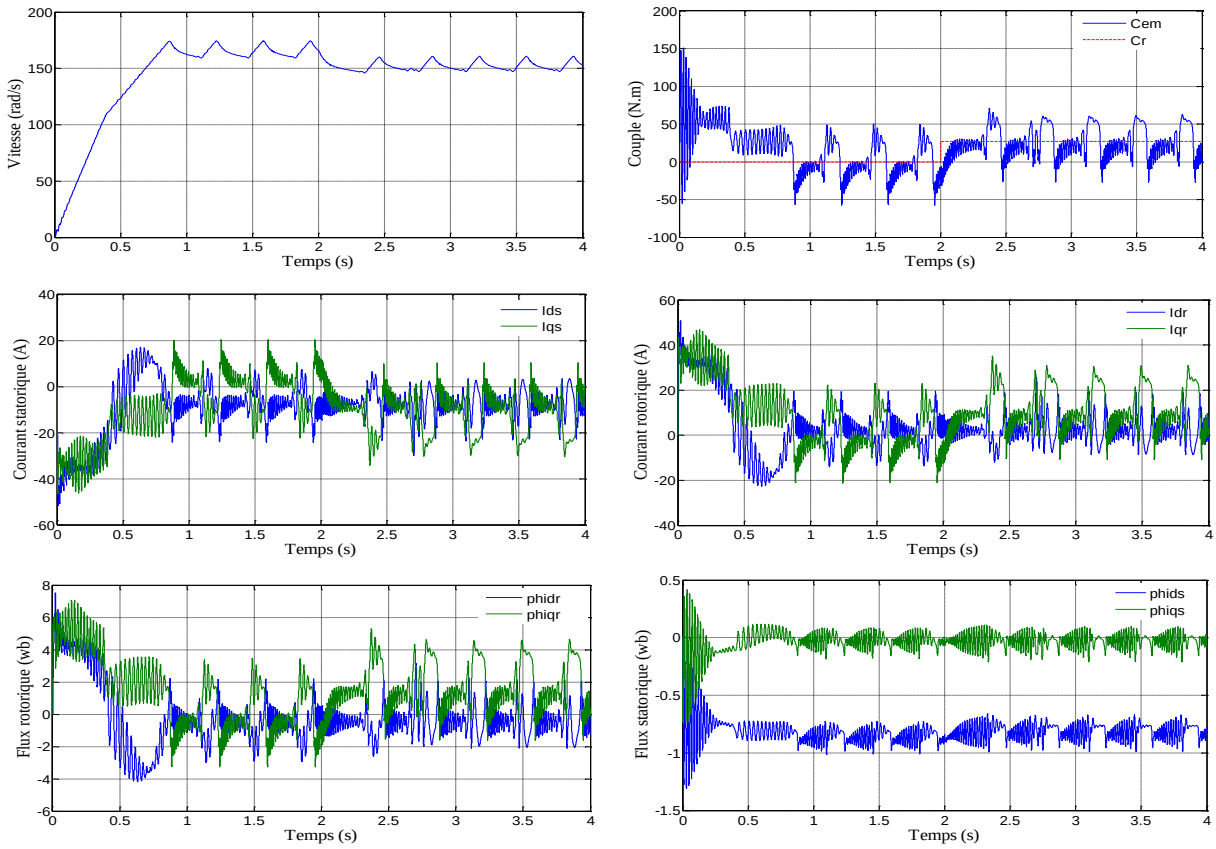


Figure II.29: Réponses du système avec Vr= 30 V, fr= 5 Hz, C_r=27 N.m

II.10 Interprétation des résultats de simulation:

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

La tension d'attaque de la MADA à t=0 coté stator c'est la tension de réseau électrique à fréquence et tension constantes (*Vr= 220 V ; fr= 50 Hz*). Dans le coté rotorique deux cas sont étudies :

- 1^{er} cas : tension constante et fréquence variable.
- $2^{éme}$ cas : tension variable et fréquence constante.

La figure (II.25) 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 = 2s, on remarque que la vitesse diminue puis elle se stabilise (figure II.26). Dans le cas où on fait varier la fréquence rotorique de (5 Hz à 15 Hz) et on maintient la tension rotorique constante (12V), on constate que cette variation implique des oscillations importantes au niveau des grandeurs saufs pour la vitesse comme il est illustré sur les figures(II.27) et (II28).

Dans le cas où la fréquence rotorique est constante (5 Hz), et la tension rotorique est variable de (12V à 30V) 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.29).

On peut signaler aussi que la machine peut supporter le double de la charge nominale mais avec une vitesse plus inférieure que celle obtenu avec sa charge nominale comme il est démontré sur la figure (II.26).

On remarque également que le flux 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.

II.10 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté une brève étude sur la machine asynchrone à double alimentation, sa structure, son principe de fonctionnement et les différentes stratégies de sa commande ainsi que ses domaines d'application. On a aussi présenté le modèle de la machine dans le repère (a,b,c) 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 le redresseur, le filtre et l'onduleur. Pour ce dernier, on a appliqué 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 vectorielle. Cette dernière est le sujet du deuxième chapitre.

III.1 Introduction

Une bonne commande des machines à courant alternatif à vitesse variable est assurée si nous garantissons un bon découplage entre ses grandeurs électromagnétiques. Ceci est réalisé par orientation de ces derniers dans un repère (d,q) tournant à la vitesse de rotation du champ tournant. Si cela est réalisé, nous pouvons rapprocher son comportement de celle d'un moteur à courant continu à excitation indépendante où nous retrouvons un découplage naturel entre le courant d'excitation qui crée le flux et le courant d'induit fournissant le couple électromagnétique nécessaire pour la faire tourner [28],[29].

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentée aussi bien en fonctionnement générateur que moteur.

Dans cette optique, nous avons proposé une loi de commande pour la MADA basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux rotoriques en vue de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la machine et le réseau [9].

III.2 Principe de la commande vectorielle

La commande par orientation de flux proposé par Blaschke, est une technique de commande classique pour l'entraînement des machines asynchrones. L'idée fondamentale de cette méthode de commande est de ramener le comportement de la machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu. Cette méthode se base sur la transformation des variables électriques de la machine vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux. Afin d'obtenir un contrôle analogue à celui de la machine à courant continu à excitation séparée, I_{dr} est analogue au courant d'excitation, tandis que le courant I_{qr} est analogue au courant d'induit. Par conséquent, les deux composantes I_{dr} et I_{qr} sont mutuellement découplées [29].

La figure (III.1) illustre l'équivalence entre l'expression du couple que l'on réalise avec la commande découplée classique d'une machine à courant continu et la commande vectorielle d'une MADA.

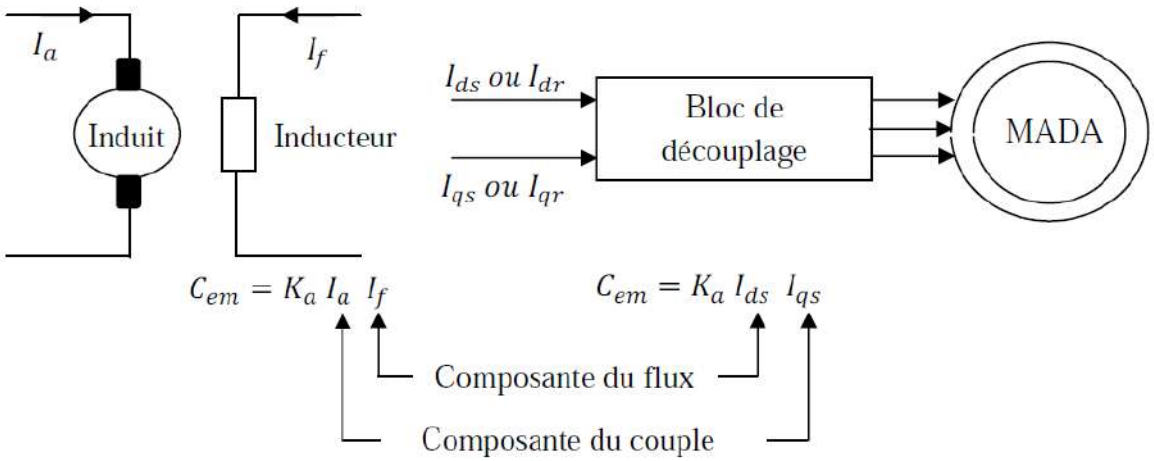


Figure III.1 : Principe de la commande vectorielle

De nombreuses variétés de la commande vectorielle ont été présentées dans la littérature, et sont classées :

❖ Suivant la source d'énergie :
- Commande en tension,
- Commande en courant;

❖ Suivant l'orientation du repère :
- Le flux rotorique,
- Le flux statorique,
- Le flux d'entrefer;

❖ Suivant la détermination de la position du flux :
- Directe par mesure ou observation du vecteur flux,
- Indirecte par contrôle de la fréquence de glissement.

L'examen de l'expression du couple montre une différence entre deux composantes en quadrature, celles du courant statorique et du flux rotorique, qui présente un couplage complexe entre les grandeurs de la machine. Le référentiel pour la commande est celui lié au champ tournant afin que l'axe d coïncide avec la direction désirée du flux qui peut être rotorique, statorique ou d'entrefer. Ainsi il est possible d'orienter les différents flux de la machine.

Le choix de type d'orientation est une étape nécessaire dans la modélisation vectorielle, en général il existe trois principaux choix [30]:

Orientation du flux rotorique

$$\begin{cases}\Psi_{\mathrm{dr}} = \Psi_{\mathrm{r}} \\ \Psi_{\mathrm{qr}} = 0\end{cases}$$

Orientation du flux statorique

$$\begin{cases}\Psi_{ds} = \Psi_{s} \\ \Psi_{qs} = 0\end{cases}$$

Orientation du flux magnétisant

$$\begin{cases}\Psi_{dm} = \Psi_{m} \\ \Psi_{qm} = 0\end{cases}$$

Avec:

Ψ_r Flux rotorique ; Ψ_s flux statorique, Ψ_m flux magnétisant (d'entrefer).

III.3 Modèle pour le contrôle indépendant des puissances

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions rotoriques, générées par un onduleur multiniveaux, aux puissances actives et réactives statoriques [14],[31], [32], [33], [34]. On oriente le repère (d,q) afin que l'axe d soit aligné sur le flux statorique Ψ_{ds}, dans ce cas :

$$\Psi_{ds} = \Psi_s; \Psi_{qs} = 0$$

L'expression du couple électromagnétique devient alors :

$$C_e = n_p \frac{M}{L_s} \psi_{ds}.I_{qr} \qquad \text{(III .1)}$$

Dans l'hypothèse où le flux Ψ_{ds} est maintenu constant (ce qui est assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator), le choix de ce repère rend le couple électromagnétique produit par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendante du courant rotorique d'axe q [11].

Dans le repère triphasé a,b,c, la tension aux bornes d'une phase n du stator s'exprime par la relation générale :

$$V_{sn} = R_s I_{sn} + \frac{d\Psi_{sn}}{dt}$$

Si l'on néglige la résistance du bobinage statorique R_s, ce qui est une hypothèse assez réaliste pour les machines de moyenne et forte puissance utilisée dans l'énergie éolienne, cette relation devient :

$$V_{sn} = \frac{d\Psi_{sn}}{dt} \qquad \text{(III .2)}$$

La relation (III .2) montre que le repère lié au flux statorique tourne à la même vitesse angulaire que le vecteur tension statorique et qu'il est en avance de $\pi/2$ sur ce même vecteur. On peut alors écrire (toujours dans l'hypothèse d'un flux statorique constant) :

$$V_{ds} = 0 \; et \; V_{qs} = V_s \qquad \text{(III .3)}$$

En s'alignant sur le repère choisi et en utilisant les simplifications ci-dessus inhérentes à ce repère, nous pouvons simplifier les équations des tensions comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \Psi_{ds} \end{cases} \qquad \text{(III .4)}$$

Et les équations des flux (II.20) deviennent :

$$\begin{cases} \Psi_s = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \qquad \text{(III .5)}$$

A partir de l'équation(III .5), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} I_{ds} = \dfrac{\Psi_s}{L_s} - \dfrac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\dfrac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \qquad \text{(III .6)}$$

III.3.1 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

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

$$\begin{cases} P = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad \text{(III .7)}$$

L'adaptation de ces équations au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas (V_{ds}=0) donne

$$\begin{cases} P = V_s I_{qs} \\ Q = V_s I_{ds} \end{cases} \quad \text{(III .8)}$$

En remplaçant I_{ds} et I_{qs} par leurs expressions données par l'équation (III .6), nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive :

$$\begin{cases} P = -\ V_s \dfrac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q = \dfrac{V_s \Psi_s}{L_s} - \dfrac{V_s M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad \text{(III .9)}$$

A partir des équations (III.3) et (III.4), nous obtenons, pour le flux statoriques, l'expression suivante :

$$\Psi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$$

L'expression des puissances (III.9) peut donc se simplifier de la manière suivante :

$$\begin{cases} P = -\ V_s \dfrac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q = -\dfrac{V_s M}{L_s} I_{dr} + \dfrac{{V_s}^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad \text{(III .10)}$$

Compte tenu du repère choisi et des approximations faites et si l'on considère l'inductance magnétisante M comme constante, le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe q et la puissance réactive au courant rotorique d'axe d à la constant $\frac{{V_s}^2}{L_s \omega_s}$ près imposée par le réseau [13].

III.3.2 Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il nous faut alors établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliqués à la machine.
Exprimons d'abord les flux rotoriques d'après les équations (II.21) en remplaçant les courants statoriques par leur expression dans l'équation (III.6) :

$$\begin{cases} \Psi_{dr} = \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s}\right) I_{dr} + \dfrac{MV_s}{\omega_s L_s} \\ \Psi_{qr} = \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s}\right) I_{qr} \end{cases} \qquad \text{(III .11)}$$

Ces expressions des flux rotoriques d'axe d et q sont alors intégrées aux expressions des tensions rotoriques diphasées de l'équation (II.22). Nous obtenons alors :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s}\right)\dfrac{dI_{dr}}{dt} - \mathrm{g}\omega_s \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s}\right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s}\right)\dfrac{dI_{qr}}{dt} + \mathrm{g}\omega_s \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s}\right) I_{dr} + \mathrm{g}\omega_s \dfrac{MV_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \qquad \text{(III .12)}$$

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

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - \mathrm{g}\omega_s \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s}\right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \mathrm{g}\omega_s \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s}\right) I_{dr} + \mathrm{g}\omega_s \dfrac{MV_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \qquad \text{(III .13)}$$

V_{dr} et V_{qr} : Sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus. L'influence des termes de couplage entre les deux axes en (L_r-(M^2/L_s) est minime. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser. En revanche, le terme (g.($M.V_s$/L_s)) représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de traînage. Le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur [11].

En examinant les équations (III.11) et (III.13), on peut établir le schéma bloc de la figure (III.2) qui comporte en entrées les tensions rotoriques et en sorties les puissances actives et réactives statoriques [13].

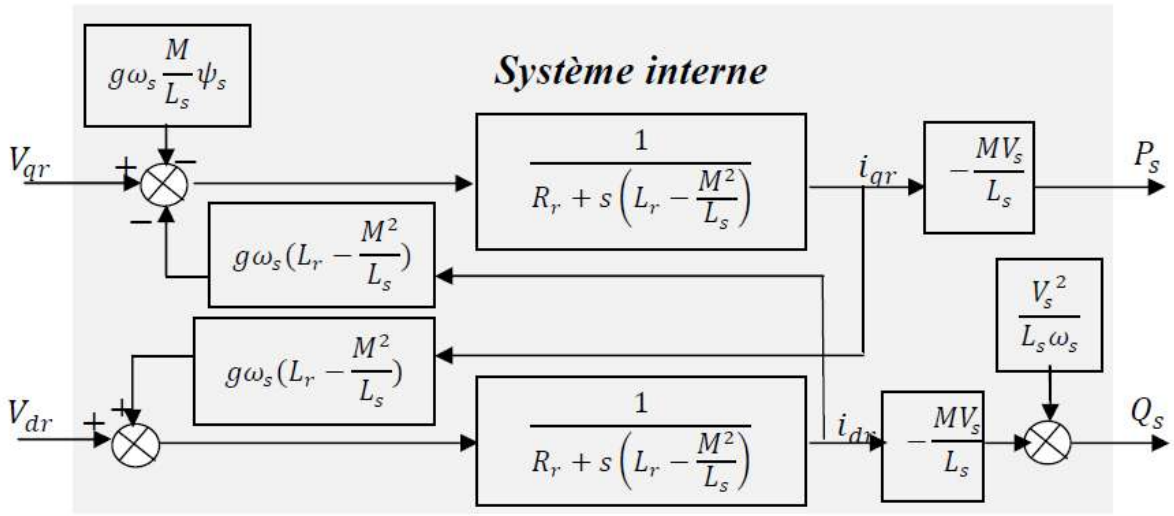


Fig. III .2: Schéma bloc de la MADA.

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

- **La première méthode** consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode sera appelée *méthode directe* car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.

- **La deuxième méthode** consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode appelée *méthode indirecte* découle directement des équations (III.10) et (III.12) [13].

Cette dernière méthode va être étudiée et simulée dans la suite de cette partie

III.4 Commande indirecte

La méthode indirecte consiste à reproduire, en sens inverse, le schéma bloc du système à réguler. On construit ainsi un schéma bloc permettant d'exprimer les tensions en fonction des puissances. On aboutit alors à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens. La commande indirecte va donc contenir tous les éléments présents dans le schéma bloc que la MADA [13]. On part donc de la puissance statorique en fonction des courants rotoriques et des expressions des tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques

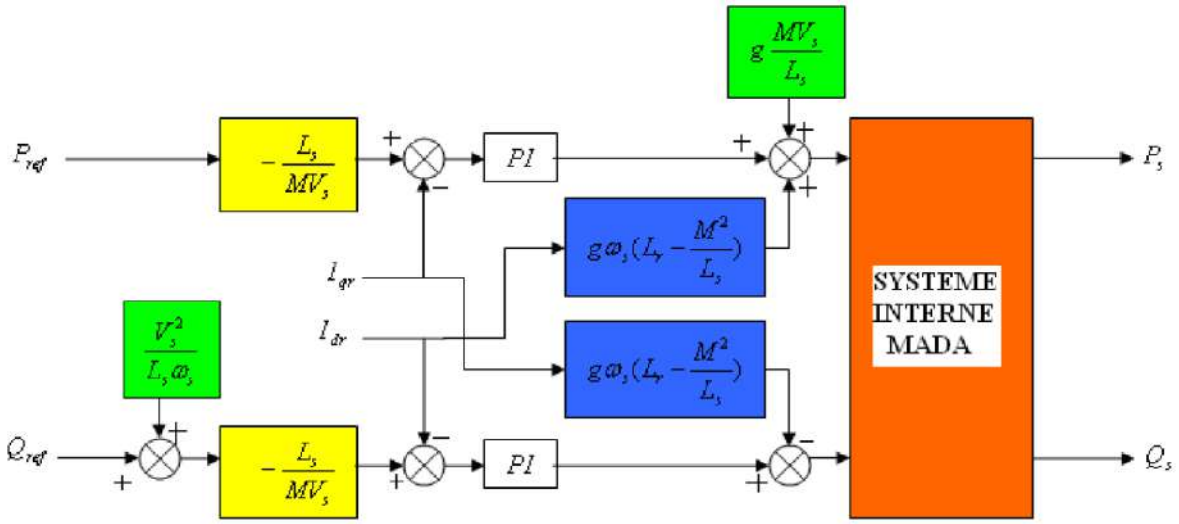


Fig. III . 3: Schéma bloc de la commande indirecte.

III.5 commande directe

Afin d'éviter le problème de l'erreur statique sur les grandeurs à régler, nous utilisons maintenant la régulation directe de ces grandeurs. La figure III.4 représente le schéma de la commande directe des puissances.

