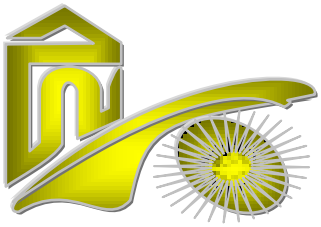
République Algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur
Et de la recherche scientifique

UNIVERSITE "YAHIA FARES" MEDEA



Facultés Des Sciences Et De La Technologie

Département De Génie Electrique Et D'informatique

Projet de fin d'études

Pour L'obtention D'un Diplôme

Master En Génie Electrique

Option : Automatique des systèmes

Thème

Contrôle D'un Système De Conversion D'énergie Eolienne Par L'intelligence Artificielle

Réaliser par :

- *Mohri Wahid.*
- *Meskine Khalil.*

Dirigé par :

- *Mr. A MOUALDIA.*
- *Mr.A MEDJBER.*

Promotion 2013

ملخص :

يقدم هذا العمل دراسة التحكم في الماكنة اللاتزامنية مضاعفة التغذية بواسطة تقنيات الذكاء الاصطناعي بعد ما قدمنا نمذجة للدوار و الماكنة اللاتزامنية مضاعفة التغذية وطرق استعمالها سواء كمحرك أو كمولد للطاقة الكهربائية.قمنا بإيجاد الصيغة الرياضية للدوار للماكنة وذلك لتسهيل تطبيق التحكم الشعاعي الذي يرتكز أساسا على ضابط تناسبي وتكاملي بمبدأ كلاسيكي. وبعد استعمال هدا الأخير لاحضنا عدم كفائتة في المجال الديناميكي المؤقت. ولذلك لجأنا إلى استخدام طرق أخرى تعتمد على تقنيات الذكاء الاصطناعي ونذكر منها: المنطق الغامض ,الشبكات العصبية الاصطناعية .هذه التقنيات الأخيرة جعلت تحسنات كبيرة ومعتبرة في التحكم في هذه الماكنة وقد عرضنا النتائج المفصلة لكل تقنية .

كلمات مفتاحية: ماكنة لاتزامنية ذات تغذية مزدوجة, الشبكات العصبية,المنطق الغامض, التحكم الشعاعي,التحكم في القدرة.

Résume :

Cette thèse présente la commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation par des Techniques de l'Intelligence Artificielles. Après avoir présenté l'état de l'art des ensembles MADA et la turbine éolienne, nous avons abordé la commande vectorielle de la MADA par orientation du flux statorique. Nous nous sommes intéressés au régulateur PI pour les puissances statorique et à l'impact de son remplacement par d'autres régulateurs basés sur les techniques de l'intelligence artificielle tels que les régulateurs flous, neuronaux, les quelles surpassent les limites des techniques classiques et possèdent des caractéristiques essentielles pour l'amélioration des performances de la commande proposée. Les résultants de simulations par Matlab/Simulink.

Mots clés : génératrice asynchrone à double alimentation, réseau de neurone, logique floue, commande vectorielle, contrôle des puissances.

Abstract:

This Works presents the ordering of the Asynchronous Machine at Double Food by Artificial Techniques of the Intelligence.

After having presented the state of the art of sets MADA and the wind turbine, we approached the vectoriel ordering of the MADA by orientation of stator flow. We were interested in regulator PI for the powers stator and with the impact of its replacement by other regulators based on the techniques of the artificial intelligence such as the regulators fuzzy, neuronal, which exceed the limits of the traditional techniques and have essential characteristics for the Improvement of the performances of the order suggested, results of simulations by Matlab/Simulink.

Keywords: doubly-fed induction generator, neuronal network, logic fuzzy oriented flux control, power control.

Remerciement

Nous remercions notre promoteur Mr.A.moualdia et nos Co-promoteur Mr. A.medjber pour précieux, conseils, leur aide et leur patience tout au long travaille.

Nous remercions tous les enseignants de l'université de Médéa.

Nous tenons également à remercier tous nos amis et camarades, pour leur sincère amitié et leur précieux soutien.

Merci.

DEDICACES

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

...je dédie ce modeste travail.

WAHID et KHALILE

Sommaire

Introduction générale....01

CHAPITRE I : Modélisation de l'aérogénérateur asynchrone a double alimentation.

I.1. Introduction....03
I.2. Généralités sur l'énergie éolienne....03
I.3. Avantages et désavantages de l'énergie éolienne....04
I.3.1. Les avantages....04
I.3.2. Les désavantages....05
I.4. Principe de fonctionnent d'une chaine éolienne....05
I.5. Les différents types d'éolienne....06
I.5.1. Turbine à axe vertical....06
I.5.2. Turbine à axe horizontal....06
I.6. Principales composantes des éoliennes à axe horizontal....07
I.6.1. Mât....07
I.6.2. Les pales....08
I.6.3. Rotor....08
I.6.4. Multiplicateur....08
I.6.5. Génératrice....08
I.6.6. Frein....08
I.6.7. Mécanisme d'orientation de la nacelle....08
I.7. Intérêt de l'éolienne à vitesse variable....08
I.8. La puissance aérodynamique captée par l'éolienne et coefficient de puissance....10
I.9. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne....12
I.9.1. Le pitch contrôle....13
I.9.2. Le stall contrôle....13
I.10. La vitesse du vent continument variable....14
I.11. Modélisation de la turbine éolienne....15
I.11.1. Hypothèse simplificatrice pour la modélisation mécanique de la turbine....15
I.11.2. Modélisation de la vitesse de vent....16
I.11.3. model de la turbine....17
I.11.4. Modèle du multiplicateur....19
I.11.5. L'équation mécanique de l'arbre de la génératrice....19
I.12. Présentation de la machine asynchrone triphasée....20
I.13. Modes de fonctionnement de la MADA....21
I.13.1. Fonctionnement en moteur hypo-synchrone....21
I.13.2. Fonctionnement en moteur hyper-synchrone....21
I.13.3. Fonctionnement en génératrice hypo-synchrone....22
I.13.4. Fonctionnement en génératrice hyper-synchrone....22
I.14. Modélisation de la MADA....23

I.14.1. Hypothèses simplificatrice.....23
I.14.2. Équations électriques de la machine.....24
I.14.3. Équations mécaniques de la machine.....25
I.14.4. Les puissances actives et réactives de la MADA.....26
I.14.5. Choix du référentiel.....27
I.14.5.1. Référentiels lie au stator.....27
I.14.5.2. Référentiels lie au rotor.....27
I.14.5.3. Référentiels lie au champ tournant.....27
I.14.6. mises sous forme d'équations d'état.....28
I.15. Résultats de simulation.....28
I.15.1. Fonctionnement moteur à vide.....28
I.15.2. Fonctionnement moteur en charge.....29
I.15.3. Fonctionnement génératrice.....30
I.16. Interprétations des résultats de simulation.....32
I.17. Conclusion.....32

CHAPITRE II : Alimentation et commande vectorielle du generateur éolien.