Avac :

$$\begin{cases} e_{rQ} = -\sigma L_r g\omega_s i_{qr} + R_r \dfrac{v_s}{M\omega_S} \\ e_{rP} = \sigma L_r g\omega_s i_{dr} + R_r \dfrac{Mv_s}{L_S} \end{cases}$$

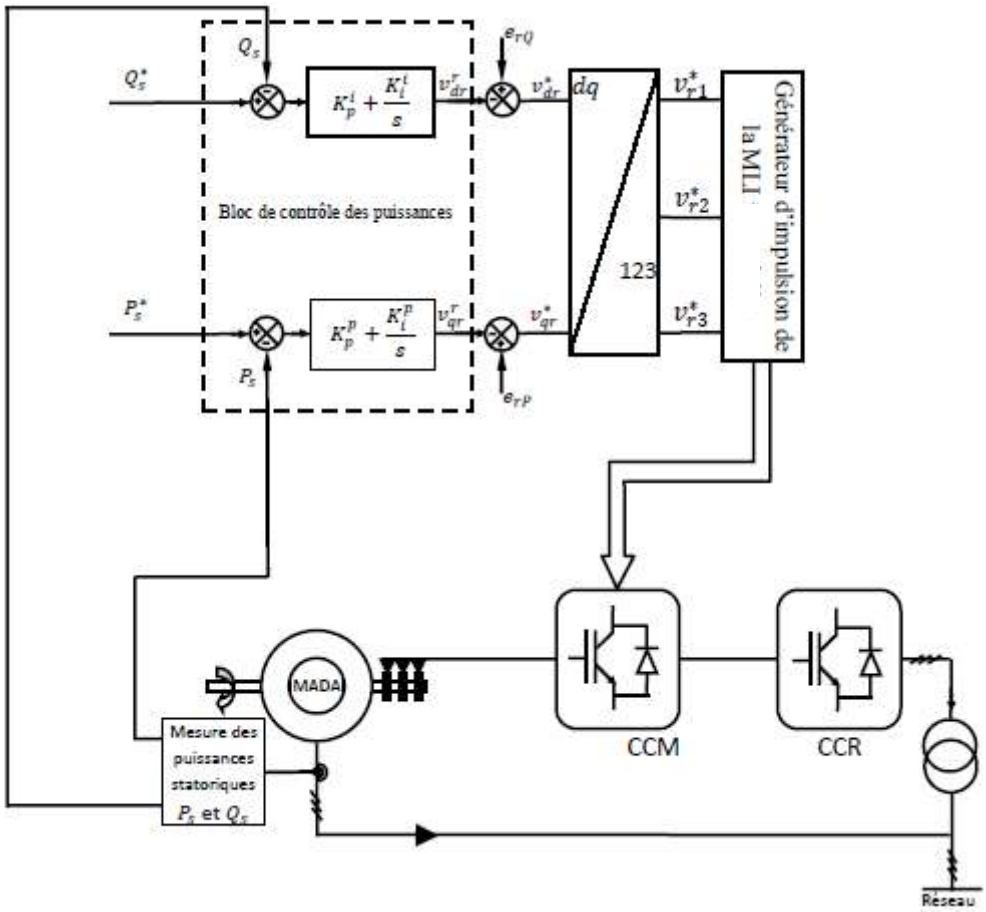


Fig.III . 4: Schéma bloc de la commande directe des puissances.

III.6 Simulation de la commande indirecte de puissance

III.6.1 Fonctionnement à vitesse fixe

Le premier essai consiste à appliquer aux entrées de commande des échelons de puissance active et réactive, alors que la machine est entrainée a vitesse fixe de 1500 *tr/min*.

- Pour la puissance active :
  - De t=0s à t=1s : un échelon négatif de -6000 W,
  - De t=1s à t=2.5s : un échelon négatif de -10000 W,

– De t=2.5s à t=3.5s : un échelon négatif de -3000 W.

- Pour la puissance réactive :
  - De t=0s à t=1s : un échelon négatif de -3000VAR,
  - De t=1s à t=2s : un échelon négatif de -5000VAR,
  - De t=2s à t=3s : un échelon négatif de -3000VAR,
  - De t=3s à t=3.5s : un échelon positif de 2000VAR.

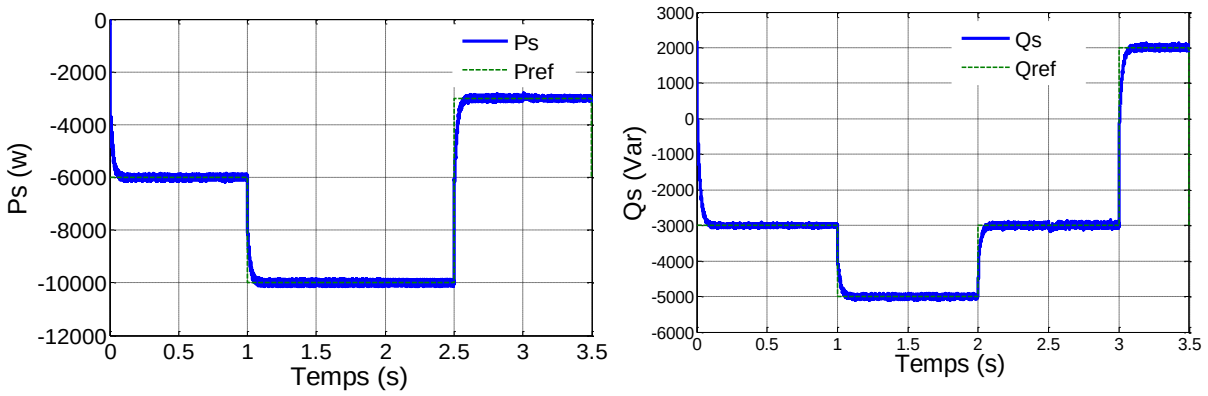


Fig.III.5: Puissance active et réactive du stator.

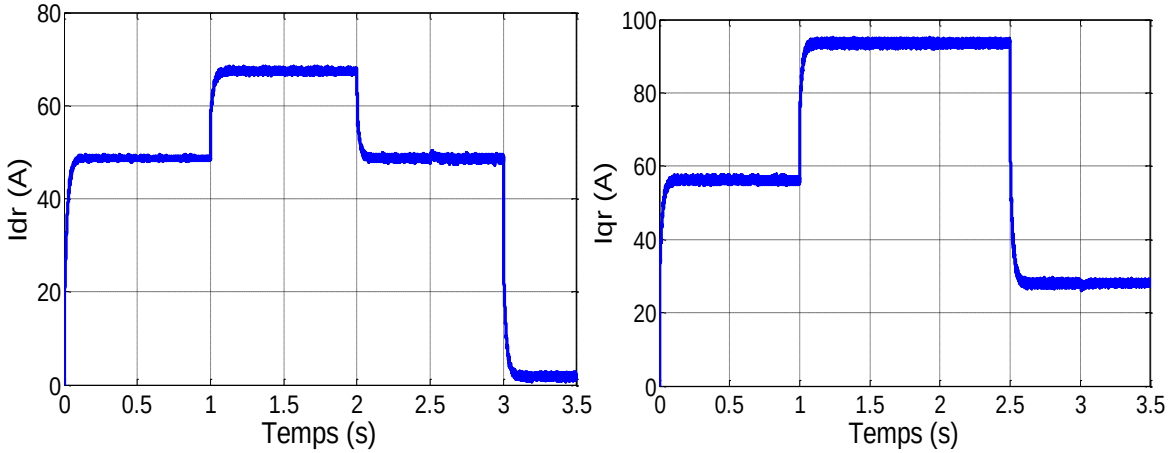


Fig.III.6: Le courant rotorique selon l'axe d et q

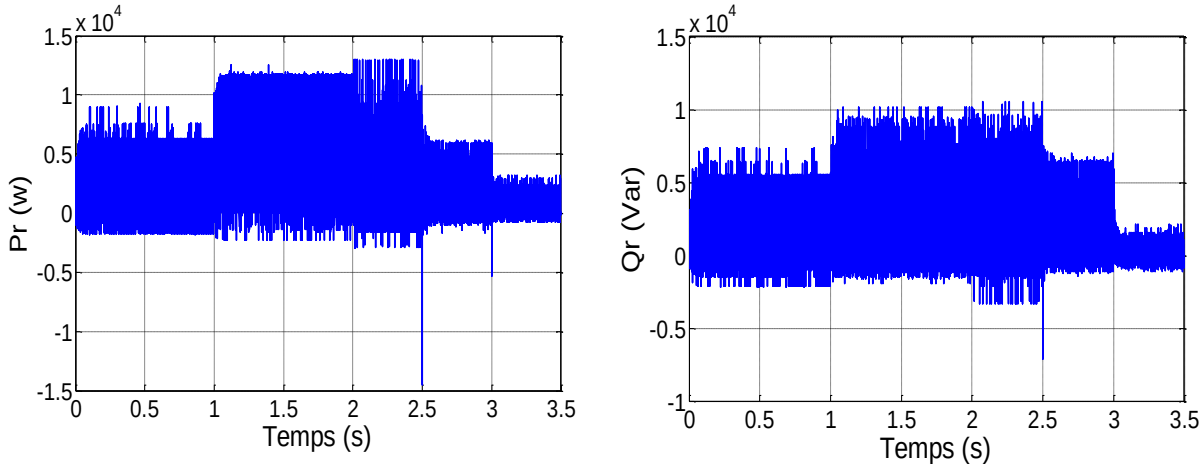


Fig.III.7: Puissance active et réactive du rotor.

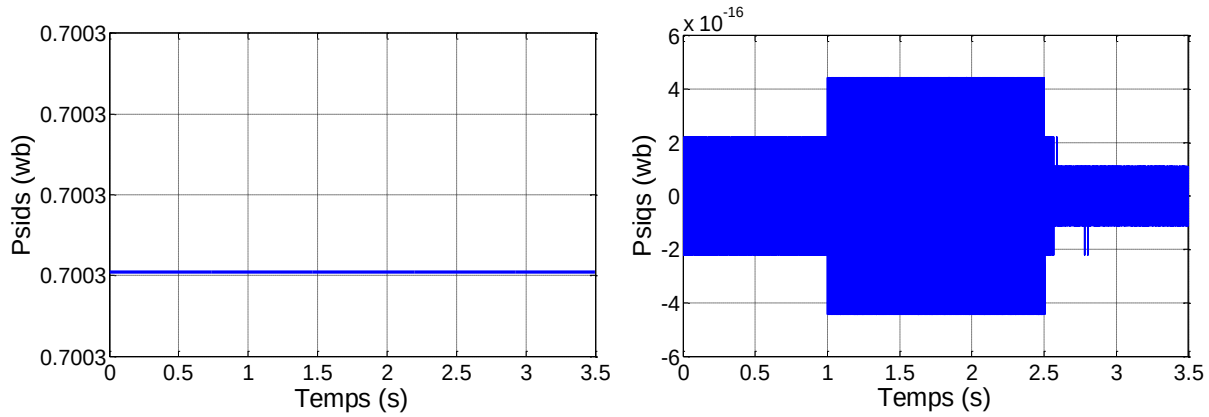


Fig.III.8: Le flux statorique selon l'axe d et q

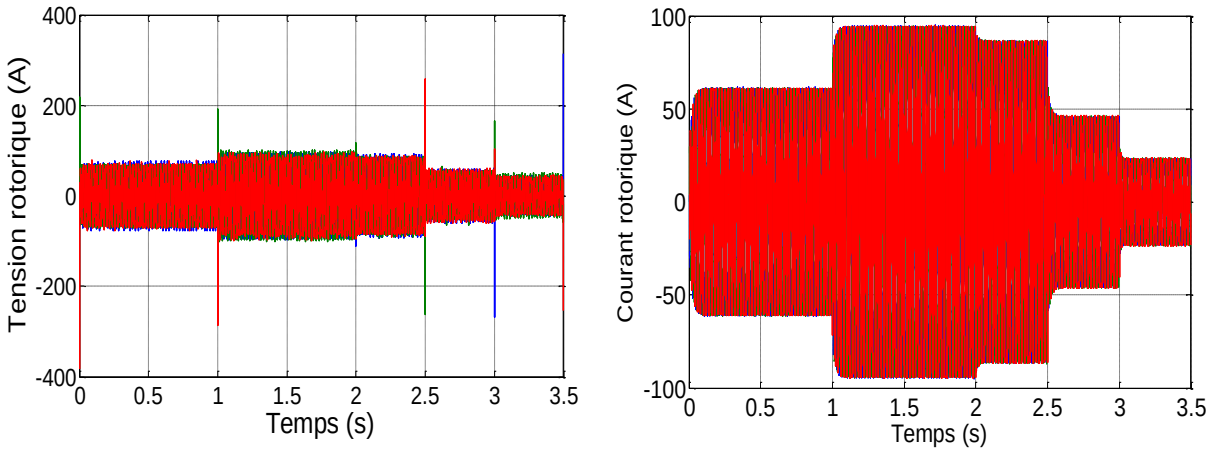


Fig.III.9: Tensions et courants rotoriques

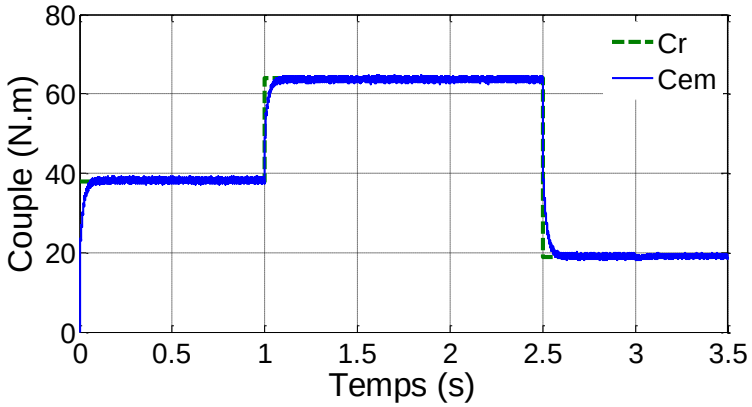


Fig.III.10: Couple électromagnétique

III.6.2. Interprétation des résultats

D'après les figures de simulation on constate que :

- Les réponses sont satisfaisantes.
- Concernant les puissances active ou réactive, on observe une dynamique qui réagit rapidement et sans dépassement. Les échelons sont correctement suivis et il n'y a plus d'erreur sur les puissances. Le couplage entre les deux puissances est très faible et peu perceptible.
- Le fonctionnement de contrôle de puissance réactive nous permet d'avoir une puissance réactive négative (comportement capacitif) ou positive (comportement inductif).
- Les valeurs des puissances actives et réactives sont proportionnelles respectivement aux composantes en quadrature et directe du courant rotorique.
- Le couple dépend essentiellement la composante en quadrature du courant rotorique (*Iqr*).
- La composante directe du flux statorique est pratiquement constante ; de plus, la composante en quadrature reste négligeable.
- Les valeurs des puissances rotoriques restent positives ; la MADA est pilotée par le rotor par une vitesse inférieure à la vitesse de synchronisme donc elle fonctionne en troisième Mode.

III.6.3. Fonctionnement en MPPT :

III.6.3.1. Stratégie MPPT :

La vitesse du vent étant difficilement mesurable, une stratégie MPPT sans cette mesure est présentée. Nous supposons que la vitesse du vent est constante sur la période d'étude, la vitesse de rotation de la turbine est supposée constante au regard de l'inertie importante de celle-ci. Si nous négligeons le coefficient de frottement de l'arbre mécanique, on peut écrire selon l'équation (I.20)

$$C_g = C_{em} \tag{III .14}$$

Tel que C_g : est le couple exercé sur l'arbre après le multiplicateur.

Alors, la référence du couple électromagnétique est obtenue à partir du couple de la turbine :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{aer}}{G} \tag{III .15}$$

Afin d'atteindre la valeur optimale de la vitesse de rotation rotorique lorsque la vitesse du vent est modifiée, le coefficient de puissance doit être maintenu à sa valeur maximale

($C_{p-\max}$). Alors, le couple aérodynamique absorbé est exprimé par [3]:

$$C_{aer} = \frac{1}{2.\Omega_t} C_{p-\max} \rho.S.V^3 \tag{III .16}$$

La vitesse de rotation de la turbine est estimée à partir de la vitesse de la génératrice par :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_r}{G} \tag{III .17}$$

Pour une valeur constante de l'angle d'incidence de la pale β et du rapport de vitesse λ égale à sa valeur optimale λ_{opt}, la vitesse du vent peut être estimée :

$$V = \frac{R\Omega_t}{\lambda_{opt}} \tag{III .18}$$

Alors, le couple électromagnétique de référence est obtenu par [3]:

$$C_{em-ref} = \frac{1}{2\lambda_{opt} G^3} C_{p-\max} \rho \pi R^2 \Omega^2 \qquad \text{(III .19)}$$

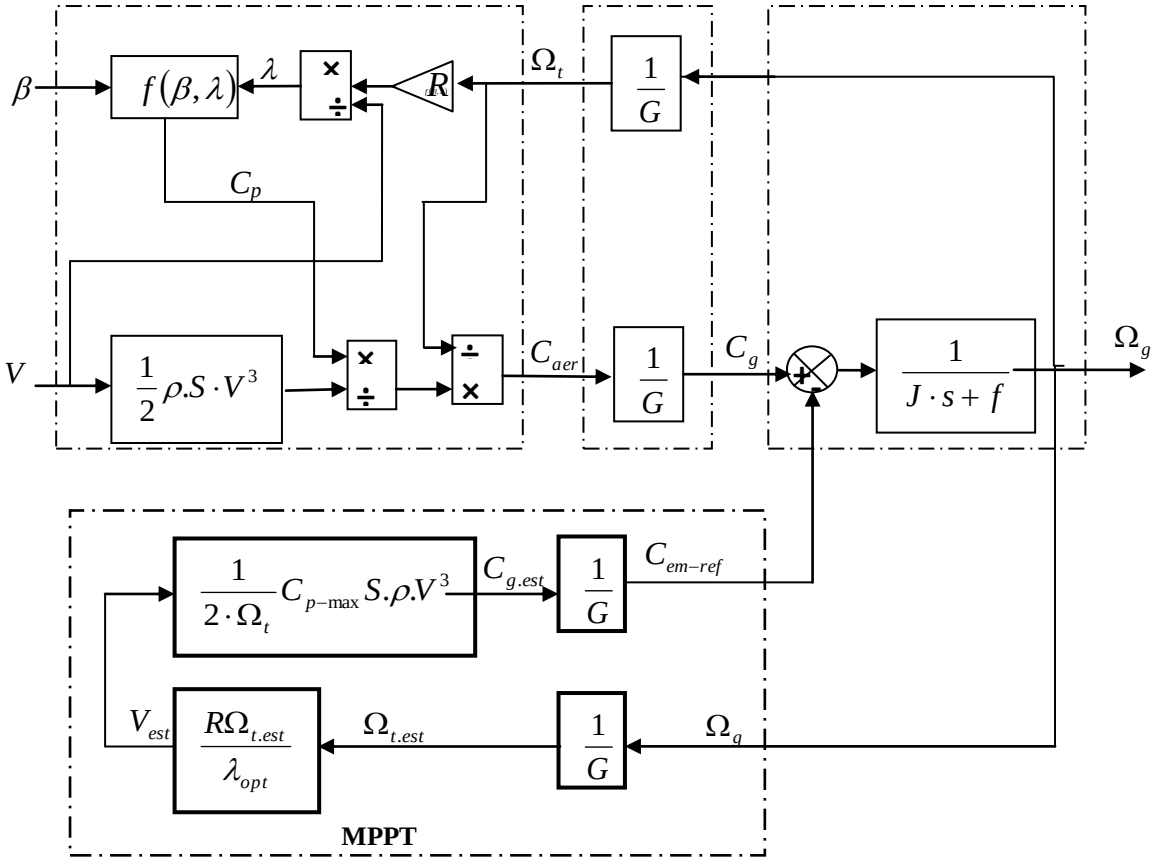


Fig**.III.11**: Schéma-bloc de la stratégie MPPT sans mesure de la vitesse du vent

III.6.3.2 Résultats de simulation :

Vitesse de vent variable avec l'implémentation de l'algorithme MPPT

- L'angle de calage β est fixé à 1^o.
- La référence de puissance est choisie selon l'MMPT.
- Une consigne de la puissance réactive de 0 pour maintenir le facteur de puissance à l'unité.

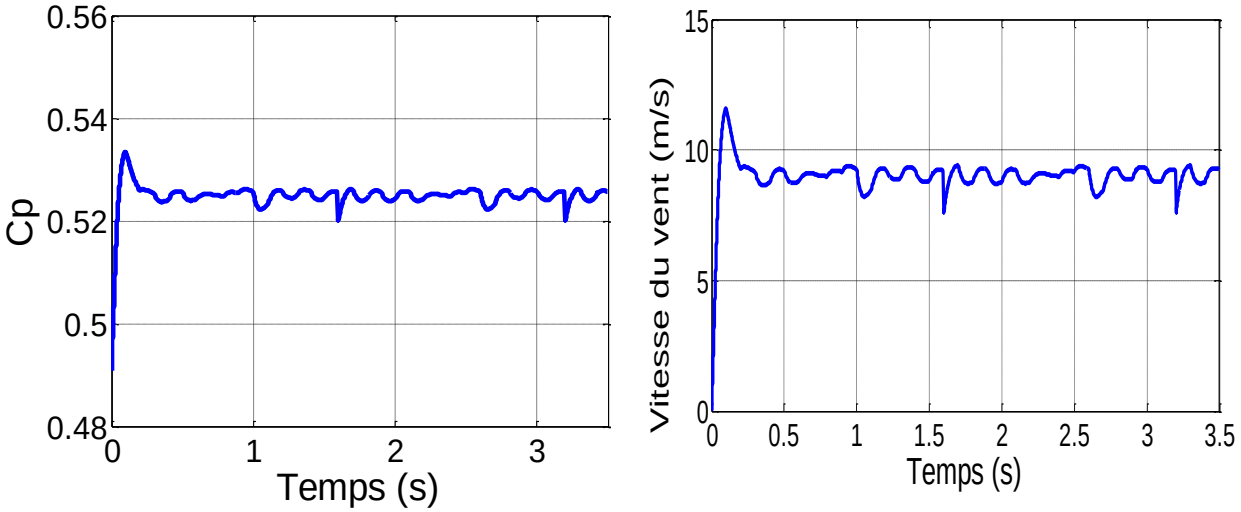


Fig. III. 12: Vitesse du vent *V(m/s)* et coefficient de puissance *Cp*

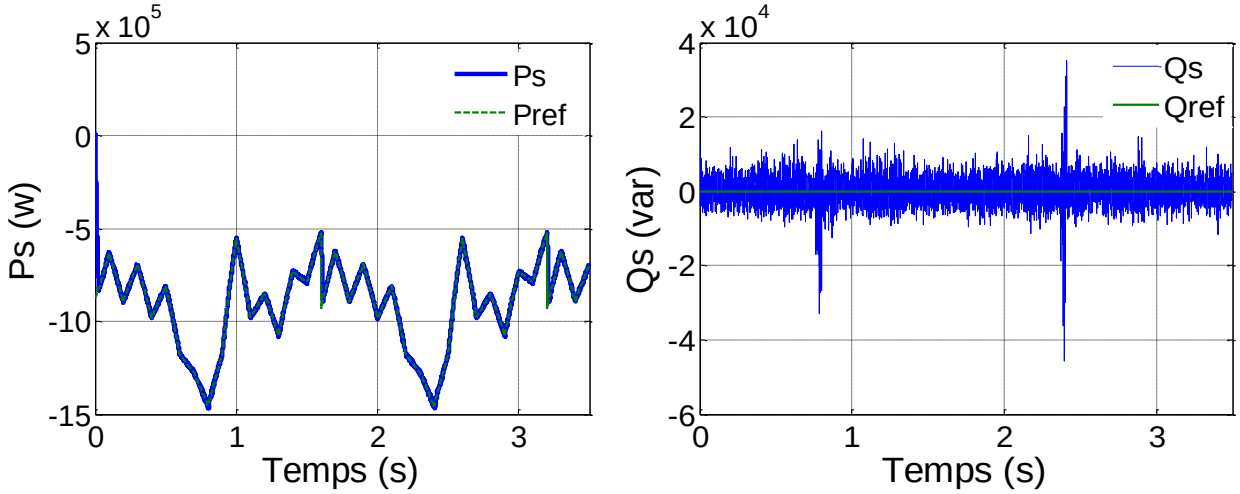


Fig. III. 13: Puissance active et réactive du stator

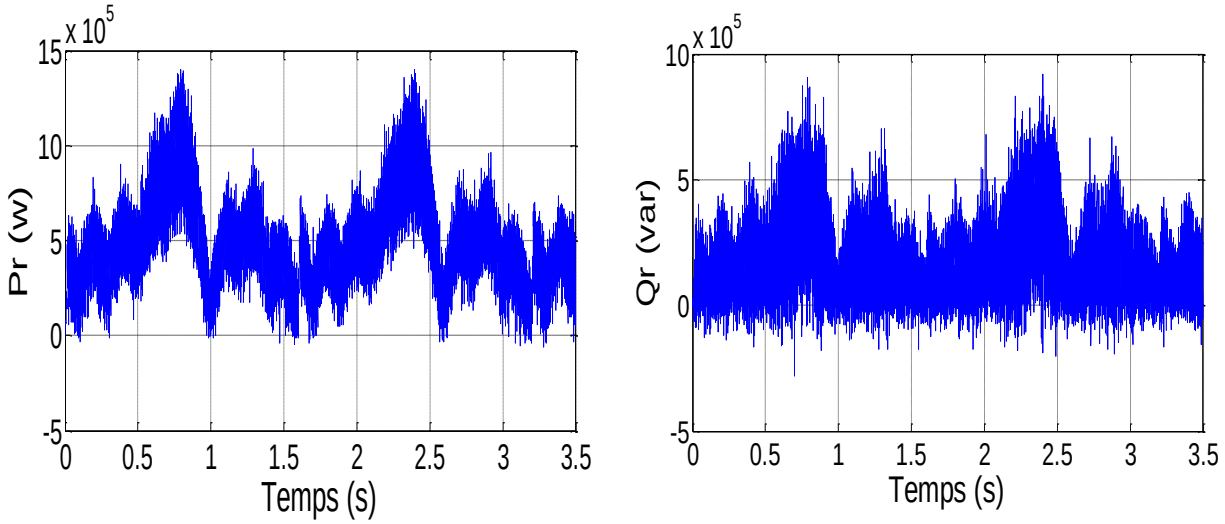


Fig. III.14: Puissance active et réactive du rotor

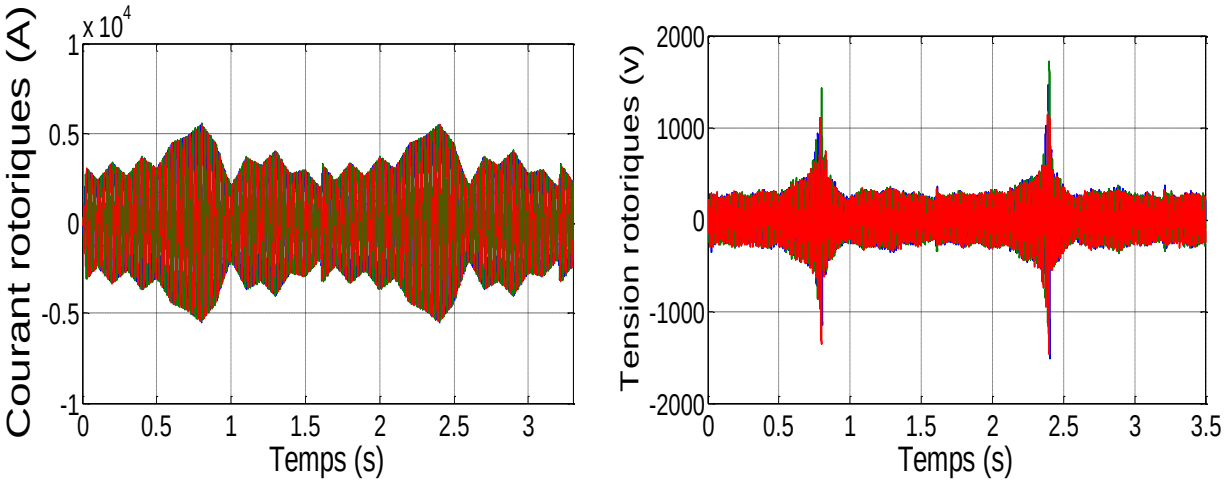


Fig. III. 15: Tensions et courants rotoriques

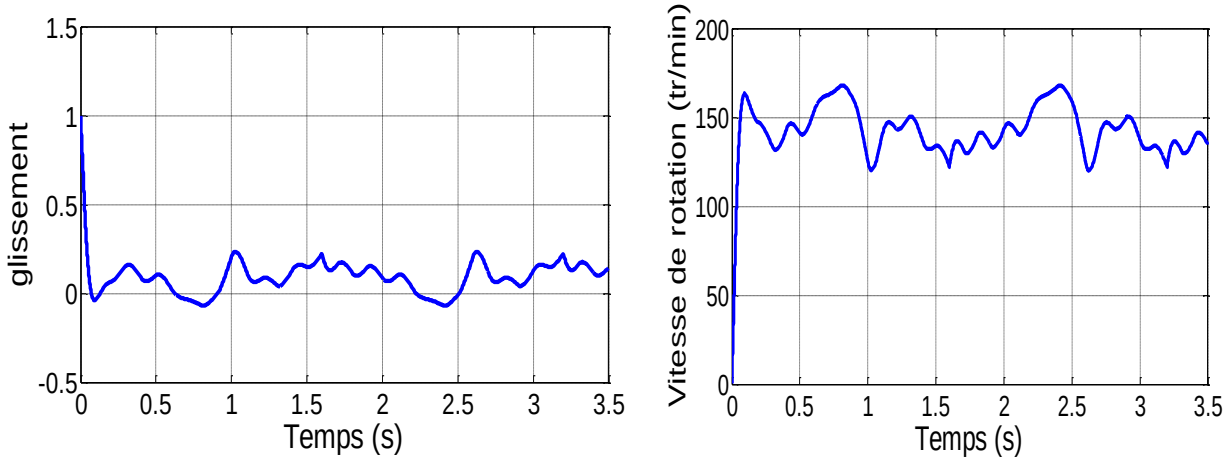


Fig. III. 16: Vitesse de rotation de la génératrice et glissement

Interprétation des résultats

La figure (III.12) présente le profil du vent qui sera appliqué sur la turbine éolienne, sa valeur moyenne est autour de (9 m/s). Une petite variation de la vitesse du vent introduit une grande variation de la puissance extraite car elle est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Cette puissance est appliquée au système de réglage pour que la puissance active du rotor suit cette puissance, et la puissance réactive du stator est réglée suivant les besoins du réseau (correction du facteur de puissance) figure (III.13). On constate que la puissance active du stator suit donc sa référence pour permettre à l'éolienne à fonctionner dans les conditions optimales. Cette manière de fonctionnement est justifiée par la valeur maximale du coefficient de puissance (C_p=0.525).

Comme le montre la courbe de la puissance active rotorique, cette puissance évolue en fonction de la puissance active du stator et la valeur de glissement g ; ce qui vérifie l'expression $Pr=-g*Ps$.

III.7 Robustesse de la régulation

La robustesse des commandes est un point important, car dans un système réel les paramètres de la machine sont soumis à des variations causées par différents phénomènes physiques (Saturation et échauffement). Il en est de même si la mesure des paramètres ne peut s'effectuer avec précision.

L'objectif principal de cette partie est d'étudier l'influence des variations de la résistance rotorique et les inductances sur le comportement de la MADA alimentée par onduleurs à trois niveaux dans type de commande indirecte avec boucle de puissance. Nous avons choisi d'étudié les cas suivants :

1- Variation de la résistance rotorique R_r de 50%.
2- Variation de 30% des inductances propres et mutuelle (L_r, L_s et M).

II.7.1 Robustesse vis-à-vis de la variation de la résistance rotorique

Le fait d'avoir une commande indirecte avec deux boucles imbriquées permet justement d'accroître la robustesse du système. Effectivement, Pour cette commande en remarque que la variation de la résistance rotorique n'a quasiment aucune influence sur le fonctionnement de la génératrice car les deux boucles nous permettent de rattraper les erreurs dues aux termes de compensation qui ne sont plus en rapport avec la bonne valeur de la résistance, ce qui montre encore une fois l'importance de ce type de commande (figures (III.17) et (III.18)).

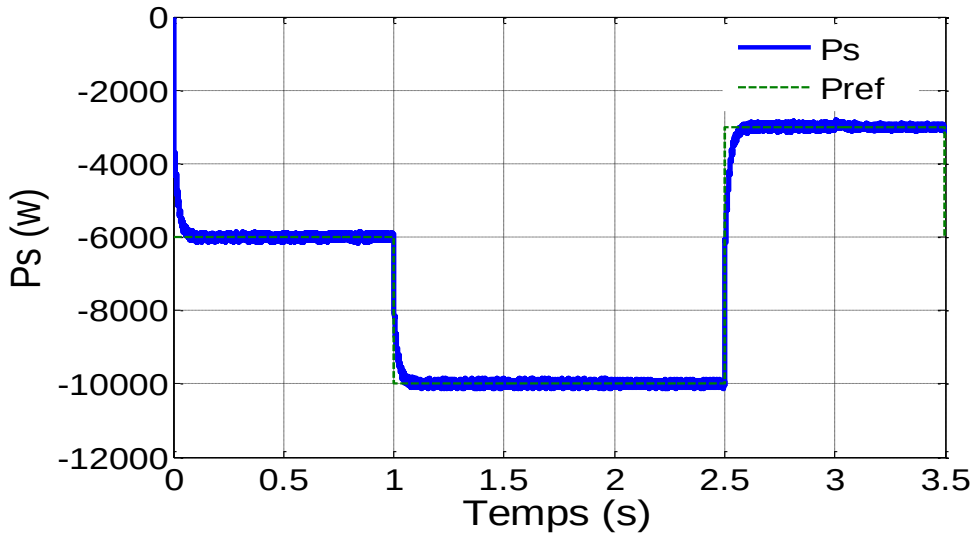


Fig.III.17: Puissance active statorique (Teste de robustesse avec variation de 50% la résistance rotorique)

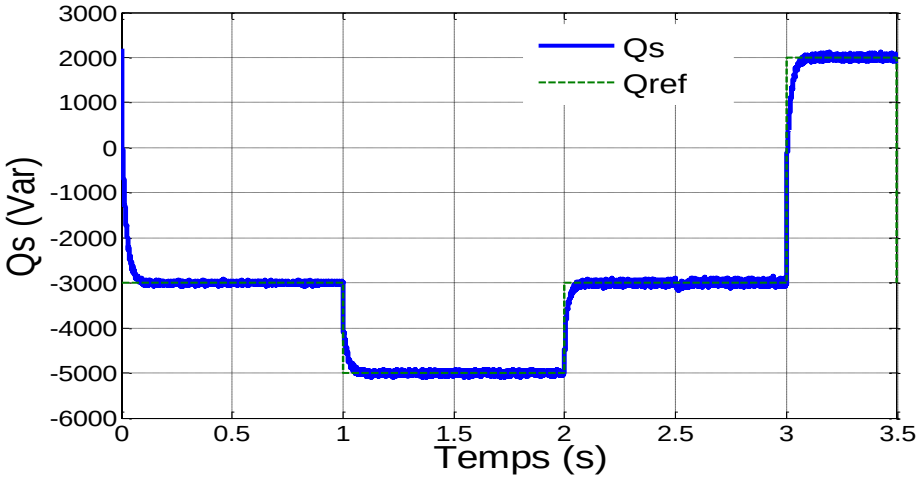


Fig.III.18: Puissance réactive statorique (Teste de robustesse avec variation de 50% la résistance rotorique)

III.7.2 Robustesse vis-à-vis de la variation des inductances

On voit bien que cette variation affecte peu le système. Le contrôle des puissances reste efficace, le suivi des puissances est toujours assuré mais l'on remarque néanmoins que la puissance active et réactive subit également une petite perturbation, mais comme nous avons prévu un régulateur de puissance, ce dernier l'oblige à suivre sa valeur de consigne. La stabilité n'est pas affectée par ces variations de paramètres (figures (III.19) et (III.20)).

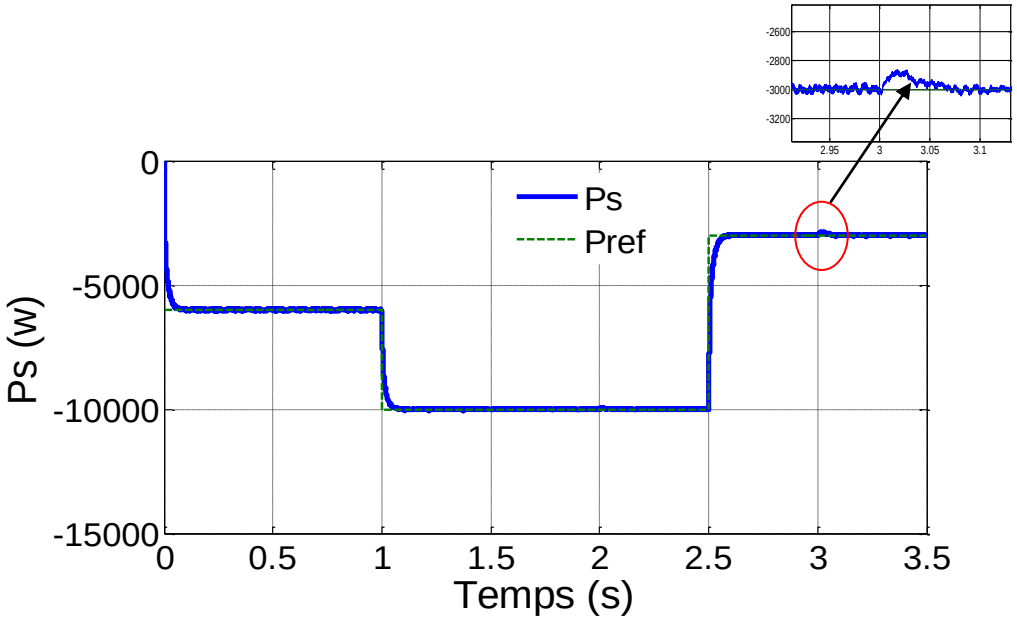


Fig.III.19: Puissance active statorique (Teste de robustesse avec variation L_s ,L_r et M à la fois.)

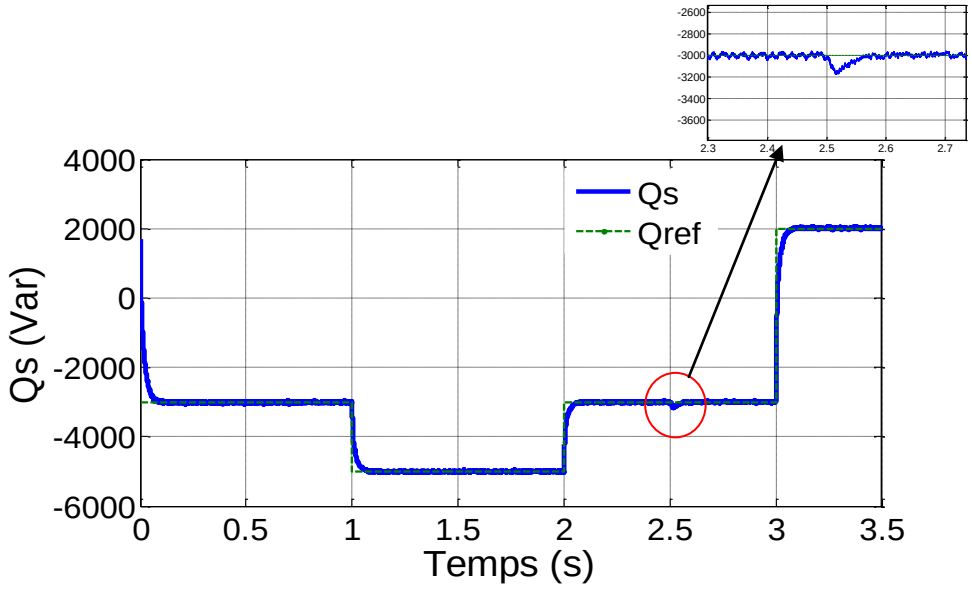


Fig.III.20: Puissance réactive statorique (Teste de robustesse avec variation L_s ,L_r et M à la fois.)