II.1. Introduction.....33
II.2. Commande vectorielle de la machine.....33
II.2.1. Principe de la commande vectorielle.....33
II.2.2. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique.....34
II.2.3. Relation entre puissances statoriques et courants rotoriques.....36
II.2.4. Relation entre tensions et courants rotoriques.....36
II.3. Modélisation de l'alimentation de la machine.....37
II.3.1. Convertisseurs à commutation forcée.....37
II.3.2. Commande vectorielle du convertisseur à commutation forcée.....39
II.3.3. Modélisation du convertisseur a MLI du cote du rotor.....40
II.4. Stratégie de commande de la turbine.....41
II.4.1. commande rotorique de l'éolienne.....42
II.4.2. Contrôle du vitesse.....43
II.4.3. Optimisation électronique de la conversion énergétique.....44
II.5. Résultats de simulation.....45
II.6. Interprétation des résultats.....47
II.7. Conclusion.....48

CHAPITRE III : Contrôle direct et indirect des puissances du générateur.

III.1. Introduction.....49
III. 2. modèle simple.....49
III.3. controle directe de puissance.....53
III.4. Mise en place de la régulation.....53
III.5. Synthèse du régulateur PI.....54
III.6. Simulation et interprétation des résultats.....55

III.7. Contrôle indirecte de puissance par le régulateur PID…….....56
III.7.1. Commande sans boucle de puissance…….....56
III.7.1.1. Simulation et interprétation des résultats……57
III.7.1.2.Interprétation…….……..……58
III.7.2. commande avec boucles de puissance ……...…59
III.7.2.1. Simulation et interprétation des résultats …….....59
III.7.2.2. Interprétation……..60
III.8. Conclusion……...……...……...61

CHAPITRE IV :Controle par logique floue et reseaux de neurones du génerateure éolienne.

IV.1. Contrôle indirecte des puissances par logique floue 62
IV.1.1. Introduction 62
IV.1.2. Principe de la logique floue 62
IV.1.3. Variables linguistiques 62
IV.1.4. Fonctions d'appartenance 62
IV.1.5. Structure de base d'un contrôleur flou 63
IV.1.5.1. Base de connaissances 64
IV.1.5.2. Fuzzification.....64
IV.1.5.3. Règles d'inférence floue 64
IV.1.5.4. Défuzzification.....65
IV.1.5.4.1. Méthode du maximum 65
IV.1.5.4.2. Méthode de la moyenne des maxima 65
IV.1.5.4.3. Méthode du centre de gravité.....66
IV.1.6. Développement du contrôleur flou 66
IV.1.6.1 Description du contrôleur.....66
IV.1.6.2. Loi de commande.....67
IV.1.7. Réglage des puissances statorique de la MADA 68
IV.1.7.1. résultats de simulation.....69
IV.1.7.2. Interprétation des résultats 69
IV.2. Contrôle indirecte des puissances par logique floue 70
IV.2.1. Introduction 70
IV.2.2. Neurone biologique 70
IV.2.3. neurone formel 71
IV.2.4. Réseaux de neurones artificielle 72
IV.2.4.1. Les réseaux non boucles 72
IV.2.4.2. Les réseaux boucles 72
IV.2.5. Bref historique 72
IV.2.6.Apprentissage des réseaux de neurones 73
IV.2.6.1. Apprentissage supervise.....73
IV.2.6.2. Apprentissage non supervise.....73
IV.2.6.3. Apprentissage par renforcement 73
IV.2.7. Rétropropagation 74

IV.2.7.1. Principe de la rétropropagation 74
IV.2.7.2. Algorithme d'apprentissage 75
IV.2.7.3. Étude du taux d'apprentissage 76
IV.2.8. Développement du contrôleur neuronal.....77
IV.2.9. Application des réseaux de neurones au réglage des puissances et les courants de la MADA 78
IV.2.10. Résultats de simulation 78
IV.2.11. Interpretation des resultats 79
IV.3.Conclusion 80

Conclusion génerale.....81
Annexe .
Bibiliographie.

Liste des Figures :

Fig.I.1.Schéma de fonctionnement d'une turbine **06**
Fig.I.2.Eoliennes à axe vertical. **07**
Fig.I.3.Eoliennes à axe horizontal **07**
Fig.I.4.Schéma global du système turbine **07**
Fig.I.5.Caractéristique (puissance - vitesse mécanique). **09**
Fig.I.6.Démonstration de la loi de betz **10**
Fig.I.7 Rapport des deux puissances en fonction du rapport des deux vitesses du vent en aval et en amont. **11**
Fig.I.8 Puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent **12**
Fig.I.9.Variation de la puissance éolienne maximale en fonction de la vitesse du vent. **15**
Fig.I.10.Modèle mécanique simplifié de la turbine **16**
Fig.I.11.le vent applique au système **17**
Fig.I.12.Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine (λ) pour une éolienne de I.5 MW **18**

Fig.I.13 Schéma bloc du modèle de la turbine **20**
Fig.I.14 Rotor à cage d'écureuil **20**
Fig.I.15 Constitution du rotor bobinée. **21**
Fig.I.16 Fonctionnement de la MADA en mode moteur **22**
Fig .I.17 Fonctionnement de la MADA en mode générateur **22**
Fig .I.18 Représentation de la machine asynchrone à double alimentations **23**
Fig .I.19 Passage du triphasé au biphasé (Transformation de Park). **25**
Fig.I.20 fonctionnement moteur à vide (Cr= 0) **29**
Fig.I.21. fonctionnement moteur en charge(Cr= 9550) **30**
Fig.I.22.fonctionnement génératrice.. ..... **31**
Fig.II.1.principe du pilotage découple du couple d'une mcc **33**

Fig.II.2.Représentation de la MADA et son système d'alimentation au rotor. **37**
Fig.II.3. Convertisseur AC-DC triphasé à commutation forcée. **38**
Fig.II.4 Schéma de principe de l'onduleur triphasé **41**
Fig.II.5 la puissance électrique en fonction de la vitesse d'une éolienne de I.5mw **42**
Fig.II.6 architecture de la chaine de conversion éolienne commandée par le rotor……..… **43**
Fig.II.7 schéma block simplifie de la boucle de vitesse munie d'un correcteur pi. **43**
Fig.II.8 représentation schématique de la commande par le rotor de la MADA d'un système éolien. **45**
Fig.II.9 résultats de la commande vectorielle de la mada. **47**
Fig.III.1 Schéma bloc de la MADA **52**
Fig.III.2 .Schéma bloc de la commande directe **54**
Fig.III.3 Système Régule par un PI **54**
Fig.III.4.resultats de la simulation directe de puissance par PI **56**
Fig.III.5.Schéma bloc de la commande indirecte (Ps en haut, Qs en bas). **57**

Fig.III.6.resultats de la commande indirecte sans boucle de puissance. **58**
Fig.III.7.Schéma bloc de la commande indirecte avec boucles de puissance **59**
Fig.III.8.Résultats de simulations pour la commande avec boucle de puissance. **60**
Fig.IV.1.Exemple de fonctions d'appartenance. **63**
Fig.IV.2 : a) Schéma synoptique d'un contrôleur flou.
b) conFiguration d'un contrôleur flou. **63**
Fig.IV.3. Exemple de Fuzzification. **64**
Fig.IV.4. Schéma bloc d'un contrôleur flou **67**

Fig.IV.5. Schéma bloc global de commande de la MADA par logique floue. **68**
Fig.IV.6..resultats de simulation par la logique floue. **69**
Fig.IV.7. Schéma d'un réseau de neurones biologiques **71**
Fig.IV.8. Schéma d'un neurone formel. **71**
Fig.IV.9. Architecture neuronal proposée pour l'implémentation du contrôleur. **77**
Fig.IV.10. Schéma bloc global de commande de la MADA par les réseaux de neurones. **78**
Fig.IV.11.resultats de simulation par le réseau de neurone. **79**

NOTATIONS SYMBOLIQUES

Symbole	Signification
C_p	Coefficient de puissance
C_t	Coefficient du couple
G	Rapport de vitesse du multiplicateur
K_e, K_{de}, K_{dc}	Facteurs d'échelles du régulateur flou
K_i, K_p	Gains du régulateur PI classique
P_{mec}	Puissance mécanique sur l'arbre de la machine
P_s	Puissance active statorique
P_t	Puissance captée par la turbine
P_{tmax}	Puissance maximale de la turbine
P_{tn}	Puissance nominale de la turbine
P_v	Puissance portée par le vent
q_r	Puissance réactive rotorique
q_s	Puissance réactive statorique
R	Rayon de la turbine
S	Surface balayée par le rotor de la turbine
$T_{aér}$	Couple aérodynamique de la turbine
V, V_m, V_2	Vitesses du vent en amont, au niveau et en aval de la turbine éolienne
V_d	Vitesse du vent démarrant la turbine
V_{max}	Vitesse maximale du vent
V_n	Vitesse nominale du vent
V_{red}	Tension redressée

Symbole	Signification
$\boldsymbol{e, \Delta e}$	Erreur de vitesse et sa variation
$\boldsymbol{i_{abcr}}$	Courants instantanés des phases rotoriques
$\boldsymbol{i_{abcs}}$	Courants instantanés des phases statoriques
$\boldsymbol{i_{dqr}}$	Composantes du courant rotorique dans le repère (d, q)
$\boldsymbol{i_{dqs}}$	Composantes du courant statorique dans le repère (d, q)
$\boldsymbol{i_f}$	Courant filtré
$\boldsymbol{i_{red}}$	Courant redressé
$\boldsymbol{i_{uvr}}$	Composantes du courant rotorique dans le repère (u, v)
$\boldsymbol{i_{uvs}}$	Composantes du courant statorique dans le repère (u, v)
$\boldsymbol{m}$	Masse de l'air traversant la surface balayée par le rotor de la turbine
$\boldsymbol{p}$	Nombre de paires de pôles
$\boldsymbol{p_i}$	Probabilité de sélection
p	Opérateur de Laplace
$\boldsymbol{v_{abcr}}$	Tensions instantanées des phases rotoriques
$\boldsymbol{v_{abcs}}$	Tensions instantanées des phases statoriques
$\boldsymbol{v_{dqr}}$	Composantes de tension rotorique dans le repère (d, q)
$\boldsymbol{v_{dqs}}$	Composantes de tension statorique dans le repère (d, q)
$\boldsymbol{v_{uvr}}$	Composantes de tension rotorique dans le repère (u, v)
$\boldsymbol{v_{uvs}}$	Composantes de tension statorique dans le repère (u, v)
$\boldsymbol{w}$	Energie électromagnétique dans la machine
$\boldsymbol{\Delta i}$	Bandes d'hystérésis des courants

Symbole	Signification
$\boldsymbol{\beta}$	Angle de calage des pales
$\boldsymbol{\Omega_e}$	Vitesse de rotation mécanique du rotor de la génératrice
$\boldsymbol{\Omega_t}$	Vitesse angulaire de la turbine
$\boldsymbol{\Omega_{topt}}$	Vitesse angulaire optimale de la turbine
$\boldsymbol{\theta}$	Angle entre l'axe rotorique A et l'axe statorique a
$\boldsymbol{\theta_{élect}}$	Angle électrique rotorique
$\boldsymbol{\theta_{géom}}$	Angle géométrique de rotation du rotor
$\boldsymbol{\lambda}$	Vitesse spécifique

$\boldsymbol{\lambda_{op}}$	Vitesse spécifique optimale de l'éolienne
$\boldsymbol{\omega}$	Vitesse angulaire de rotation du rotor
$\boldsymbol{\omega_{coor}}$	Vitesse angulaire du repère biphasé
$\boldsymbol{\omega_s}$	Vitesse angulaire de rotation du champ tournant
$\boldsymbol{\phi_{abcr}}$	Flux instantanés des phases rotoriques
$\boldsymbol{\phi_{abcs}}$	Flux instantanés des phases statoriques
$\boldsymbol{\phi_{dqr}}$	Composantes du flux rotorique dans le repère (d, q)
$\boldsymbol{\phi_{dqs}}$	Composantes du flux statorique dans le repère (d, q)
$\boldsymbol{\phi_{uvr}}$	Composantes du flux rotorique dans le repère (u, v)
$\boldsymbol{\phi_{uvs}}$	Composantes du flux statorique dans le repère (u, v)

ABREVIATIONS

Acronyme	Signification
$[\mathbf{P}(\boldsymbol{\theta})]^{-1}$	Transformation de Park inverse
$[\mathbf{P}(\boldsymbol{\theta})]$	Transformation de Park directe
MAS	Machine Asynchrone
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsions
MPPT	Poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale
MCC	Machine à courant contenue

Introduction générale :

La croissance constante de la consommation d'énergie sous toutes ses formes et les effets polluants associés, principalement causés par la combustion des énergies fossiles, sont au cœur de la problématique du développement durable et du soin de l'environnement dans une discussion pour l'avenir de la planète.

Le secteur de la génération électrique est le premier consommateur d'énergie primaire et les deux tiers de ses sources sont des carburants fossiles. Il est techniquement et économiquement capable de faire des efforts importants pour réduire les atteintes de l'activité humaine sur le climat et l'environnement. Une des possibilités est d'accroître le taux de production d'électricité à partir de ressources de type non-fossiles et renouvelables.

De nos jours, la machine asynchrone double alimentation (MADA) est la machine à vitesse variable la plus couramment utilisée dans des unités de production éolienne supérieure à 1MW. Pour une même puissance de production, celle-ci permet de réduire la puissance des convertisseurs de puissance tout en générant une puissance de sortie importante par rapport aux autres technologies des machines.

Les éoliennes sont aussi équipées d'un système de commande basé sur les convertisseurs d'électronique de puissance pour s'adapter aux conditions de vent. L'ensemble de l'éolienne est contrôlé de manière à maximiser en permanence la puissance produite en recherchant chaque fois le point de fonctionnement à maximum de puissance.

Le présent mémoire décrit une étude sur l'utilisation d'une machines de type asynchrone à double alimentation dans un système éolien.

La modélisation de notre système éolienne sera présentée 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 et 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. Sa mise en équation permettra de simuler sont modèle dans le mode moteur et générateur

Dans le deuxième chapitre. On présentera la commande vectorielle la MADA, on terminera cette partie par la modélisation de l'alimentation de la machine qui se compose d'un redresseur et d'un onduleur.