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons appliqué la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la génératrice asynchrone à double alimentation. Le choix de l'orientation du flux a été pris en orientant le flux statorique selon l'axe d. La méthode du flux orienté est appliquée depuis quelques années à la MADA reste la méthode la plus répandue. En effet, celle-ci nous permet non seulement de simplifier le modèle de la machine mais aussi de découpler la régulation puissance. A partir de la simulation numérique, on a constaté qu'effectivement la technique d'orientation du statorique permet de découpler les puissances de sorte que la composante directe du courant rotorique contrôle la puissance réactive, et la composante en quadrature contrôle la puissance active. Ceci nous permet d'obtenir des performances dynamiques élevées similaires à celle de la MCC.

IV.1. Introduction

Les réseaux de neurones sont composés d'éléments simples (ou neurones) fonctionnant en parallèle. Ces éléments ont été fortement inspirés par le système nerveux biologique. Comme dans la nature, le fonctionnement du réseau (de neurone) est fortement influencé par la connections des éléments entre eux. On peut entraîner un réseau de neurone pour une tâche spécifique (reconnaissance de caractères, commande des systèmes …) en ajustant les valeurs des connections (ou poids) entre les éléments (neurone).

Les systèmes à inférence floue sont employés dans de nombreux domaines industriels. Utilisés principalement lorsque le modèle mathématique du système physique est difficile à élaborer, ils exploitent des règles floues tirées d'une expertise humaine pour modéliser le comportement dynamique du système. Ces règles sont de type :
« Si la vitesse est grande et la distance est petite, ALORS freiner très fortement »

Les principaux avantages des techniques floues sont l'approche naturelle de la modélisation et la bonne interopérabilité de la description, en employant des règles linguistiques. Cependant, comme il n'y a aucune méthode formelle pour déterminer ses paramètres (ensembles et règles floues), l'exécution d'un système flou peut prendre beaucoup de temps. Dans ce sens, il serait intéressant de disposer d'algorithmes permettant l'apprentissage automatique de ces paramètres, [1-2].
L'une des méthodes qui permet de répondre à ces exigences est la théorie des réseaux de neurones qui emploie des échantillons (données d'observation) pour l'apprentissage. La combinaison des deux techniques nous donne les systèmes ***neuro-flou***.

Ce chapitre est consacré à l'application du contrôle neuronal pour le réglage des courants rotoriques de la *MADA*, après avoir présenté l'approche neuronale, les réseaux de neurones, ainsi que leurs propriétés, on étudie en profondeur, l'algorithme de rétro-propagation du gradient avec ses propriétés et ses limites d'utilisation. Ensuite, nous présentons les résultats de simulation et le test de robustesse. En fin, nous appliquons l'approche neuro-flou à la commande de la puissance de la MADA.

IV .2 le système neuronal

IV.2.1 neurone biologique

Le cerveau humain possède deux hémisphères latérales reliées par le corps calleux et d'autres ponts axonaux; il pèse moins de deux kilogrammes et contient mille milliards de cellules, dont 100 milliards sont des neurones constitués en réseaux. Les neurones sont des cellules nerveuses décomposables en 4 parties principales (figure IV.1), [35-36]:

- Les dendrites, sur lesquelles les autres cellules entrent en contact synaptique, c'est par les dendrites que se fait la réception des signaux;
- Le corps de la cellule, c'est l'unité de traitement;
- L'axone, où passent les messages accumulés dans le corps de la cellule: l'envoi de l'information se fait par l'axone;
- Les synapses par lesquelles la cellule communique avec d'autres cellules, ce sont des points de connexion par où passent les signaux de la cellule.

Un neurone stimulé envoie des impulsions électriques ou potentielles d'action à d'autres neurones. Ces impulsions se propagent le long de l'axone unique de la cellule. Au point de contact entre neurones, les synapses, ces impulsions sont converties en signaux chimiques. Quand l'accumulation des excitations atteint un certain seuil, le neurone engendre un potentiel d'action, d'une amplitude d'environ 100 *mV* et pendant une durée de 1 *ms*.

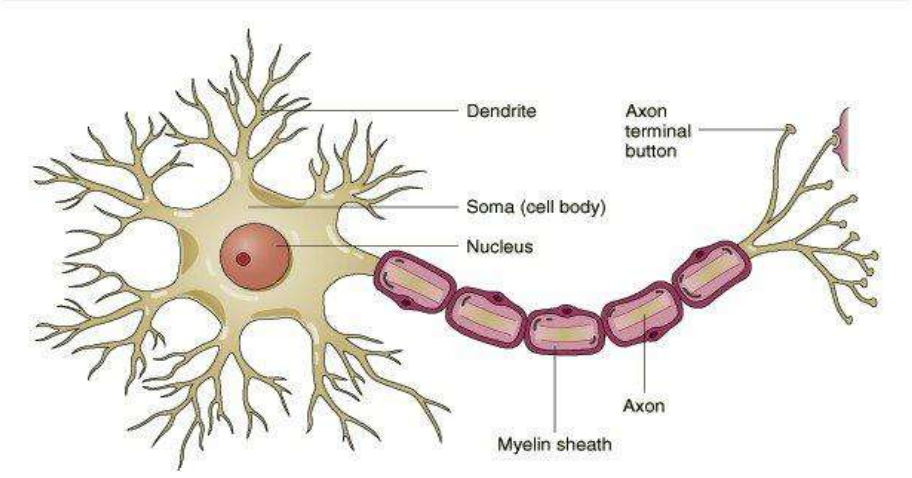


Fig. IV.1 : Schéma d'un réseau de neurones biologiques.

IV.2.2 neurone formel

Un neurone formel ou artificiel est un processeur très simple (simulé sur ordinateur ou réalisé sur circuit intégré) imitant grossièrement la structure et le fonctionnement d'un neurone biologique. La première version du neurone formel est celle de Culloch et Pitts, a été en 1943, [3-4]. C'est un automate binaire qui réalise une somme pondérée de ses entrées (le potentiel) et compare ce potentiel à un seuil (nul) : s'il est supérieur, la sortie vaut +1 et le neurone est actif, s'il est inférieur, la sortie vaut -1 et le neurone est inactif. Il existe aujourd'hui d'autres types de neurones, mieux adaptés aux tâches de traitement du signal ou de classification, dont la sortie n'est pas le signe de leur potentiel, mais une fonction *f* non linéaire dérivable de ce potentiel, telle que une tangente hyperbolique; cette fonction est dite fonction d'activation du neurone (Fig IV.2), [5].

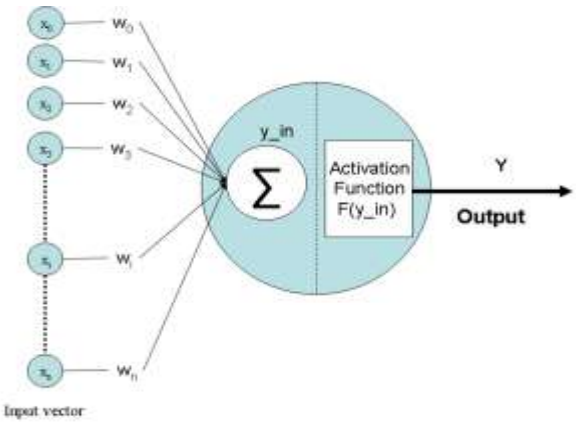


Fig. IV.2 : Schéma d'un neurone formel.

Les entrées du neurone sont désignées par x_i (i =1..n). Les paramètres w_i reliant les entrées aux neurones sont appelés poids

IV.2.3 réseaux de neurones artificiels

On distingue deux grands types d'architectures de réseaux de neurones.

IV.2.3.1 Les réseaux non bouclés

Le temps n'est pas un paramètre significatif et la modification de l'entrée n'entraîne qu'une modification stable de la sortie et n'entraîne pas de retour d'information vers cette entrée. Ces architectures sont les plus couramment utilisées, [40].

IV.2.3.2. les réseaux bouclés

Les réseaux bouclés possèdent une structure similaire à celle des réseaux non bouclés mais complétée par des connexions entre éléments de la même couche ou vers des couches amont. Ces réseaux sont assez puissants car leur fonctionnement est séquentiel et adopte un comportement dynamique, [41].

IV.2.4 apprentissage des réseaux de neurones

L'apprentissage d'un réseau de neurones signifie qu'il change son comportement de façon à lui permettre de se rapprocher d'un but défini. Ce but est normalement l'approximation d'un ensemble d'exemples ou l'optimisation de l'état du réseau en fonction de ses poids pour atteindre l'optimum d'une fonction économique fixée à priori. Il existe trois types d'apprentissages principaux. Ce sont l'apprentissage supervisé, l'apprentissage non-supervisé et l'apprentissage par renforcement, [42].

IV.2.4.1 apprentissage supervisé

L'apprentissage supervisé est l'adaptation des coefficients synaptiques (poids) d'un réseau afin que pour chaque exemple, la sortie du réseau corresponde à la sortie désirée.

IV.2.4.2 apprentissage non supervisé

L'apprentissage est non-supervisé lorsque l'adaptation des poids ne dépend que des critères internes au réseau. L'adaptation se fait uniquement avec les signaux d'entrées. Aucun signal d'erreur, aucune sortie désirée n'est prise en compte.

IV.2.4.3 Apprentissage par renforcement

L'apprentissage est de type par renforcement lorsque le réseau de neurones interagit avec l'environnement. L'environnement donne une récompense pour une réponse satisfaisante du réseau et assigne une pénalité dans le cas contraire. Le réseau doit ainsi découvrir les réponses qui lui donnent un maximum de récompenses, [41].

Le choix d'utiliser telle ou telle architecture de réseau de neurones, tel ou tel type d'apprentissage dépend de l'application mais aussi des capacités de traitement du système sur lequel ces architectures vont être implantées.

IV.2.5. Rétro propagation

La rétro propagation est actuellement la règle la plus utilisée pour l'apprentissage supervisé des réseaux neuronaux; c'est une technique de calcul des dérivées qui peut être appliquée à n'importe quelle structure de fonctions dérivables. Elle est généralement utilisée pour des réseaux de neurones multicouches appelés aussi perceptrons, [38], [43-45].

IV.2.5.1. principe de la rétro propagation

Soit un réseau multicouches non récurent à ***m*** entrées et ***n*** sorties, composé de *l* couches (*l*-1 couches cachées + couche de sortie), les états des neurones de la couche ***k*** sont données par les équations suivantes :

$$O_i^k\ (t)=f^k\ [S_i^k\ (t)] \qquad i=1,2,\ldots\ldots n_k \qquad \text{(IV.1)}$$

$$S_i^k(\mathrm{t})=\sum_{j=0}^{n_{k-1}} W_{ij}^k\, O_i^{k-1}(\mathrm{t}) \qquad k=1,2\ldots l \qquad \text{(IV.2)}$$

Avec pour la couche *k* :

f^k : La fonction d'activation;

n_k : Le nombre de neurones;

O_i^k: La sortie du neurone *i*;

W_{ij}^k: Le coefficient synaptique de la connexion entre le neurone *i* de la couche *k* et le neurone *j* de la couche précédente *k-1*.

On dispose d'un ensemble d'échantillons représentatif d'apprentissage qui est un ensemble de couples (entrées/sorties). L'objectif est d'adapter les poids *W* de façon à minimiser la valeur moyenne de l'erreur quadratique globale sur l'ensemble d'apprentissage exprimée par :

$$\mathrm{E}=\frac{1}{2}\sum_{t=1}^{T} E(\mathrm{t})E(t)^t=\frac{1}{2}\sum_{t=1}^{T}[y^d(\mathrm{t})-\ y\ (\mathrm{t})][y^d(t)-y(t)]^t \qquad \text{(IV.3)}$$

Où :

y^d: est le vecteur de sortie désiré;

y : est le vecteur de sortie du réseau neuronal;

T : est la longueur de l'ensemble d'apprentissage.

On commence l'opération d'apprentissage par un choix aléatoire des valeurs initiales des poids. A chaque étape, les échantillons sont présentés à l'entrée du réseau, après propagation, la sortie du réseau et l'erreur globale correspondante, sont disponibles, [11]. Par rétro propagation de l'erreur globale, les gradients de cette erreur par rapport à tous les poids sont calculés et les paramètres sont ajustés dans la direction opposée à celle de ces gradients de l'erreur globale par exemple, en appliquant la loi d'adaptation suivante :

$$W_{ij}^{k}(n)=W_{ij}^{k}(n-1)+\Delta W_{ij}^{k}(n) \quad (IV.4)$$

$$\Delta W_{ij}^{k}(n)=-\mu \frac{\delta E}{\delta W_{ij}^{k}(n)} \quad (IV.5)$$

Le réajustement des biais se fait de la même manière que les poids. Où μ est une constante positive appelée taux ou pas d'apprentissage et *n* est le numéro de l'itération. Cette adaptation peut se faire par deux techniques :

- **Première technique**

Les poids sont adaptés au passage de chaque exemple, et l'apprentissage se fait en temps réel. Cette adaptation rend le processus plus sensible à chaque exemple individuellement ce qui n'est pas conseillé dans le cas de la classification d'entrées.

- **Seconde technique**

Les poids ne sont adaptés qu'après le passage de tous les exemples d'entraînement. La réadaptation est alors, plus prudente. En effet, le réajustement se fait suivant la moyenne de tous les exemples et la méthode est donc moins sensible au bruit que peuvent contenir les exemples. C'est donc une méthode plus robuste et si l'application ne nécessite pas un apprentissage en temps réel, cette technique est préférable à la première, [37].

IV.2.5.2 Algorithme d'apprentissage

L'algorithme d'apprentissage est composé de quatre étapes :

Etape 1 : Initialiser les poids w_{ij}^{k} avec de petites valeurs généralement dans l'intervalle [-1,1].

Etape 2 : Présenter un exemple et calculer la sortie et l'erreur correspondante en utilisant les équations (IV.1), (IV.2), (IV.3), (IV.4) et (IV.5).
Etape 3 : Calculer les dérivées partielles de l'erreur par rapport à chaque poids.

- Pour la première technique :

- Mettre $\Delta W_{ij}^{k}(n)=[\Delta W_{ij}^{k}(n)]_p$
- Aller à l'étape 4.

- Pour la deuxième technique :

- Si $P \neq T$ retourner à l'étape 2

- Sinon, $\Delta W_{ij}^{k}(n)=\sum_{t=1}^{T}[\Delta W_{ij}^{k}(n)]$

Etape 4 : Ajuster les paramètres par l'équation (IV.4). Répéter les étapes de 2 à 4 jusqu'à ce que le nombre maximal d'itérations soit atteint ou jusqu'à ce que le seuil de l'erreur fixé soit atteint.

IV.2.5.3 Etude du taux d'apprentissage

La vitesse de convergence dépend de la constante μ., sa valeur est généralement choisie expérimentalement en respectant un compromis entre la vitesse de convergence et la précision des résultats. Si μ est trop petit la convergence et lente mais la direction de descente est optimale. Si μ est trop grand, la convergence est rapide mais la précision est médiocre.

Le mieux est de choisir un taux d'apprentissage adaptatif. Un choix d'un taux d'apprentissage décroissant avec l'évolution de l'apprentissage est dans la plupart des cas, bénéfique. Actuellement il existe des méthodes qui choisissent un taux optimal à chaque itération, [45-48].

Une autre technique ,plus simple pour la modification du taux d'apprentissage, consiste à mettre en œuvre un algorithme qui a pour rôle de contrôler l'erreur d'entraînement à chaque étape. Ainsi à chaque fois que l'erreur présente dépasse l'erreur précédente d'un certain seuil précédemment fixé une augmentation des oscillations apparaît; d'où risque de divergence. Pour cela on rejette les poids générés et on revient au point précèdent, en diminuant le taux d'apprentissage. Si par contre l'erreur diminue, les poids générés sont retenus et le taux est

augmenté. De cette manière, on essaye à chaque étape d'avancer le plus rapidement possible vers l'optimum tout en évitant la divergence de l'algorithme. Cette méthode donne une convergence plus rapide avec une bonne précision d'entraînement, [43-44], [49]. Pour éviter le problème des oscillations, beaucoup d'auteurs modifient l'algorithme en lui ajoutant un moment, [50]. La loi d'adaptation devient :

$$W_{ij}^{k}(n)=W_{ij}^{k}(n-1)+\Delta W_{ij}^{k}(n)+\beta\Delta W_{ij}^{k}(n-1) \qquad \text{(VI .6)}$$

IV.2.6 Commande par réseaux de neurones de la MADA

Dans notre travail, Le réseau statique multicouche utilisé comme contrôleur neuronal possède une couche d'entrée de 2 neurones, une couche cachée de 21 neurones et une couche de sortie à 1 neurone. Les fonctions d'activation des deux premières couches est la fonction sigmoïde, tandis que la fonction linéaire est utilisée pour la couche de sortie. Le schéma global de la commande neuronale de MADA est représenté dans la fig (IV.3).

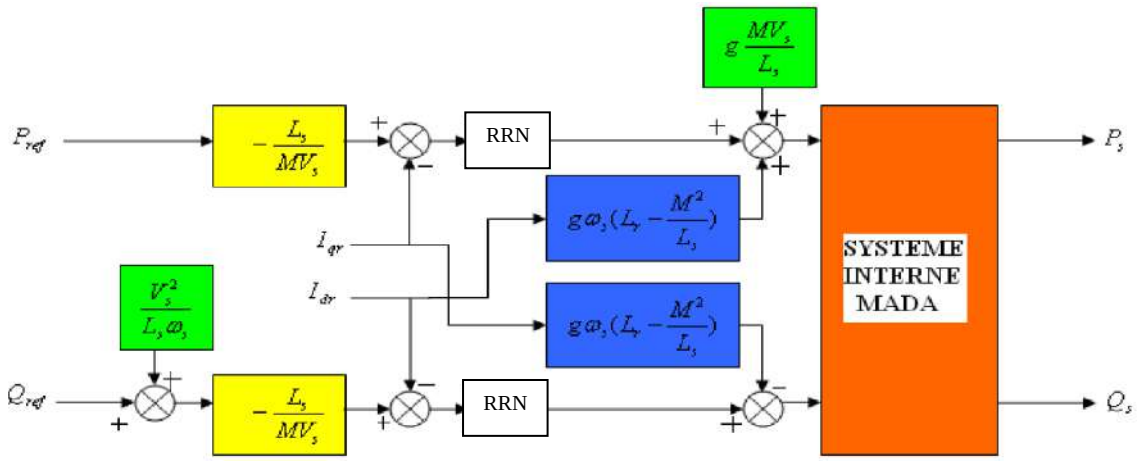


Fig. IV.3. Schéma bloc global de commande de la MADA par les réseaux de neurones.

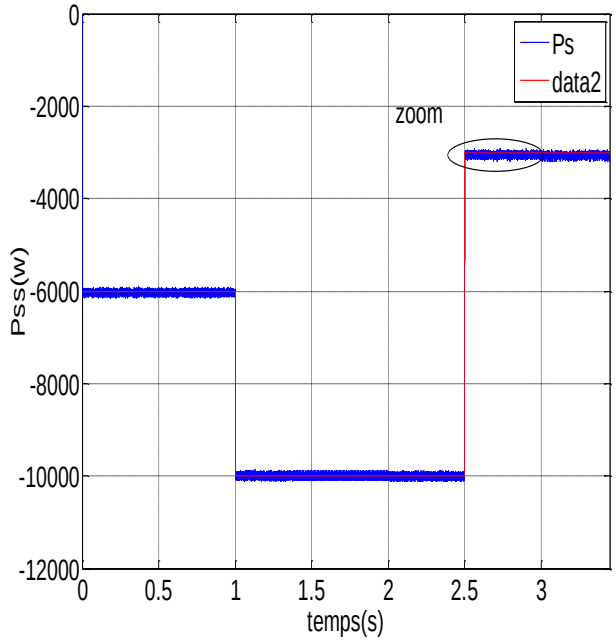
IV.2.7. résultats de simulation

Dons cette partie, une étude comparative des performances de la commande en puissance de la MADA a été effectuée pour deux type de régulateurs :

1- réglage de la puissance par réseaux de neurones.
2- réglage des puissances en utilisant la logique-flou type 2. où les résultats utilisés sont basés sur le travail présenté dans [56] cette technique nous permet de minimiser l'erreur statique d'une façon considérable

Les figure(IV-4 ,5,6,7,…,11) présentent les résultats de simulation des puissances (active et réactive) dans le stator et le rotor, les courants rotoriques (idr, iqr), Le flux statorique selon l'axe (d ,q) et Le couple électromagnétique.