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

Dans le chapitre quatre, nous introduisons un régulateur basé sur la logique floue puis les réseaux de neurone pour contrôler les puissances statorique du stator.

Finalement, on terminera ce mémoire par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus, avec les caractéristiques de chaque régulateur.

Chapitre I : Modélisation de l'aérogénérateur asynchrone à double alimentation.

I.1 Introduction :

L'objectif principal des systèmes éoliens est la transformation d'une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. L'énergie éolienne, non polluante et économique a suscité un très grand intérêt et a exigé aux constructeurs de réfléchir toujours à de nouvelles solutions robustes, permettant l'extraction du maximum d'énergie et l'étude des différents systèmes réalisables.

Dans ce sens, ce premier chapitre comprend en une première partie un état d'art sur le génie électrique dans le vent et son historique et la croissance de l'exploitation de cette énergie en présentant les différents types des éoliennes et leur diversité selon les positions des arbres et la situation par rapport au vent. Ensuite, on va présenter la loi aérodynamique de Betz définissant la puissance extraite du vent, le coefficient connu de puissance et les techniques de régulation de la puissance en Pitch ou Stall Control, ainsi que l'intérêt de la vitesse variable.

Après cela, on va modéliser les éléments constituants le système éolien étudié, en commençant par la machine électrique doublement alimentée et ses modèles triphasé et biphasé, puis la turbine éolienne et le convertisseur mécanique utilisé pour le couplage mécanique avec la génératrice tout en déduisant l'équation dynamique de l'arbre.

Nous terminerons par le principe de fonctionnement des deux fonctionnements de la MADA en mode moteur et mode Génératrice.

I.2 Généralités sur l'énergie éolienne :

Le vent est une force de la nature expérimentée par l'Homme depuis les temps anciens, bien avant que ce dernier n'ait vraiment compris sa source physique et ses lois fondamentales. Les bateaux à voile, les cerfs-volants, les girouettes, les moulins à grains n'ont pas attendu les équations de Navier-Stockes ou les ordinateurs. Le vent est une source d'énergie propre, renouvelable quasi instantanément, et quasi infinie à l'échelle humaine et terrestre. Il doit ces caractéristiques à sa nature même : Le vent est produit par le soleil, comme d'ailleurs toute forme d'énergie renouvelable, y compris celle qui provient des combustibles fossiles. Le soleil réchauffe la Terre à différentes températures selon l'endroit et le temps. Le vent naît de ces réchauffements irréguliers, alors que l'air chaud s'élève et que l'air froid descend pour combler les vides. Ce flux d'air continuel constitue le vent [1]. Pour les éoliennes actuellement commercialisées semble être autour de 600 kW à 3 MW, groupées dans de grandes fermes

éoliennes. Les nouvelles technologies en cours de développement cherchent à produire des systèmes beaucoup plus souples en termes de « puissance rentable ».

I.3 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

I.3.1. Avantages :

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement :
L'impact néfaste de certaines activités de l'homme sur la nature est aujourd'hui reconnu par de nombreux spécialistes. Certaines sources d'énergie notamment, contribuent à un changement global du climat, aux pluies acides ou à la pollution de notre planète en général. L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de COI. L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier. Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles. Ainsi, l'exploitation de l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 millions de tonnes de CO2, 21 mille tonnes de SO2 et 17,5 mille tonnes de NOx .Ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides.

L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets radioactifs dont on connait la durée de vie.
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 l'on n'en a pas besoin, entrainant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique. Les parcs éoliens de démontent très facilement en ne laissant pas de trace, l'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains : 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 simuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales, c'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables. 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 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 cout d'investissement nécessaire est fiable par rapport à des énergies plus traditionnelles.
Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.

I.3.2. Inconvénients :

Mêmes s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages, l'impact visuel ça reste néanmoins thème subjectif.

- *Le bruit :* Il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
- *L'impact sur les oiseaux :* Certaines études montrent que ceux-ci évitent les Aérogénérateurs. D'autres migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéroturbines.
- *La qualité de la puissance électrique :* La source d'énergie éolienne étant stochastique, 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 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 suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- *Le cout :* reste en encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.

I.4. Principe de fonctionnent d'une chaine éolienne:

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure. I.1).

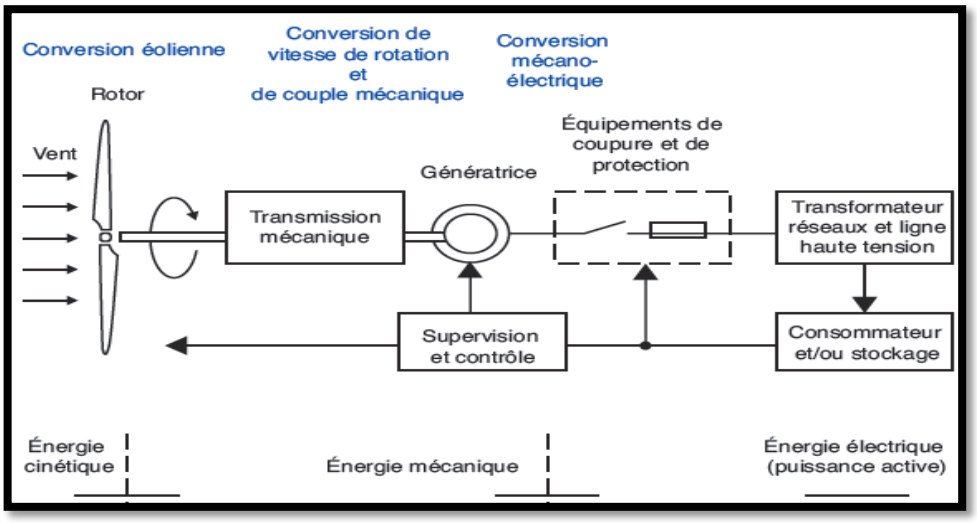


Fig. I.1 : Schéma de fonctionnement d'une turbine.

I.5. Les différents types d'éolienne :

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

I.5.1. Turbine a axe vertical :

Les plus connues sont appelées « Darrieus » (du nom de leur inventeur Goerges Darrieus). Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. Dans ce type l'arbre est perpendiculaire au sol ; il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, donc pas besoin de munir la machine d'une tour, facilitant ainsi les interventions de maintenance (Figure. I.2).

I.5.2. Turbine à axe horizontal :

Même si elles nécessitent un mécanisme d'orientation des pales, Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées. Dans ce type d'éoliennes l'arbre est parallèle au sol. 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 (génératrice placée dans la nacelle, au plus près du rotor et de l'arbre) et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol capte le vent en hauteur, plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3.



Fig. I.2 : Eoliennes à axe vertical.



Fig. I.3 : Eoliennes à axe horizontal.

I.6. Principales composantes des éoliennes a axe horizontal :

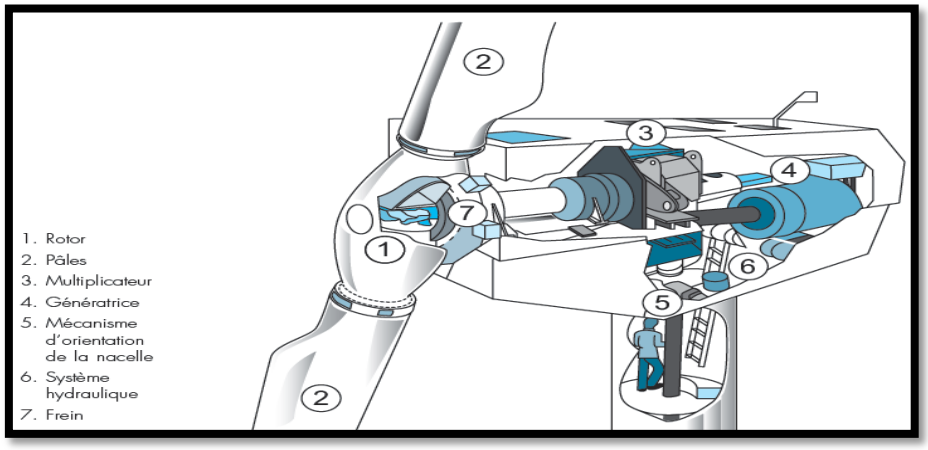


Fig. I.4 : Schéma global du système turbine

I.6.1. mat :

Il joue un rôle dans la production d'énergie, et doit supporter des efforts importants, en toutes directions. Par vent extrême, sa fondation doit compenser un effet de levier considérable. Les turbulences dues à la végétation et aux obstacles situés au sol sont sources de vibrations et d'efforts mécaniques sur le rotor. Elles fragilisent donc la structure, et introduisent un autre facteur de pertes de production. C'est pourquoi les mâts sont en général de plus en plus hauts mais elle se limiter à 100 ou 120 m. Cette limite s'explique par un ensemble de contraintes :

- ✓ La limite induite par la taille des grues nécessaires à la construction ;
- ✓ Les coûts de transport ;

- ✓ La limite liée aux efforts en base du mât.

I.6.2. Les pales :

Les pales sont les éléments les plus représentatifs de l'éolienne. Ce sont aussi les seuls éléments en mouvement. Elles constituent le point d'entrée de l'énergie apportée par le vent.

I.6.3. Le rotor :

Le rotor de l'aérogénérateur est constitué de pales qui sont elles-mêmes montées sur un moyeu. Le rôle essentiel du rotor est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

I.6.4. Multiplicateur :

Il a pour rôle d'adapter la vitesse de l'arbre à la vitesse de la génératrice.

I.6.5. Génératrice :

Transforme l'énergie mécanique en énergie électrique, qui est dans notre cas une machine asynchrone à double alimentation.

I.6.6. Frein :

Permet d'arrêter le système en cas de surcharge.

I.6.7. Mécanisme d'orientation de la nacelle :

C'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.

A tous cela vienne s'ajoute l'anémomètre, le système de refroidissement et l'arbre de transmission.

I.7. Intérêt de l'éolienne à vitesse variable:

La figure I.5 illustre les caractéristiques non linéaires (puissance mécanique-vitesse mécanique). Pour chaque vitesse du vent il y a une courbe associée L'éolienne, à qui appartiennent ces caractéristiques, fonctionne, sans commande, avec un vent dont la vitesse est comprise entre une valeur minimale (V_{min}=7.1m/s) et une valeur maximale (V_n=12m/s). Lorsque la vitesse du vent varie entre V_{min}etV_n, la vitesse mécanique du générateur varie entre la vitesse de synchronisme Ωs et la vitesse mécanique nominale $\Omega_{mec\ nom}$, ce qui correspond au point 3, 2 et I. Dans ce sens, et selon la figure I.10, l'éolienne produit de la puissance mais n'est pas au maximum possible, voir points 2 et 3. Cependant, sur les courbes de puissance il y a des

points de puissance maximale (4, 5 et 6) qui correspondent à des vitesses différentes. Il est facile de constater, alors, que faire fonctionner l'éolienne à ces points de fonctionnement permet de maximiser la puissance extraite du vent lors de la variation de ce dernier. Pour cette raison, et pour ne pas dépasser la puissance nominale du générateur éolien, deux politiques de contrôle, selon la vitesse du vent, permettent de maximiser l'exploitation de l'éolienne [2]:

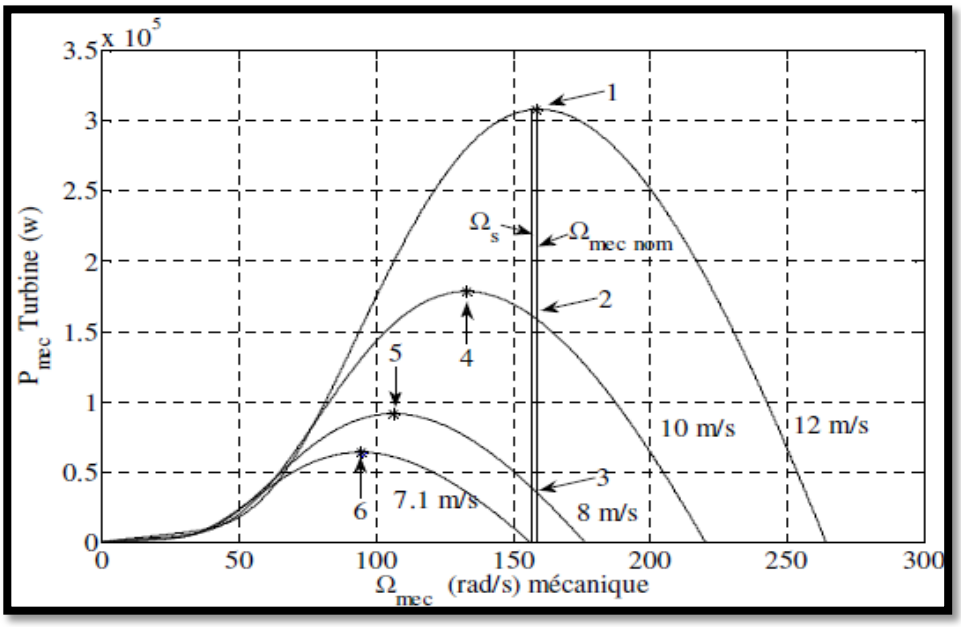


Fig. I.5 : Caractéristique (puissance - vitesse mécanique).

- Pour maximiser la puissance, lorsque la vitesse du vent est inférieure à sa valeur nominale, la vitesse mécanique de l'éolienne est contrôlée ce qui correspond aux points 4, 5 et 6 par exemple. Cette commande permet aussi de commencer la production de l'énergie avec des vitesses du vent inférieures à (V_{min}), par exemple cette éolienne à vitesse variable commence à produire de l'énergie dès la vitesse du vent qui égale à (V= 4 m/s).

- Pour fonctionner avec un vent dont la vitesse est supérieure à une valeur nominale et augmenter l'énergie électrique, l'angle des pales de l'éolienne est contrôlé afin de conserver la puissance produite proche de sa valeur nominale. Cette commande permet de fonctionner avec des vitesses du vent supérieures à la vitesse nominale, à condition que l'éolienne supporte les contraintes mécaniques.