Puissance active statorique



Zoom de Puissance active statorique

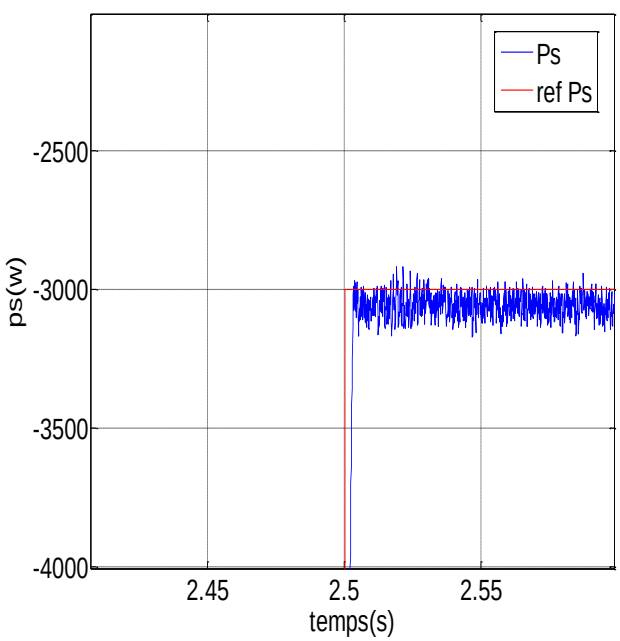
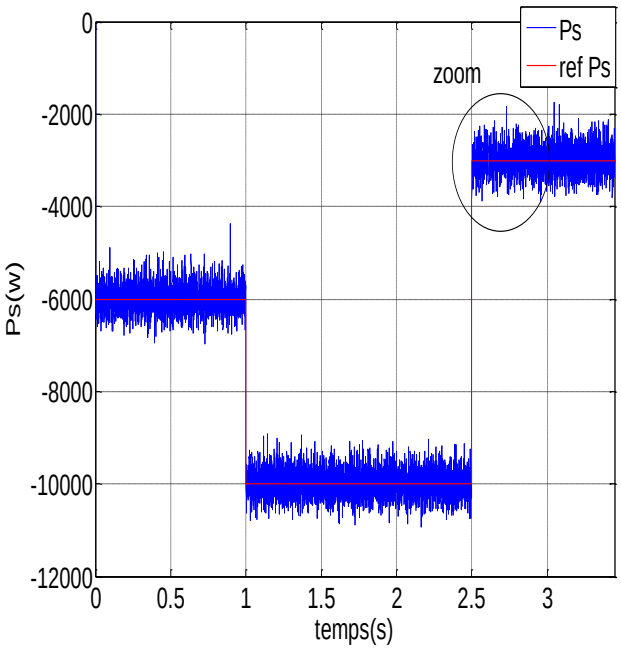