I.8. La puissance aérodynamique captée par l'éolienne et coefficient de Puissance :

Selon le théorème de Betz, la vitesse du vent traversant la surface balayée par le rotor est supposée égale à la moyenne de la vitesse moyenne du vent non perturbé en amont de l'éolienne] et de sa vitesse après le passage à travers le plan de rotor (voir figure I.6) [3]

$$v_m = \frac{v + v_2}{2} \tag{I.1}$$

Ainsi, la masse de l'air traversant la surface balayer par le rotor est donnée par :

$$\mathrm{m}=\frac{1}{2}\rho s(v_1 + v_2) \tag{I.2}$$

Où ρest la masse volumique de l'air.

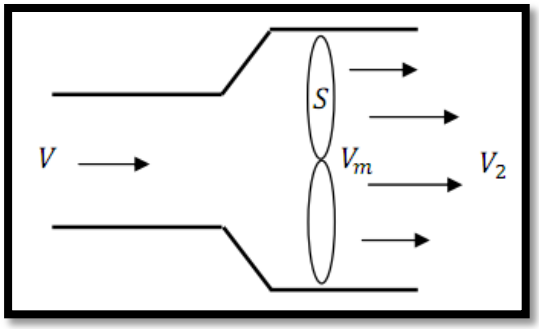


Fig. I.6. : Démonstration de la loi de Betz.

De plus, la puissance extraite du vent par la turbine selon la seconde loi de Newton est exprimée par la relation suivante :

$$p_t=\frac{1}{2}m(v^2 - {v_2}^2) \tag{I.3}$$

En remplaçant par son expression dans (I.2) on obtient :

$$p_t=\frac{1}{4}\rho s(v + v_2)(v^2 - {v_2}^2) \tag{I.4}$$

Comparons maintenant ce résultat avec la puissance totale d'un flux d'air non perturbé traversant une même surface sans la présence du rotor qui perturbe le vent.

Nous notons cette puissance, elle est donnée par :

$$p_v=\frac{1}{2}\rho s v^3 \tag{I.5}$$

La relation entre la puissance extraite du vent et celle du vent non perturbé est exprimé par :

$$\frac{p_t}{p_v} = (1/2)(1 - {v_2}^2/v^2)(1 + v_2/v) \tag{I.6}$$

Nous pouvons tracer l'allure de $(\frac{p_t}{p_v})$ en fonction de $(\frac{v_2}{v})$ comme l'illustre la figure (I.7)

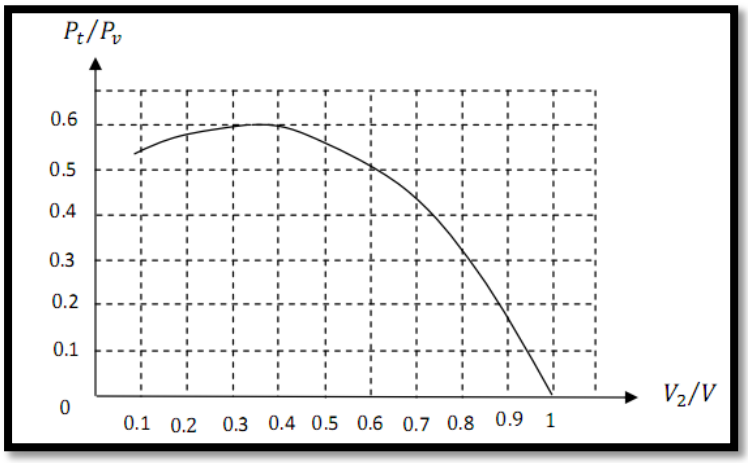


Fig. I.7 : Rapport des deux puissances en fonction du rapport des deux vitesses du vent en aval et en amont.

Comme on peut le noter, cette fonction atteint son maximum pour $(\frac{v_2}{v} = \frac{1}{3})$la valeur maximale de la puissance extractible du vent est 0.59 de la puissance totale contenue dans le vent. Cependant, on peut constater que pratiquement le dispositif de conversion extrait une Puissance $p_t$inférieure à la puissancep_v . On définit alors un coefficient de puissance de l'aérogénérateur par la relation suivante :

$$c_{p=}\frac{p_t}{p_v} \quad \text{(I.7)}$$

Avec: $c_{p<1}$.

On peut écrire donc :$p_t = c_p p_v$ (I.8)

On remplaçant par son expression dans (I.5), on obtient :

$$p_t = 1/2 c_p \rho s v^3 \quad \text{(I.9)}$$

La valeur de ce coefficient de puissance dépend de la vitesse de rotation de la turbine et peut s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique λ comme suite :

$$c_p = c_p(\lambda) \quad \text{(I.10)}$$

Avec :

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{v} \quad \text{(I.11)}$$

Ou $R\Omega_t$ est la vitesse linéaire périphérique en bout de pale de l'hélice.

On note que ce coefficient de puissance peut évoluer pour le même type de turbine en fonction du nombre des pales 1, 2, 3 et 4 mais sa valeur reste bien en dessous de la limite de Betz (0.59). Et pour la même turbine ce coefficient peut varier aussi en fonction de l'angle de calage qui indique le degré d'inclinaison des pales à chaque fois.

I.9. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne :

La relation (I.9) indique que la puissance éolienne captée est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Donc, il existe pour la puissance éolienne nominale une vitesse du vent nominale pour laquelle l'aérogénérateur est bien dimensionné dans ses divers éléments. C'est pour cela que la turbine éolienne doit modifier ses paramètres afin de maintenir la vitesse à sa valeur nominale et d'éviter toute destruction mécanique, a côté de la vitesse nominale$v_n$on spécifie aussi [4], la vitesse de démarrage v_d qui représente la vitesse de début de fonctionnement, la vitesse maximale du ventv_{max} pour laquelle la turbine ne convertit plus d'énergie éolienne, pour des raisons de sécurité de fonctionnement, les vitesses v_d,$v_n$et v_{max}, définissent quatre zones de fonctionnement sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent (Figure I.8) :

- La zone 1 : où p_t=0, la turbine ne fonctionne pas.
- La zone 2 : la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent.
- La zone 3 : la vitesse de rotation est maintenue constante et la puissance p_t fournie reste égale à p_{tn}.
- La zone 4 : il faut arrêter le transfert d'énergie par un système de sureté.

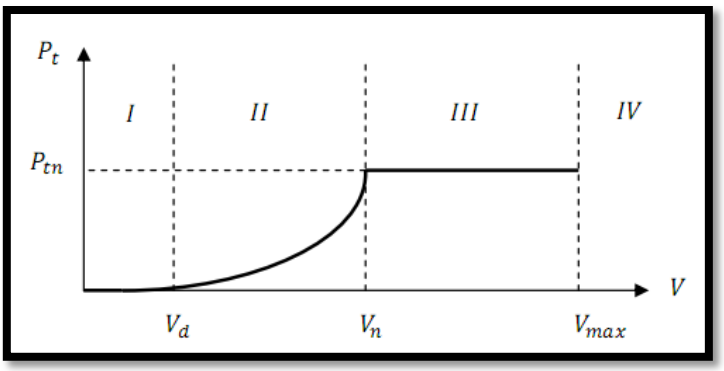


FIG.I.8 Puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.

Pour contrôler la puissance aérodynamique capturée et la limiter lorsque la vitesse du vent est très élevée, on peut utiliser l'une des deux techniques de contrôle connues surtout dans les grandes turbines sous les noms de "Pitch Control" et "Stall Control".

I.9.1. Le pitch contrôle:

C'est un contrôle par variation de l'angle de calage des pales (pas des pales) autour de leur axe longitudinal en fonction de la vitesse du vent et de la puissance active à extraire. En agissant par le Pitch Control, le coefficient de puissance C_p ne varie plus en fonction de λ comme précédemment mais en fonction de la vitesse du vent à vitesse de rotation constante, ce qui va permettre de maintenir la puissance constante dans la zone 3 à sa valeur maximale [5]. On peut noter que pour modifier l'angle de calage dans le Pitch Control dans un système de régulation automatique de vitesse de rotation on a besoin d'un régulateur électronique avec des masselottes centrifuges ou d'un régulateur électronique avec des servomoteurs, ce qui va permettre :

- Le démarrage à une vitesse du vent v_d réduite.
- La régulation de la vitesse angulaire de la turbine pour une vitesse du vent supérieure à la vitesse nominalev_n.
- L'optimisation du régime de conversion de l'énergie quand la vitesse du vent évolue entrev_d etv_n.
- La protection de l'éolienne contre les grandes vitesses du vent (>v_{max}) par la mise en drapeau des pales sans nécessité d'un système puissant de freinage pour les arrêts d'urgence.

I.9.2. Le stall contrôle :

C'est un régulateur par décrochage aérodynamique, autrement dit le comportement géométrique des pales peut évoluer selon le rapport entre les deux vitesses du vent et de la turbine, ce qui permet le décrochage à partir d'une certaine vitesse du vent. Ce décrochage dépend notamment de l'angle de calage des pales qui peuvent être fabriquées avec un pas variable suivant la position le long de la pale et possèdent aussi un mécanisme de freinage en bout. Cette technique du " Stall Control" a aussi quelques avantages :

- Pas de système de contrôle d'angle de calage

- Construction plus simple et moins couteuse du rotor.
- Maintenance plus aisée et fiabilité meilleure.

Afin d'améliorer le degré de captage d'énergie par le Stall Control, on peut combiner ce dispositif à une machine à deux vitesses de rotation, ce qui permet d'étendre la plage de production et la rendre comparable avec celle obtenue dans le cas du Pitch Control.

Certains aérogénérateurs utilisent un système hybride nommé le Stall Actif qui combine les avantages des deux systèmes où le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à une orientation minime des pales nécessitant des moyens de réglage plus économiques et plus robustes que dans le cas du système de Pitch Control.

I.10. La vitesse du vent continument variable :

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend de cette configuration.

Le fonctionnement à vitesse fixe possède les caractéristiques suivantes :

- Système électrique plus simple.
- Plus grande fiabilité.
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- Pas besoin de système électronique de commande.
- Moins cher.

Et le fonctionnement à vitesse variable est caractérisé par :

- Augmentation du rendement énergétique ;
- Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance ;
- Réduction des efforts subis par le train de puissance ;
- Génération d'une puissance d'une meilleure qualité.

Ainsi, il apparaît clairement l'importance du fonctionnement à vitesse variable et la nécessité du réglage continu de celle-ci afin de maintenir le coefficient de puissancec_p à sa valeur maximale, surtout si la génératrice électrique est de type synchrone ou asynchrone directement couplée au réseau. En effet, dans ce cas, la vitesse est sensiblement constante et le rendement aérodynamique ne peut être maximal que pour une seule vitesse du vent (λ_{opt}).

Un système à deux vitesses de rotation est possible mais la vitesse électroniquement variable apporte beaucoup plus en terme énergétique. La figure (I.9) montre que la position du maximum de la courbe de puissance en fonction de la vitesse de rotation change avec la vitesse du vent. Typiquement, un réglage direct ou indirect de la vitesse est nécessaire pour bien optimiser les transferts énergétiques [6].

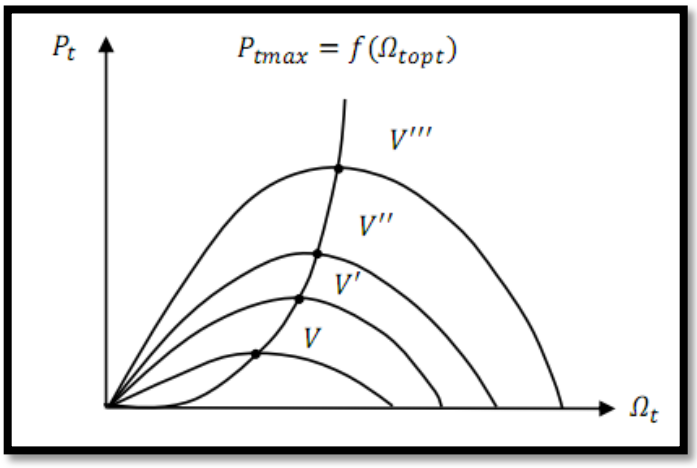


Fig. I.9 : Variation de la puissance éolienne maximale en fonction de la vitesse du vent.

I.11. 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.
- Un rotor de génératrice possédant une inertie et un coefficient de frottement.

I.11.1. Hypothèse simplificatrice 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 (Figure I.10) [7].

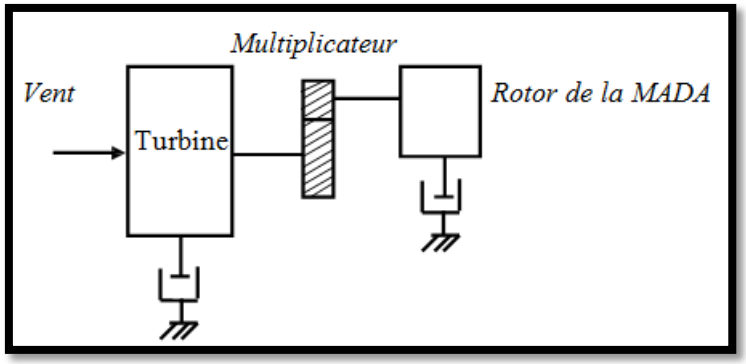


Fig. I.10 : Modèle mécanique simplifié de la turbine.

I.11.2 Modélisation de la vitesse de vent :

Le vent est la raison d'être des aérogénérateurs. C'est l'entrée du système qu'on étudie. L'énergie cinétique contenue dans le vent est récupérée en partie, transformée en énergie mécanique par le biais de la turbine, puis en énergie électrique grâce au générateur.

Les propriétés dynamiques du vent sont donc 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 est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps.

$$V = f(t) \tag{I.12}$$

Cette fonction du vent, peut être décomposée en une composante moyenne, variant lentement, et des fluctuations [7] :

$$V(t) = V_0 + \sum_{i=1}^{n} A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \tag{I.13}$$

Tel que :V_0est la composante moyenne ;

A_i,$\omega_i$etφ_i :sont respectivement l'amplitude, la pulsation et la phase initiale de chaque composante spectrale fluctuantes.