Fig. IV.4 : réglage de la MADA par RRN

Puissance active statorique



Zoom de Puissance active statorique

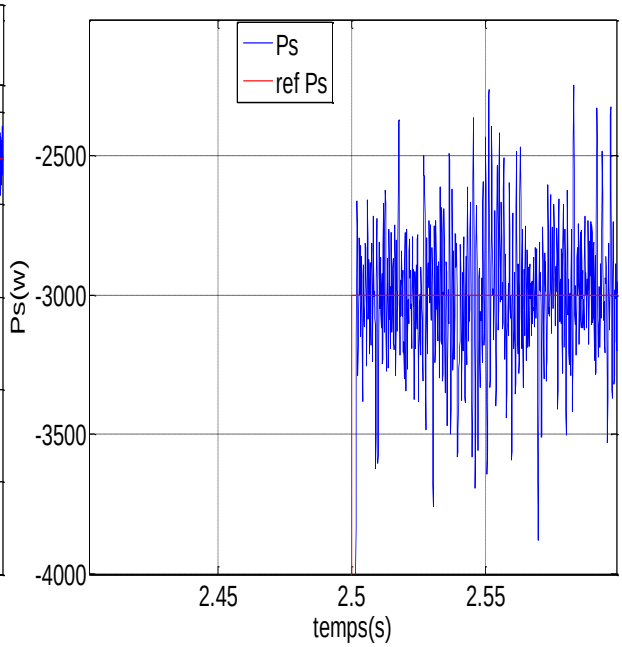


Fig. IV.5 : Réglage de la MADA par R LF

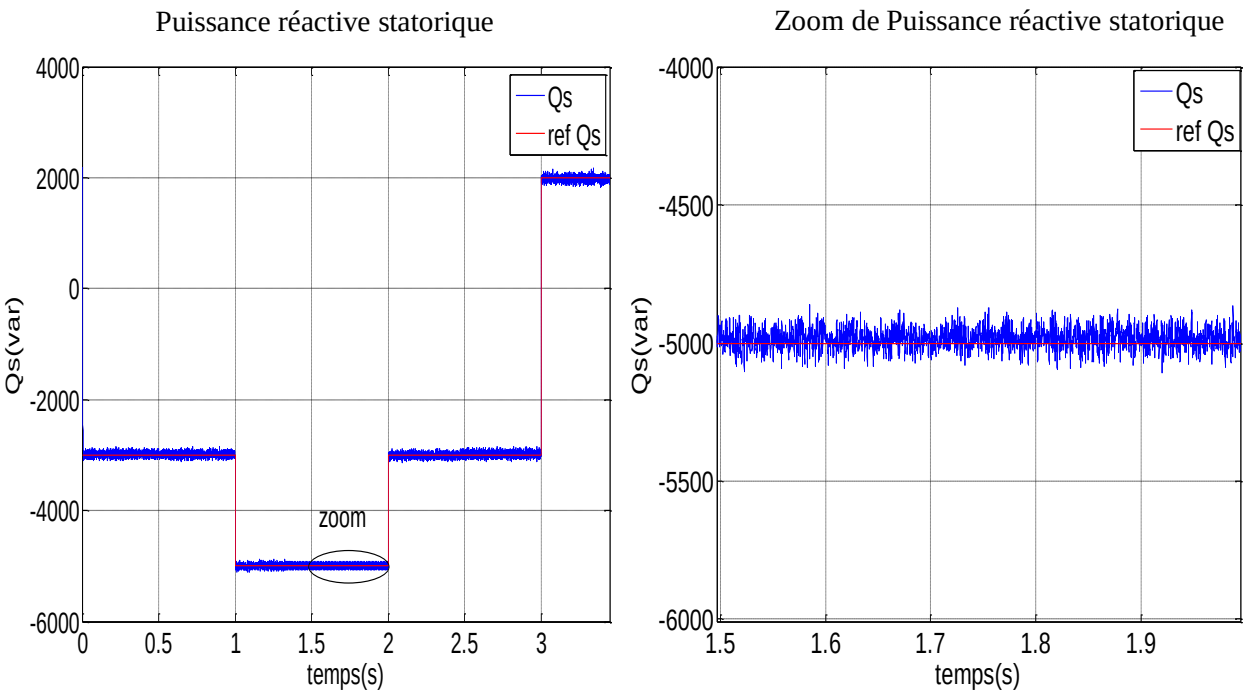


Fig. IV.6 : Réglage de la MADA par RRN

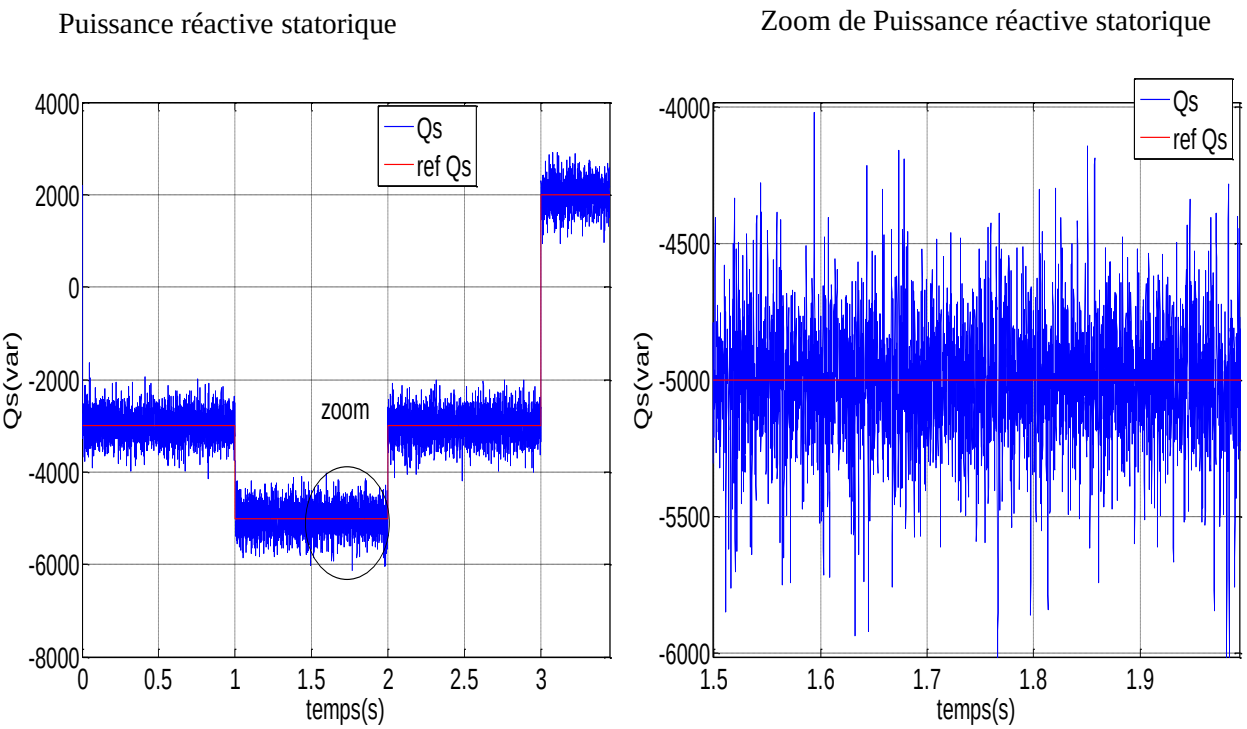


Fig. IV.7 : Réglage de la MADA par RLF

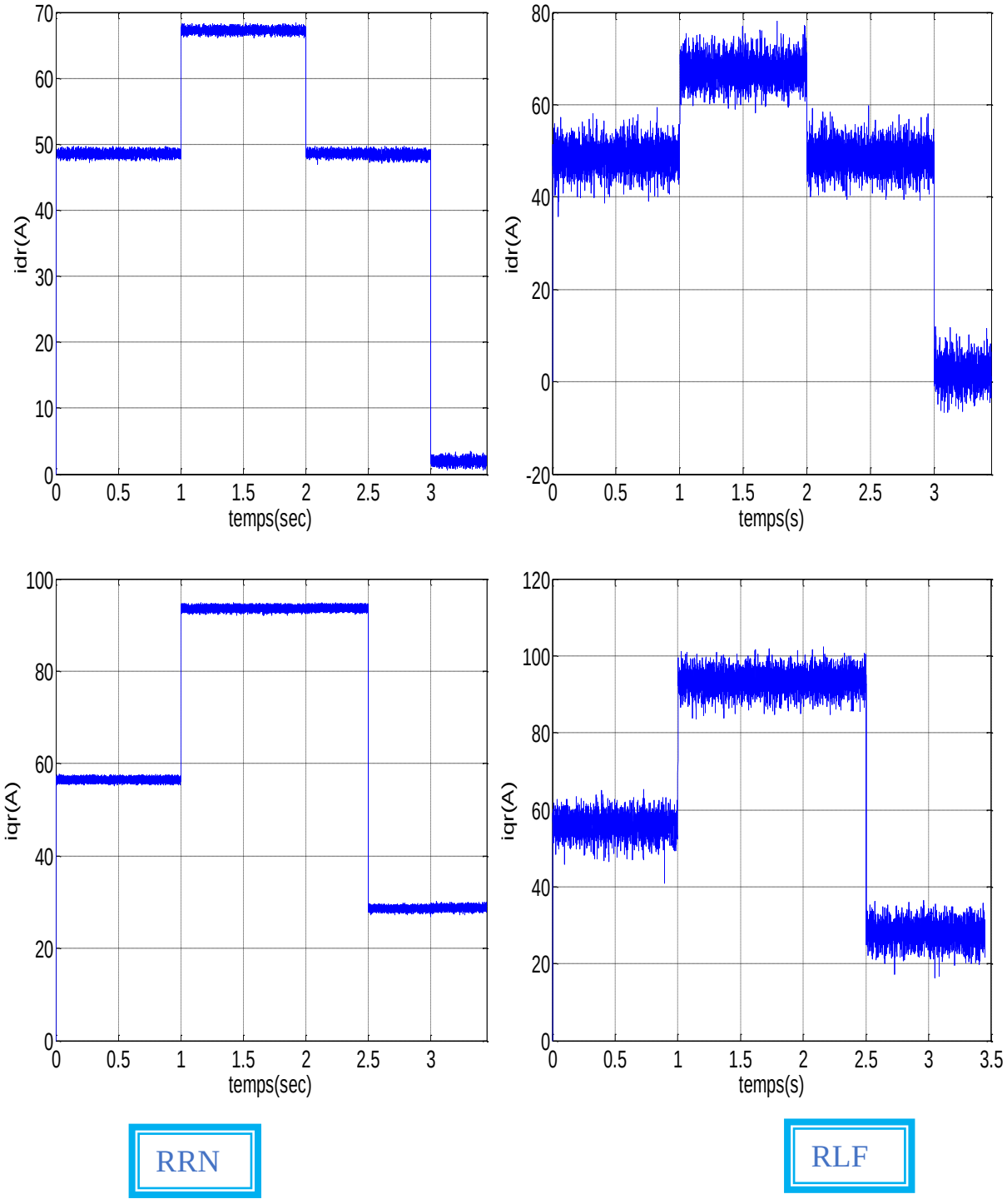


Fig. IV.8 : courant rotorique selon l'axe d et q

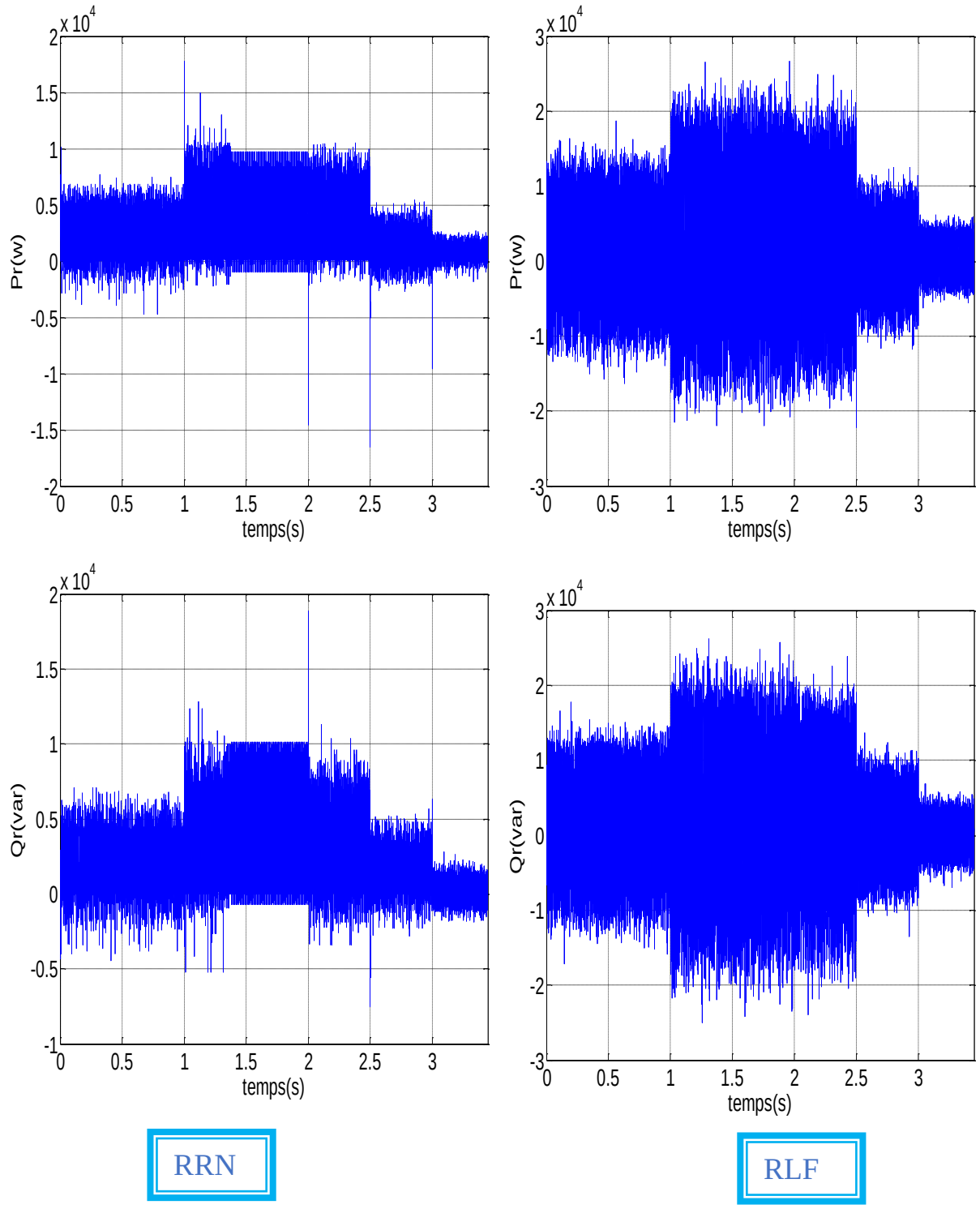


Fig. : IV.9 Puissance active et réactive du rotor

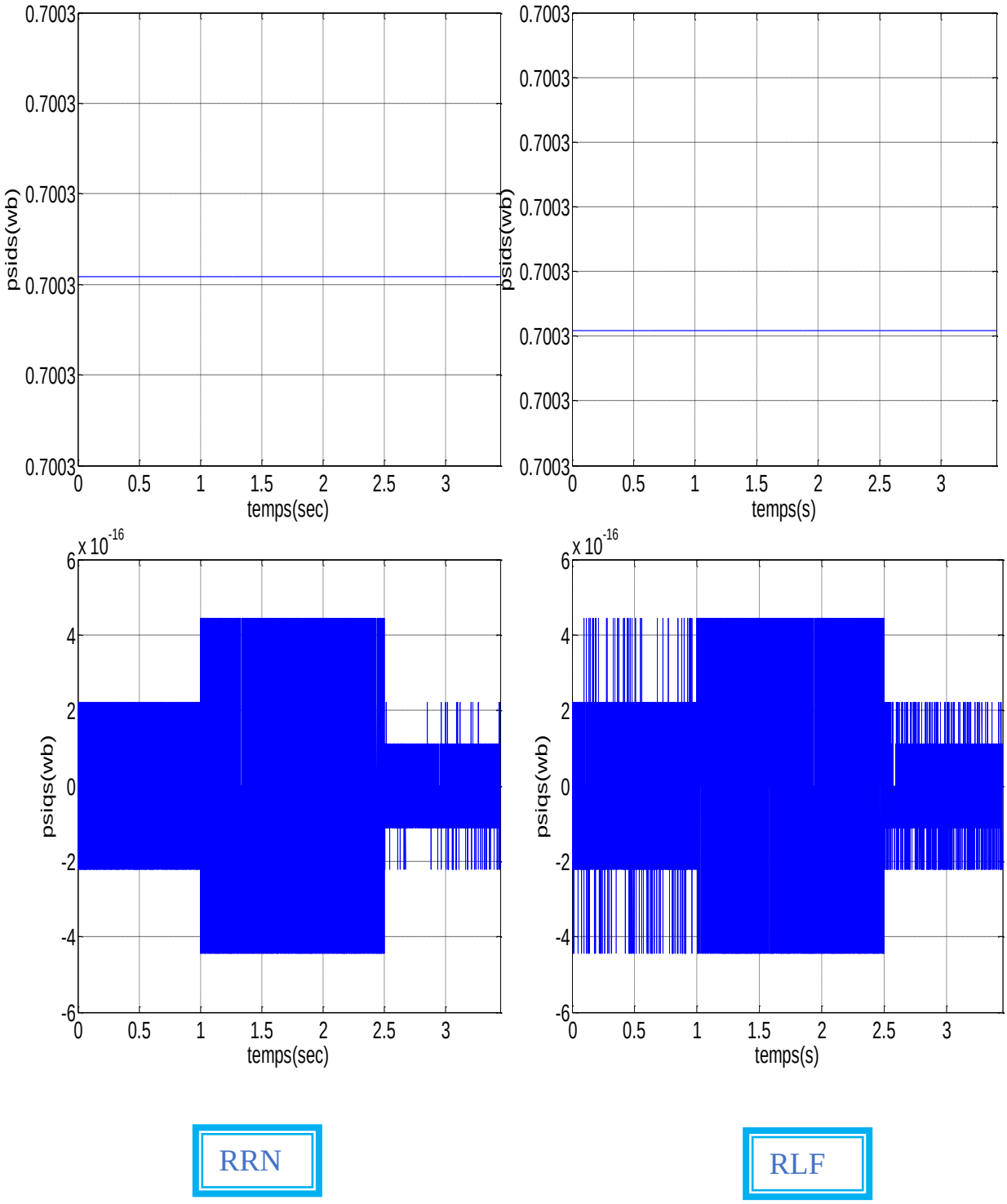


Fig. IV.10 Le flux statorique selon l'axe d et q

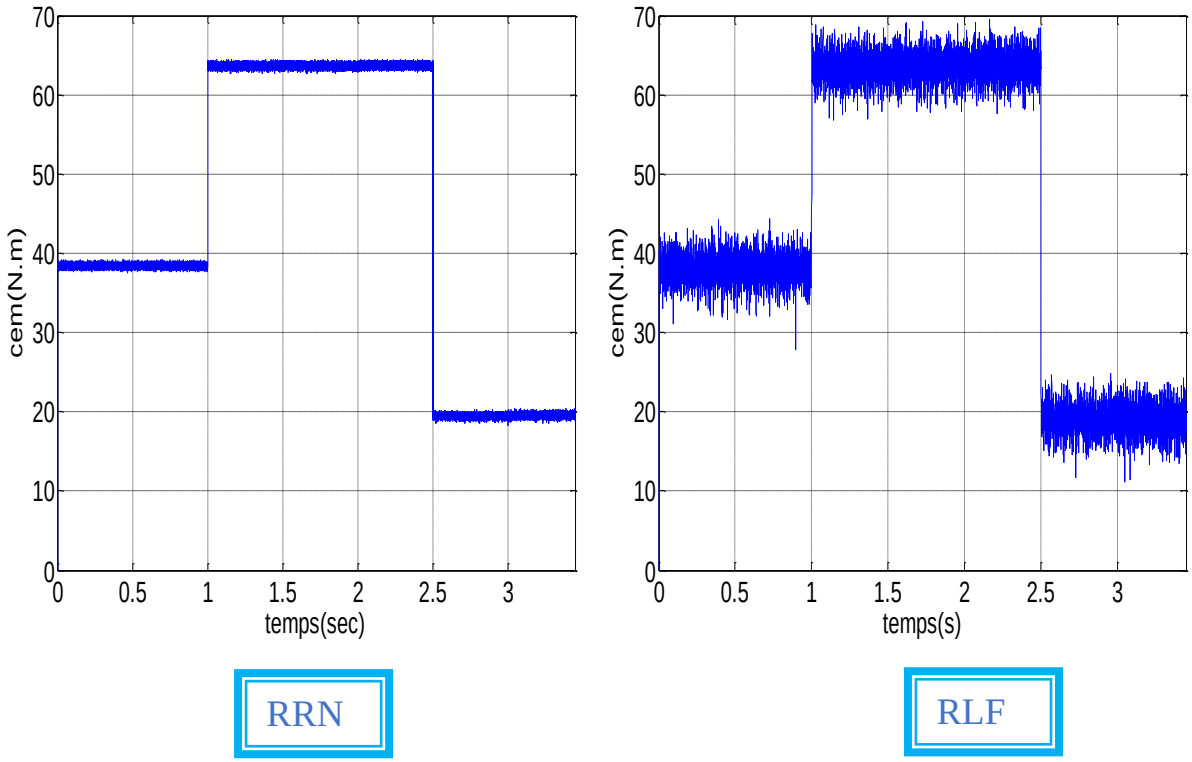


Fig. IV.11 Le couple électromagnétique

IV-2.8 interprétation des résultats :

A Partir des résultats de simulation, on constate que :

- les puissances active et réactive suivent parfaitement leurs références.
- La commande par réseaux de neurones de la MADA permet de réduire nettement les oscillations des puissances active et réactive.

IV.3 systeme neuro-flou

Les systèmes neuro-flous sont des systèmes flous formés par un algorithme d'apprentissage inspiré de la théorie des réseaux de neurones. La technique d'apprentissage opère en fonction de l'information locale et produit uniquement des changements locaux dans le système flou d'origine. Les règles floues codées dans le système neuro-flou représentent les échantillons imprécis et peuvent être vues en tant que prototypes imprécis des données d'apprentissage, [53].

Un système neuro-flou ne devrait par contre pas être vu comme un système expert (flou), et il n'a rien à voir avec la logique floue dans le sens stricte du terme. On peut aussi noter que les systèmes neuro-flous peuvent être utilisés comme des approximateurs universels, [54].

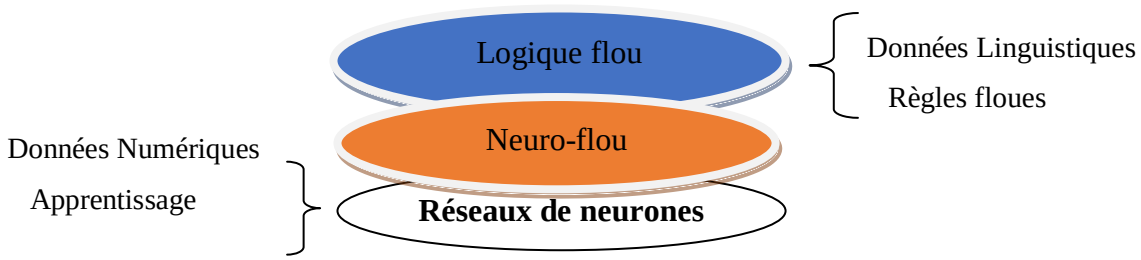


Fig. IV.12 Principe du Neuro-flou

IV.3.1 avantages et inconvénients de la logique floue et des réseaux de neurones

L'utilisation simultanée des réseaux de neurones et de la logique floue, permet de tirer les avantages des deux méthodes : les capacités d'apprentissage de la première et la lisibilité et la souplesse de la seconde.

Afin de résumer l'apport du neuro-flou, le Tableau (IV.1) regroupe les avantages et les inconvénients de la logique floue et des réseaux de neurones, [53].

Les systèmes neuro-flous sont créés afin de synthétiser les avantages et de surmonter les inconvénients des réseaux neuronaux et des systèmes flous.

Les algorithmes d'apprentissage peuvent être employés pour déterminer les paramètres des systèmes flous. Ceci revient à créer ou améliorer un système flou de manière automatique, au moyen des méthodes spécifiques aux réseaux neuronaux.

Un aspect important est que le système reste toujours interprétable entermes de règles floues, vu qu'il est basé sur un système flou.

Tableau (IV.1) : regroupe les avantages et les inconvénients de la logique floue et des réseaux de neurones.

Réseaux de neurones	**Logique floue**
Avantages	
• Aucune connaissance basée sur les règles. • Le modèle mathématique non requis. • Plusieurs algorithmes d'apprentissage sont disponibles	• La connaissance antérieure sur les règles peut être utilisée. • Le modèle mathématique non requis. •Une interprétation et implémentation simple.
Inconvénients	
• Boite noire (manque de traçabilité). • L'adaptation aux environnements différents est difficile et le réapprentissageest souvent obligatoire. • la connaissance antérieure ne peut pas être employée (apprentissage à partir de zéro). • Aucune garantie sur la convergence de l'apprentissage.	• Ne peut pas apprendre. • Les règles doivent être disponibles. • Adaptation difficile au changement de l'environnement. • Aucunes méthodes formelles pour l'ajustement.

Tableau IV.1 Comparaison entre la logique floue Et les réseaux de neurones

IV.3.2 Le système neuro-flou hybride :

Les approches neuro-floues modernes sont de cette forme :. Un réseau neuronal et un système Flou sont combinés dans une architecture homogène. Le système peut être interprète comme un réseau neuronal spécial avec des paramètres flous ou comme un système flou mis en application sous une forme distribuée parallèle (fig IV.13).

Dans ce modèle, les algorithmes d'apprentissage des systèmes de neurones sont utilises pour déterminer les paramètres du système d'inférence floue. Le système neuro-flou partage la structure des données et la représentation de connaissance .Le SIF peut utiliser l'expertise humaine pour implémenter les composantes essentielles dans la base de connaissance et la base de données et exécute le raisonnement flou pour inférer la valeur de sortie totale.

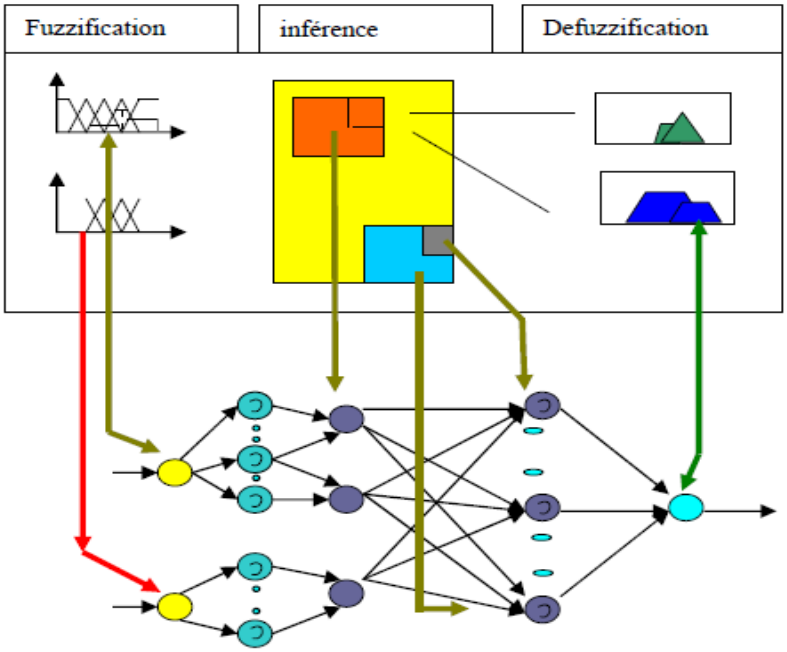


Fig .IV.13 Principe de fonctionnement du neuro-flou hybride.

IV.3.3 Le système neuro-flou hybride de type Mamdani

Le système neuro-flou hybride de Mamdani utilise la technique d'apprentissage supervisé (retro propagation) pour faire un apprentissage des paramètres de fonctions d'appartenance .
L'architecture du système neuro-flou hybride de Mamdani est illustre sur la fig (IV.14) [55]
Les détails de chaque couche sont ainsi présentes :

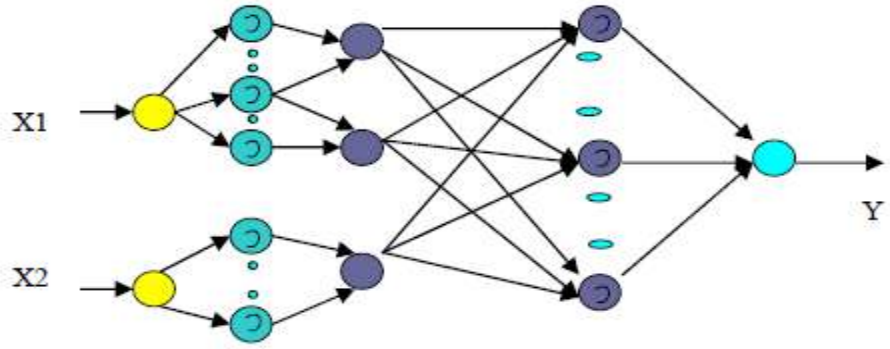


Fig .IV.14 Le système neuro-flou de Mamdani.

- **la couche 1** (la couche d'entrée) :

Aucun calcul n'est fait dans cette couche. Chaque nœud dans cette couche qui correspond à une variable d'entrée transmet seulement et directement des valeurs d'entrée a la prochaine couche. Le poids du lien dans la couche 1 est de 1.

- **La couche 2** (la couche de fuzzification):

Chaque nœud dans cette couche correspond a un terme linguistique (excellent, bon, etc.) a une des variables d'entrée dans la couche 1. En d'autres termes, le lien de la production représente la valeur d'appartenance qui spécifie le degré auquel une valeur d'entrée appartient a un ensemble flou est calcule dans couche 2.

Un algorithme de regroupement décidera du nombre initial et du type de fonctions d'appartenance qui doit être alloue a chacun de la variable d'entrée. Les dernières formes du MFS seront règle pendant l'apprentissage du système.

- **La couche 3** (la couche de permise des règles):

Un nœud dans cette couche représente la partie antérieure d'une règle. Habituellement un operateur t-norme est utilise dans ce nœud. La sortie d'un nœud de la couche 3 représente la «force du tir » de la règle floue correspondante.

- **La couche 4**(la couche du partie conclusion des règles) :

Ce nœud a deux taches fondamentalement : combiner les nouveaux antécédents des règles, et déterminer le degré auquel ils appartiennent a la variable linguistique de sorties (haut, moyen, bas, etc.).

Le nombre de nœuds dans cette couche sera égal au nombre de règles.

- **La couche 5** (la couche de combinaison et de defuzzification) :

Ce nœud fait la combinaison de tous le conséquents des règles qui utilise un Operateur t-conorme et finalement calcule la sortie après defuzzification.

IV.3.4 Le système neuro-flou de type takagi-sugeno

Les systèmes neuro-flous de type Takagi-Sugeno font usage d'un mélange d'algorithme de retro propagation pour faire un apprentissage des fonctions d'appartenance et la méthode des moindres carrés pour déterminer les coefficients des combinaisons linéaires dans les conclusions des règles.

L'architecture du système neuro-flou hybride de TS est illustre sur la fig (IV.15) Les détails de chaque couche sont ainsi présents:

- **Les couches 1**,**2** et **3** sont les même que celle du modèle de Mamdani.
- **La couche 4** (normalisation des poids de la règle):

Chaque nœud dans cette couche calcule le coefficient de l'i^{eme} règle à la somme de toutes les règles

$$\overline{w} = \frac{w_i}{w_1+w_2}, i = 1 \qquad \text{(IV.1)}$$

- **la couche 5** : chaque nœud ***i*** de cette couche est une nœud fonctionnel

$$\overline{W}_i \, f_i = \overline{w}(p_i \, x_1 + q_i x_2 + r_i) \qquad \text{(IV.2)}$$

tel que w_i est une sortie de la couche 4, et $\{p_i, q_i, r_i\}$ sont des paramètres des ensembles.

Un chemin bien établi est de déterminer les paramètres conséquents qui utilisent l'algorithme des moindres carres.

- **La couche 6** (la couche d'inférence des règles) : Le seul nœud de cette couche calcule la somme total des sorties de touts les signaux.

$$\sum_i \overline{w_i} \, f_i = \frac{\sum_i w_i \, f_i}{\sum_i w_i} \qquad \text{(IV.3)}$$

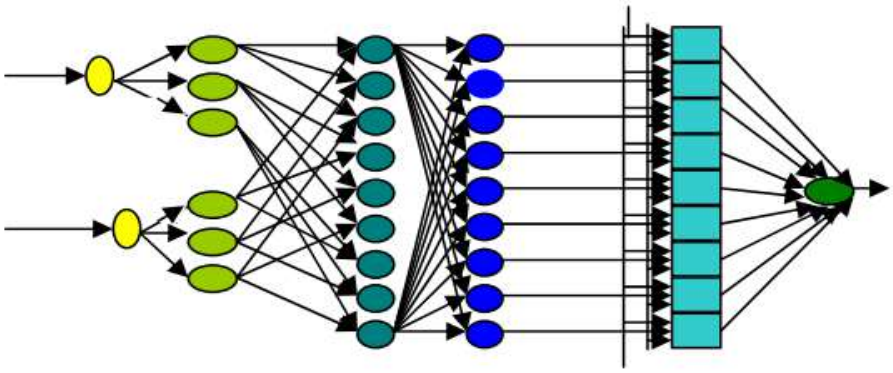


Fig. IV.15 Le réseau de neuro-flou de takagi-sugeno

IV.3.5 Les avantages des systèmes neuro-flous :

Le tableau IV.2 présente une comparaison entre la commande par logique flou type 2, réseau de neurones et neuro-flou.

Les réseaux de neurones Artificiels	**Système d'inférence Flou**	**Système Neuro-flou**
La base de règle ne peut être Utilisée	La base de règle peut être utilisée	La base de règle peut être utilisée.
L'apprentissage peut être démarre de zéro	Pas d'apprentissage (utilise la connaissance linguistique).	L'apprentissage peut être démarre de zéro ou avec une base de règles initiale
Boite noire	Interprétable (la règle IF-THEN)	Une interprétation et implémentation simples
Complexité des algorithmes d'apprentissage	Universel et implémentation simple	Le modèle mathématique non requis
Difficulté pour extraire les Connaissances	Les connaissances doivent être disponible	Simple pour extraire de connaissances a partir des données (qualitatif, quantitatif).

Tableau IV.2. Les avantages des systèmes neuro-flous.

IV.3.6 Applications des systèmes neuro-flou au réglage des puissances de la MADA

La fig(IV.16) représente le schéma bloc de la commande neuro-flou de la MADA ainsi
On a remplacé les régulateurs par réseaux de neurones par des régulateurs neuro-flou

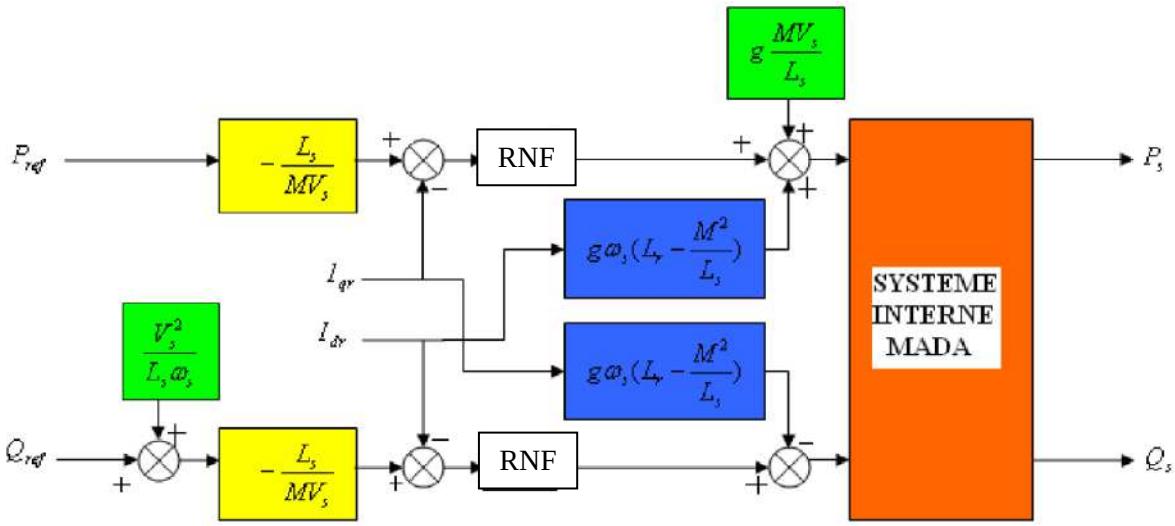


Fig. IV.16 Schéma bloc global de la commande neuro-floue de la MADA

IV.3.7. Résultats de simulation

Les résultats de simulation de la commande neuro-flou de la MADA sont donné par les figures suivantes :

Puissance active statorique RNF zoom Puissance active statorique RNF

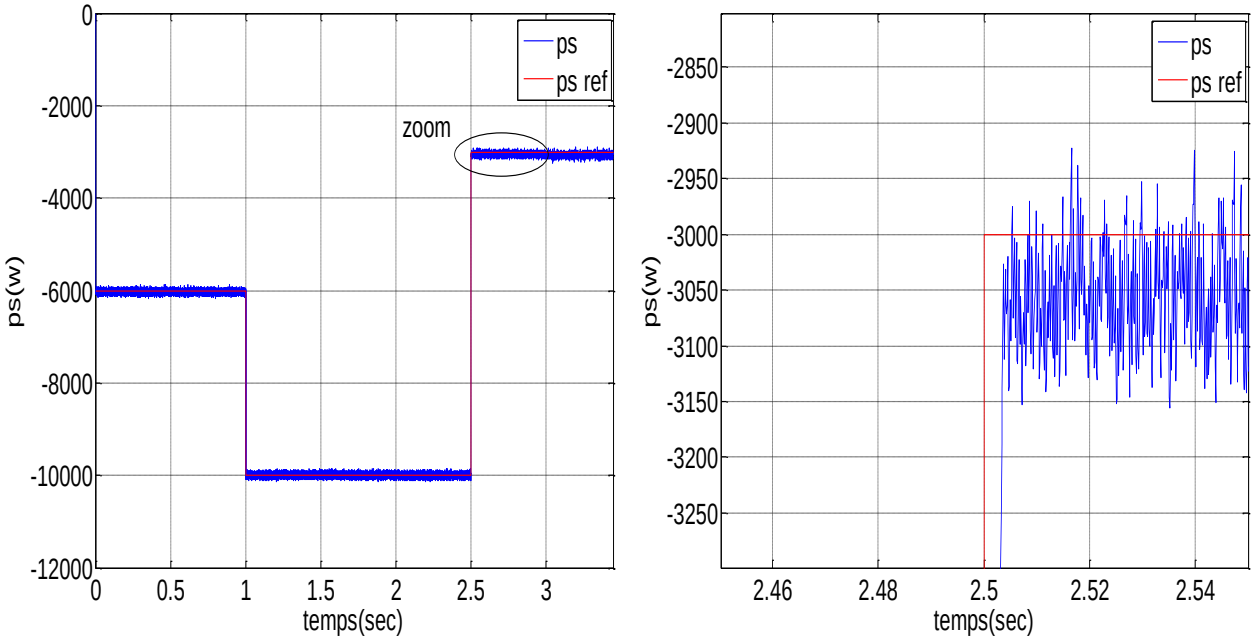


Fig .IV.17 réglage de la MADA par RNF

Puissance active statorique RRN zoom Puissance active statorique RRN

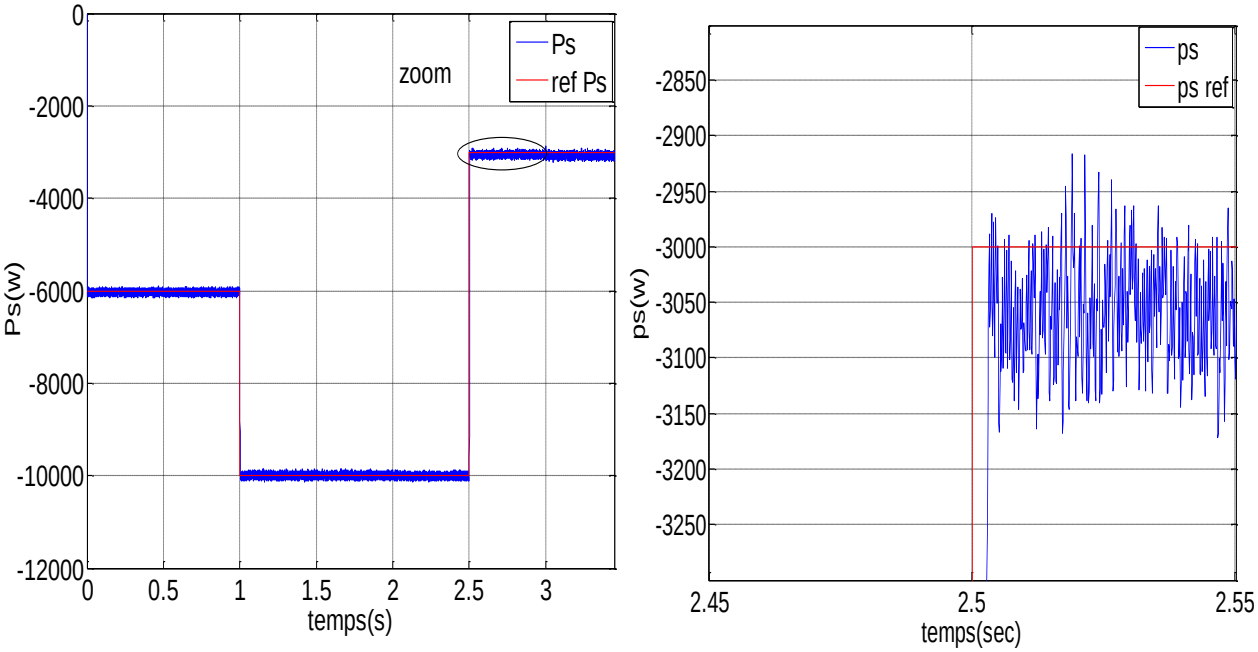


Fig. .IV.18 réglage de la MADA par RRN

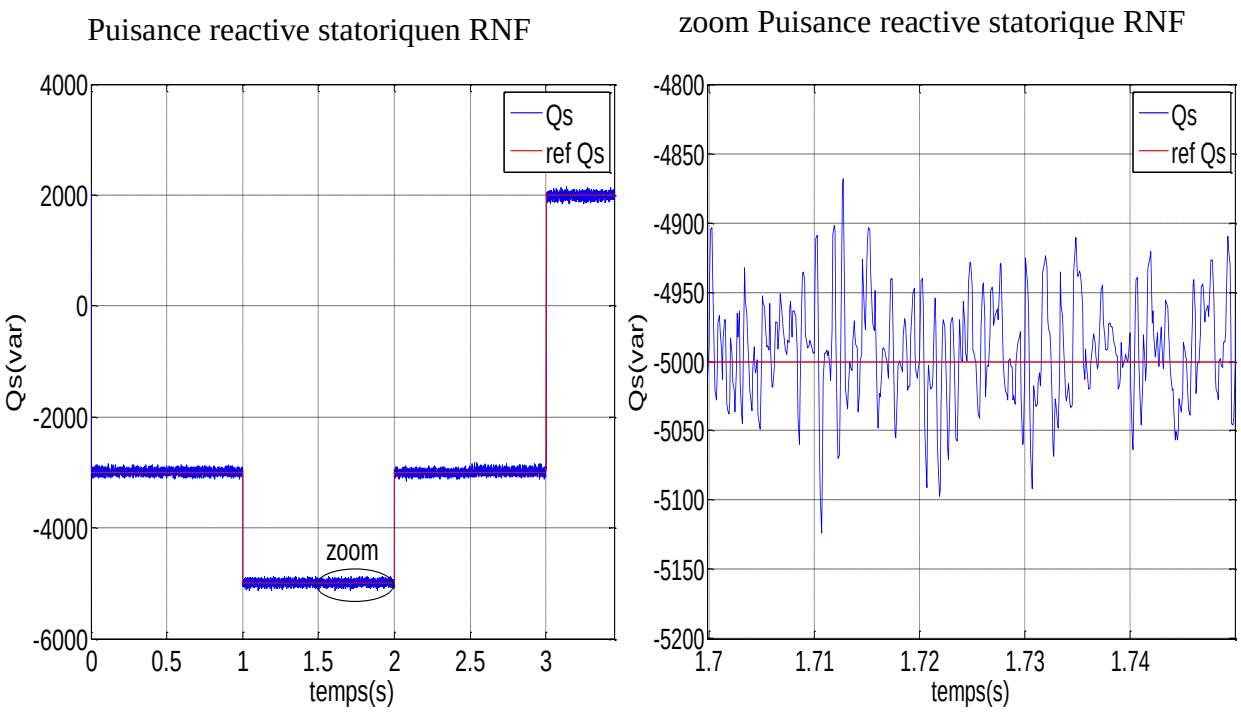


Fig .IV.19 réglage de la MADA par RNF

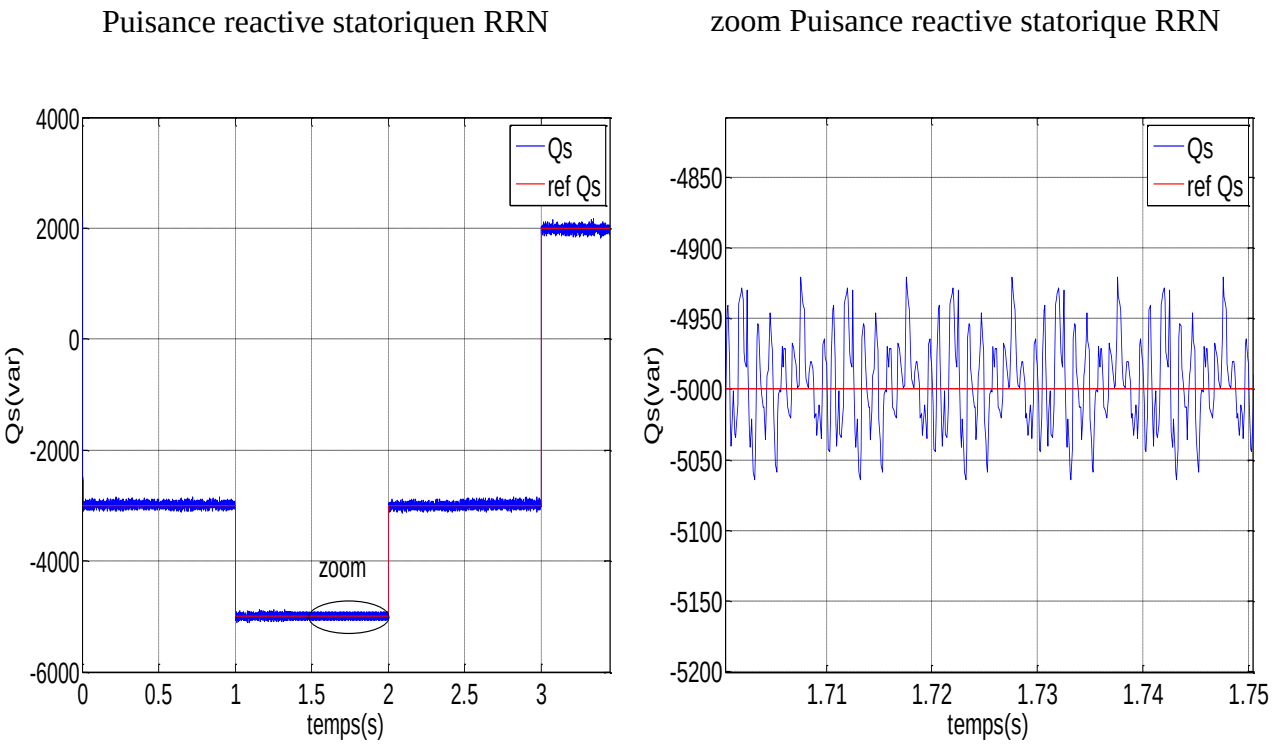


Fig .IV.20 réglage de la MADA par RRN

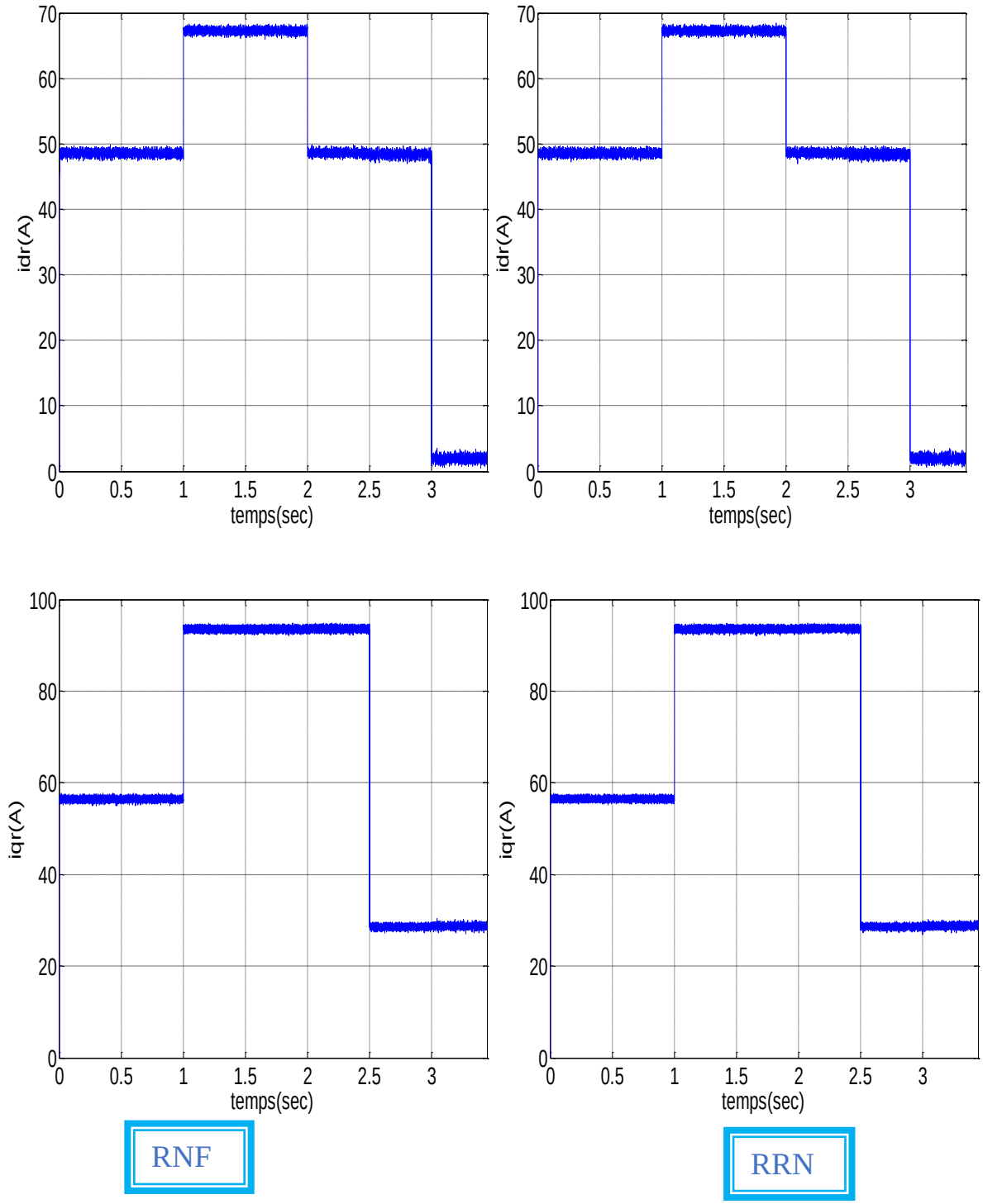


Fig .IV.21 Le courant rotorique selon l'axe d et q

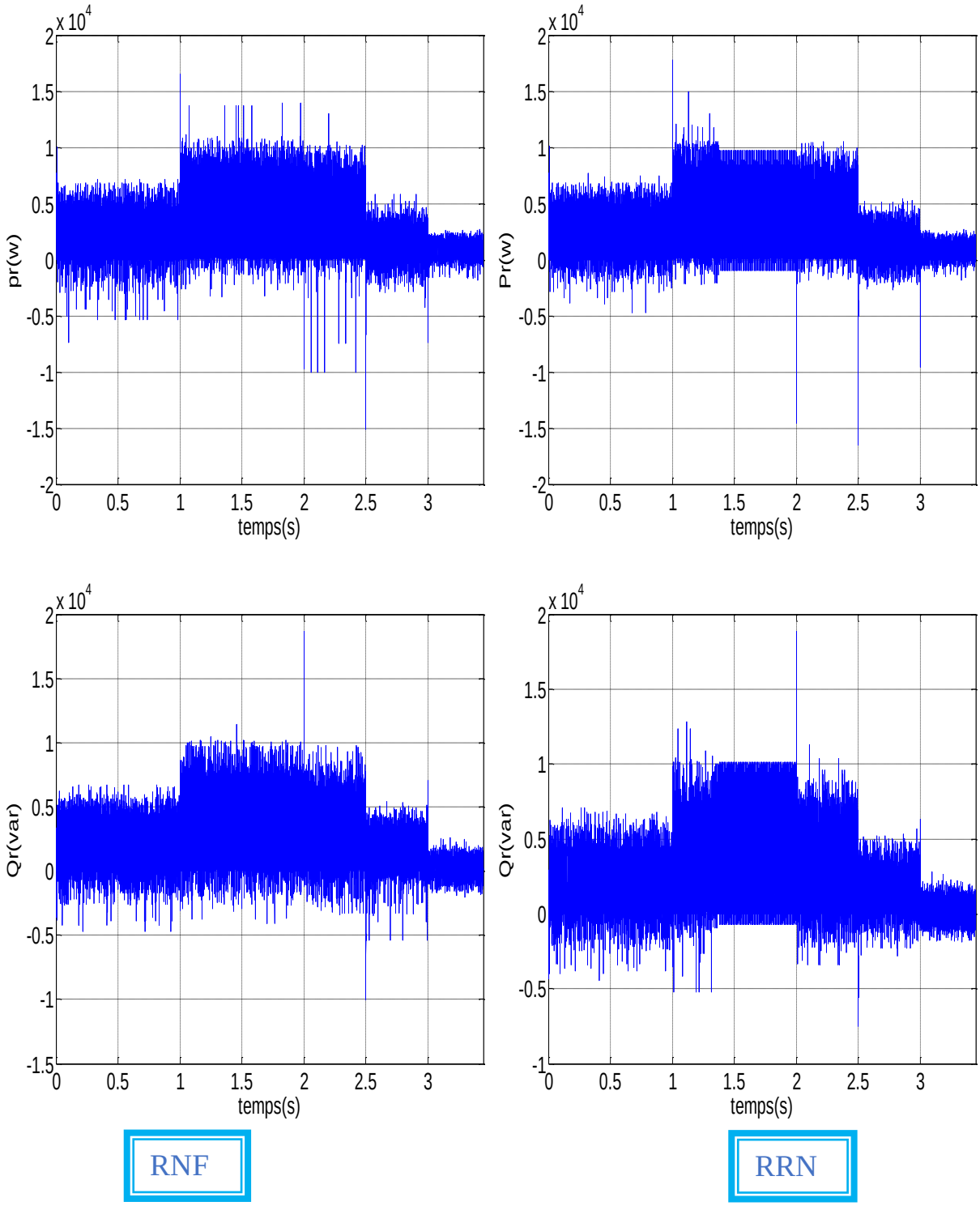


Fig. IV.22 Puissance active et réactive du rotor

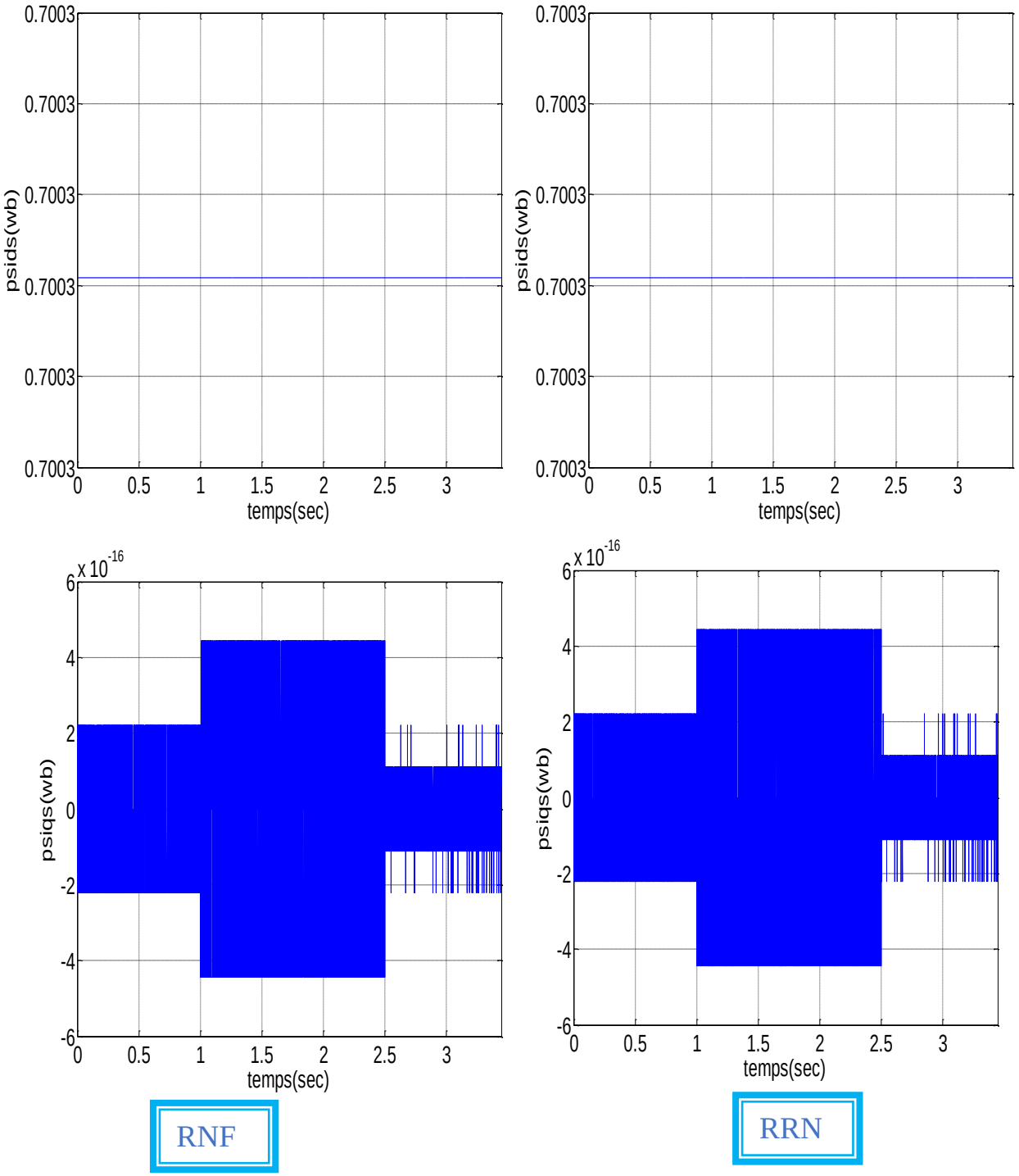


Fig .IV.23 Le flux statorique selon l'axe d et q

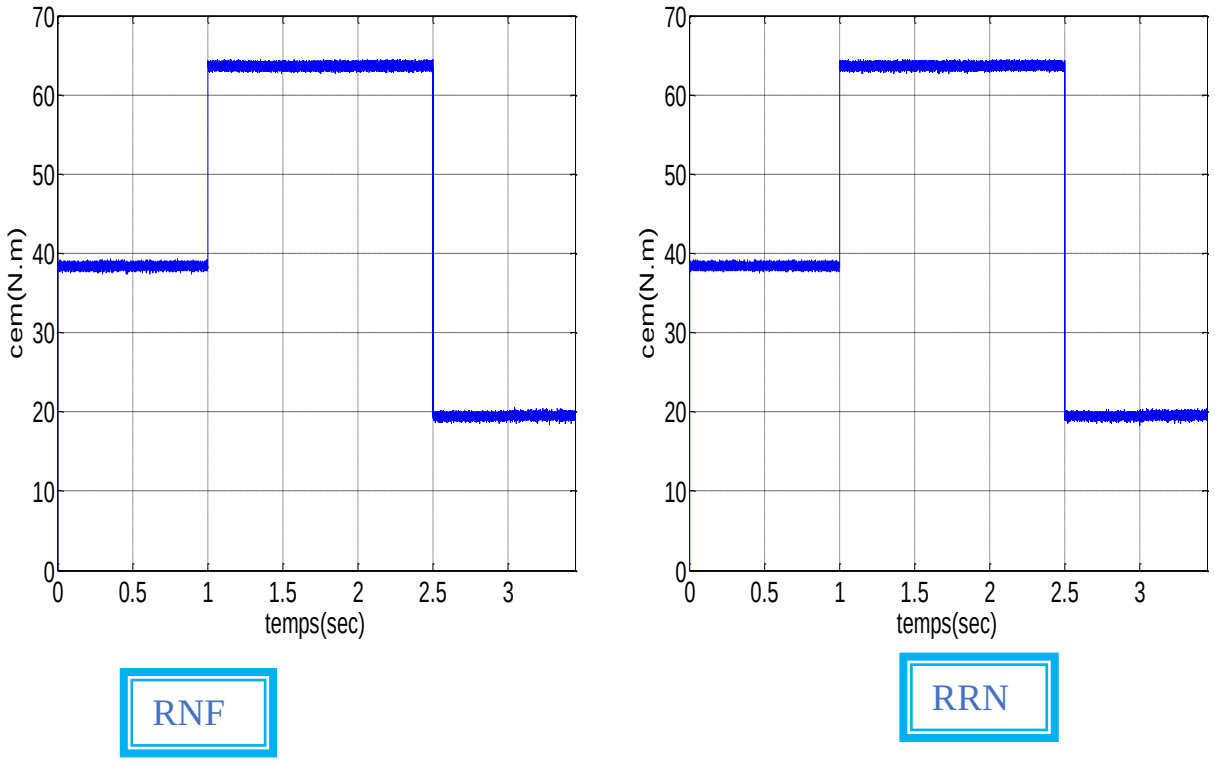


Fig .IV.24 Le couple électromagnétique

IV.3.8. Interprétation des résultats

les résultats de simulation de la commande (RNF, RRN) de la MADA, montrent que les puissance active et réactive leurs références.

le tableau IV-1 résume les performances de MADA commandée par RRN , RNF :

	Réseaux de neurones	Neuro-flou
Temps de réponse Ps	**2.685ms**	**2.652ms**
Temps de réponse Qs	**5.750ms**	**5.600ms**
Erreur	**nulle**	**nulle**

Tableau IV.3 résume les performances de MADA commandée par RRN , RNF

IV-4.conclusion :

Dans ce chapitre nous avons effectué dans en premier temps, une synthèse générale sur les réseaux de neurones à apprentissage supervisé des réseaux multicouches. Pour l'entraînement de ce type de réseau la méthode de Back- propagation constitue l'algorithme d'apprentissage qui reste le plus utilisé. Ensuite appliqué les réseaux de neurones à la commande des puissance active et réactive de la MADA. Enfin on à remplacer les régulateurs neuronals par des régulateurs neuro-flou.

A partir des résultats de simulation présentés, on peut dire que le régulateur neuronal et le régulateur neuro-flou présente des améliorations importantes par rapport au régulateur floue (temps de repense et oscillation des puissances).

La commande de la MADA par les régulateurs neuro-flou et réseaux de neurones présente les mêmes performances. neàr moins la commande neuro-flou permit une meilleur exploitation des connaissance humaine.

Références Bibliographie

[1] A. Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », thèse de doctorat, de l'institue national polytechnique de Toulouse, 5 avril 2005

[2] B. Multon, G. Robin, M. Ruellan, H. Ben Ahmed, « 3ème situation énergétique mondiale à l'aube du millénaire. Perspectives offertes par les ressources renouvelables », revue IEEE No36 mars 2004, pp. 1-14

[3] 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.

[4] 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. 387-394.

[5] L. Söderlund, JT. Erikson, J. Salonen, H. Vihriälä ans R. Perälä, « A permanent-magnet generator for wind power applications », IEEE transaction on magnetics, vol 32, N° 4, july 1996.

[6] Technique de l'ingénieur D 3 960.

[7] R. Swisher, C. Real de Azua, J. Clendenin, « Strong winds on the horizon: wind power comes of age », proceedings of the IEEE, vol. 89, N°. 12, December 2001, pp. 1757-1764.

[8] L. H. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H. Bindner, P. Sorensen and B. Bak-Jensen, « Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines », Riso national

[9] 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

[10] 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.

[11] E. Muljadi, C.P. Butterfield, Yih-Huei Wan, «Axial flux, modular, permanent-magnet generator with a toroidal winding for wind turbine applications », IEEE industry applications conference, St Louis,

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

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

[14] 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.

[15] J.W. Smith, J.A. Taylor, D. L. Books, R.C. Dugan, « Interconnection studies for wind generation », conference papers IEEE2004, paper N° 04 C3, pp. C3-1.C3-8.

[16] R. Ramakumar, Albrecht Naeter, « Role of renewable energy in the development and electrification of remote and rural areas », IEEE – PES general meeting Denver, Colorado, USA, June 6 à12, 2004.

[17] R. Ramakumar, P. Chiradeja, « Distributed generation and renewable energy systems 3 », 2002 37th intersociety energy conversion engineering conference, IECEC 2002 paper N° 20027, pp. 716-724.

[18] I. Hamzaoui ,«Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur», Mémoire Magister ,ENP.20/10/2008

[19] Y. Bencherif «Modélisation et commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la production de l'énergie éolienne» , Mémoire d'ingénieur d'état en Génie Electrique,ENP.2008

[20] 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.

[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.

[Site 1] Site Internet « L'éolien, un gisement d'énergie renouvelable exploitable en Ile- de France », Agence régionale de l'environnement et de nouvelles énergies, *http://www.areneidf.org*

[Site 2] Site Internet, *www.rncan.gc.ca/penser*. Programme d'encouragement aux systèmes d'énergie Renouvelables

[22] A. Dendouga , « contrôle des puissances active et réactive de la machine à double Alimentation », thèse de doctorat, université de Batna, 2010.

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

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

[25] A. Meroufel, « Contrôle De La Machine Asynchrone ». Polycopie De Cours, Université Djillali Liabes De Sidi Bel-Abbès, Algérie, 2009.

[26] G.Seguier « Convertisseurs de l'Electronique de Puissance", V4 : la Conversion Continue-Alternative. » Technique et Documentation Lavoisier (Paris), 1989.

[27] Z. Boudjemaa « commande vectorielle sans capteur de vitesse de la machine asynchrone a double alimentation par regulateur pi-flou » Thèse de magister, ENST D'ORAN 2009

[28] S .Georges, « contribution a la commande robuste de la machine asynchrone a double alimentation », thèse de doctorat, Institut polytechnique de Toulouse, 2007.

[29] N . Akkari, « contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone a double alimentation » thèse de doctorat, Université de Batna, 2010

[30] M . Pinard, «Commande électronique des moteurs électriques », Edition Dunod, Paris,2004.

[31] S. El Aimani, B. François, F. Minne, B. Robyns « Modelling and Simulation of Doubly Fed Induction Generators for Variable Speed Wind Turbines integrated in a Distribution Network", EPE 2003, Toulouse.

[32] J.R. Saenz, A. Tapia, G. Tapia, X. Ostolaza, I. Albizu, F. Pérez-Hidalgo, M. Irizar, "Reactive Power Regulation in Wind Farms : Control Strategies", EPE 2001 – Graz.

[33] J. Coto Aladro, Isabel Garcia Alvarez, Guzmán Diaz Gonzalez, Javier Gomez-Aleixandre, "Wind speed model design and dynamic simulation of a wind farm embedded on distribution networks, Dpt d'Ingeniera Electrica, Electronica, Computadores y de Sistemas Escuela Politecnica Superior de Ingenieros Uniyersidad de Oviedo Campus de Viesques

[34] J.P Caron, J.P Hautier, « Modélisation de la MAS, Commande vectorielle », éditions techniques, Paris, 1995.

[35] Y. Morère , « TP Réseau de neurones feedforward », Master2, université de Metz, 2005.

[36] E. Davalo , Naim. P, « *Des Réseaux de Neurones* », Edition Eyrolles, 1993.

[37] C. Touzet , « Les Réseaux de Neurones Artificiels, introduction au connexionnisme », Cours, exercices et travaux pratiques Juillet 1992.

[38] L. Baghli, « Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, France, 1999.

[39] K. Bimal. Bose,"Expert system, fuzzy logic, and neural network applications in power electronics and motion control" , proc, *IEEE*. Vol N° 8, August 1994.

[40] M. Nezar. , « Diagnostic des associations convertisseurs statiquesmachines asynchrones en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle », thèse de doctorat d'état de l'université de Batna, 2006.

[41] D. Ould abdeslam. , « Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques: application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension », thèse de doctorat, Université de Haute-Alsace, 2005.

[42] R. Hecht-Nielson, Neurocomputer Applications" in Proceedings of the 1987 IEEE Asilomar Signals & Systems Conference. IEEE Press, 1988.

[43] M.E. Elbuluk, L. Tong and I. Husain, "Neural Network Based Model Reference Adaptive Systems for High Performance Motor Drives and Motion Controls", *IEEE* Transactions On Industry Applications, Vol. 38, no. 3, may/june 2002.

[44] J.-Luc Bloechle, "Réseau de Neurones Artificiels pour la classification des fontes Arabes et la distinction entre la langue Arabe et les langues Latines", thèse de Doctorat, Département d'informatique, Université de Fribourg, Suisse, Juin 2003.

[45] A. Messaoudi., "Modélisation et Commande d'un Actionneur synchrone", Thèse de Magister, Université de Batna, Algérie, 2002.

[46] Y.M. , Yeddou, "Etude de synthèse sur les réseaux de neurones et leurs application", Ecole nationale polytechnique, thèse de magister, 1998.

[47] Ng SC, Cheung CC, Leung SH, "Magnified gradient function with deterministic weight modification in adaptive learning", *IEEE* Trans Neural Network 15(6):1411–23, 2004.

[48] Y. Zhang., P. Sen,GE. Hearn., "An on-line trained adaptive neural controller", *IEEE* Trans Control Syst Mag (15), pp. 67–75, 1995.

[49] L. Mokhnache, « Application de RN dans le diagnostique et la prédiction des isolations HT », Thèse de Doctorat, école nationale polytechnique,2004.

[50] E. Istook,T. Martinez. , "Improved backpropagation learning in neural network with windowed momentum". Internat J Neural Syst,12(3&4):303–18, 2002.

[51] Matlab version 7.9.0. (R2009b), "Neural Network Toolbox User'sguide", Mathworks Inc 1984-2009.

[52] H. Hirota et W. Pedrycz, "OR/AND neuron in modeling fuzzy set connectives", IEEETransactions on Fuzzy Systems 2, pp. 151–61. 1994.

[53] C. Moraga, P. Sincak et J. Vascak, Neuro-fuzzy modeling of compensating systems, Quo vadis Computational Intelligence? , Springer Verlag, Heidelberg. 2000.

[54] H. Kwan et Y.Cai, A fuzzy neural network and its application to pattern recognition,
IEEE Transactions on Fuzzy Systems, pp .185-193. 1994

[55] D. Racoceanu, contribution a la surveillance des systemes de production en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle, Universite de franche-Comte, France.2006.

[56]A. Azzedine ,T. Nouar «Commande des puissances active et réactive de la Machine Asynchrone à Double Alimentation, en utilisant la logique floue type-2 » mémoire de mastère de université de médéa ,2013

CONCLUSION GENERALE

L'objectif général de ce mémoire était l'application des techniques de l'intelligence artificielle pour la commande de la machine asynchrone à double alimentation (*MADA*).

La première partie représenté l'énergie renouvelable, un état de l'art de la génération éolienne est présenté dans le premier lieu, on a rappellé les concepts fondamentaux de la chaine de conversion de l'énergie éolienne en énergie électriques et les différents types d'éoliennes avec les machines électriques utilisées dans cette conversion d'énergie. Ce qui nous a amené à choisir la machine asynchrone à double alimentation de par ces qualités de fonctionnement.

Puis a étudié en détail la machine à double alimentation, Nous avons vu que dans le cas de l'utilisation de la *MADA* dans les applications de génération de l'énergie électrique à vitesse variable, la plus grande partie de la puissance est directement distribuée au réseau par le stator et moins de 30% de la puissance totale passe par les convertisseurs de puissance à travers le rotor. Ceci donne l'occasion d'utiliser des convertisseurs plus petits et donc moins coûteux. Cela permet de réduire le coût de la production. Ainsi on a présenté les avantages du contrôle de la *MADA* qui s'effectue par l'intermédiaire du rotor avec une puissance réduite. A travers cette étude, on a montré que ce type de machine peut trouver une place intéressante parmi les différents systèmes de production d'énergie électrique.

Concernant la commande vectorielle de la *MADA* moyennant un réglage classique, nous avons conclu également que ce réglage ne contrôlait pas de manière satisfaisante le régime transitoire et la variation paramétrique influe sur les performances de la commande.

Après avoir présenté la commande vectorielle, les résultats de simulations et les problèmes qui lui sont propres on a passé en suite à l'approche basée sur les techniques de l'intelligence artificielle, telles que la logique floue, les réseaux de neurones et les commande neuro-flous, lesquelles surpassent les limites des techniques classiques et possèdent des caractéristiques essentielles pour l'amélioration des performances de la commande proposée.

En ce qui concerne les réseaux de neurones, des améliorations importantes ont été apportées avec le régulateur neuronal par rapport au régulateur logique flou type 2 (en terme d'atténuation les dépassements et les oscillation au niveau des régimes transitoires).

En dernier lieu, Il est donc apparu naturel de construire des systèmes hybrides qui combinent les concepts des systèmes d'inférence flous et des réseaux de neurones, cela pour

avoir une approche neuro-floue capable d'améliorer les performances de la commande de la MADA.

Les comparaisons des résultats présentées au cours de ce travail, nous ont amenée à conclure que le régulateur neuro-flou conduit à de meilleures performances que les autres régulateurs traités à cause de sa robustesse, sa rapidité et la précision de ses sorties qui lui permettent de donner des décisions correctes et d'éviter les cas d'indécisions.

Finalement, la perspective intéressante de cette étude consiste à réaliser toutes ces commandes de la MADA expérimentalement, pour vérifier et exploiter les essais des simulations présentés.

ANNEXE I

Les paramètres de la turbine

paramètre	signification
V=9m/s	La vitesse de vent
β =1°	Angle de calage
ρ =1.29kg/m^3	La Masse volumique de l'aire
R=35.25m	Rayon de la pale
G=90	Rapport de transmission du multiplicateur
KF=0.0024	Coefficient de frottement visqueux du générateur

ANNEXE II

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

paramètres	signification
P =1.5MW	Puissance nominale consommé
Ω =1500 tr/min	Vitesse nominal
p=2	Paire de poles
V=690v/50HZ	Tension d'alimentation-fréquence
Rs=0.455 Ω	Resistance statorique
Rr=0.19 Ω	Resistance rotorique
Ls=0.07H	Inductance statorique
Lr=0.0213H	Inductance rotorique
M=0.034H	Inductance Mutuell
J=0.22kg.m^2	Inertie du rotor
Kf=0.002N.m/rad	Coefficient de frottement