La figure (I.11) présente deux profils de vent différent, l'un reflétant la stochastique 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.

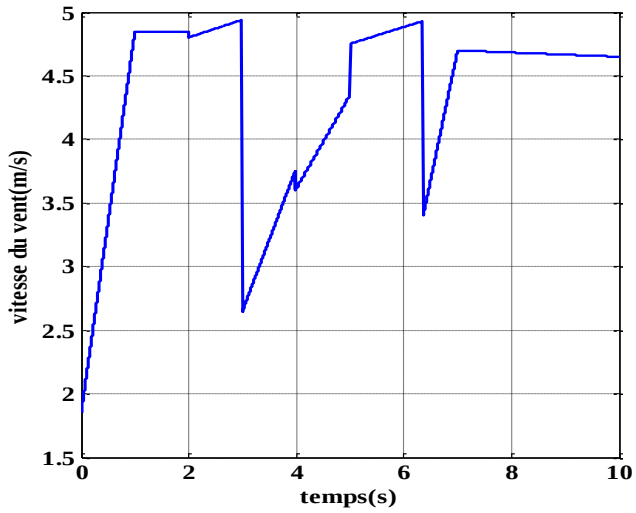


Fig. I.11 : le vent applique au système.

I.11.3. Modèle de la turbine :

Précédemment, on a vu que la puissance éolienne du vent est exprimée par la relation (I.5) comme suit :

$$p_v = \frac{1}{2}\rho S V^3 \tag{I.14}$$

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

$$P_t = C_p P_v = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta)\rho S V^3 \tag{I.15}$$

Le coefficient de puissance Cp représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne et il dépend de la caractéristique de la turbine. La figure (I.12) représente la variation de ce coefficient en fonction du rotation de vitesse, et de l'angle de l'orientation de la pale β pour une éolienne de I.5 MW prise comme exemple d'application dans cette étude [7].

Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent : $\lambda = \dfrac{\Omega_t R}{V}$ (I.16)

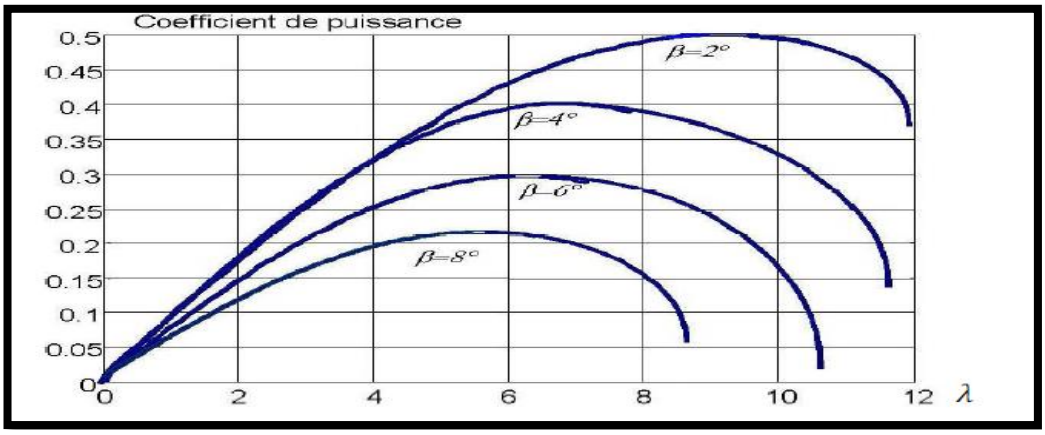


Fig. I.12. : Coefficient aérodynamique en fonction du rotation de vitesse de la turbine (λ) pour une éolienne de I.5 MW [7].

A partir des relevés réalisés sur cette éolienne de 1.5 MW, l'expression du coefficient de puissance est interpolée sous la forme suivante [7].

$$C_p(\lambda,\beta) = (0.5 - 0.00167(\beta - 2))\sin\left[\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)}\right] - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad \text{(I.17)}$$

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

$$T_{aer} = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2\Omega_t} c_{p\rho} S V^3 \quad \text{(I.18)}$$

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 :

On écrit donc :

$$c_t = \frac{c_p}{\lambda} = c_p \frac{V}{R\Omega_t} \quad \text{(I.19)}$$

$$T_{\alpha er} = \frac{1}{2} c_t \rho S R V^3 \quad \text{(I.20)}$$

I.11.4. Modèle du multiplicateur :

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

$$\Omega_t = \frac{\Omega_e}{G} \quad \text{(I.21)}$$

$$T_g = \frac{T_{\alpha er}}{G} \quad \text{(I.22)}$$

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

I.11.5. L'équation mécanique 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 :

$$J \frac{d\Omega_e}{dt} + D\Omega_e = T_g - T_{em} \quad \text{(I.23)}$$

Avec :

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_e \quad \text{(I.25)}$$

Ou

$$D = \frac{D_t}{G^2} + D_e \quad \text{(I.26)}$$

J_t ,D_t,J_e, D_e , Jet D: 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.13) 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.

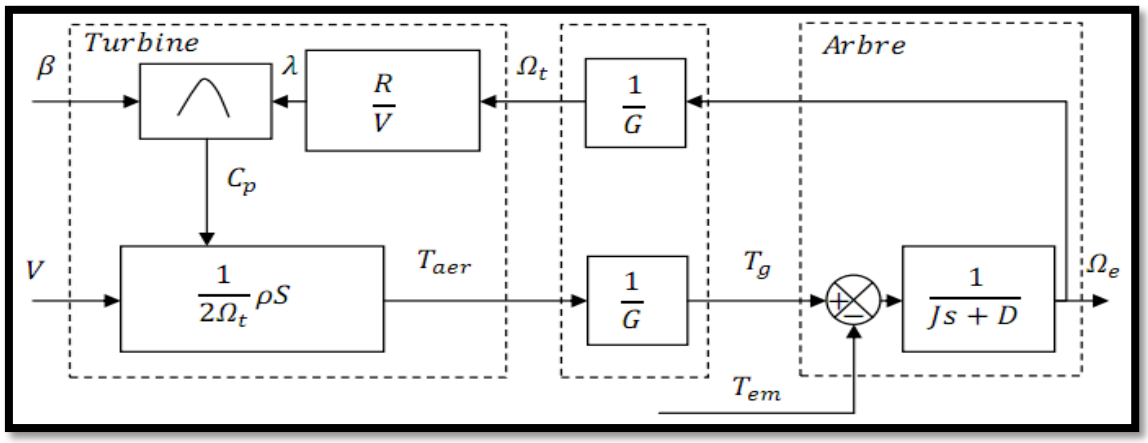


Fig. I.13 : Schéma bloc du modèle de la turbine.

I.12. Présentation de la machine asynchrone triphasée :

Le stator d'une machine asynchrone est constitué de trois enroulements couplés en étoile ou en triangle. On considérera que le rotor de la machine supporte un bobinage semblable à celui du stator : un bobinage triphasé avec un même nombre de pôles que celui du stator. Ces trois bobinages sont couplés en étoile et, selon la constitution de ce rotor, deux technologies de machine peuvent être distinguées.

Pour la première technologie, les bobinages au rotor sont court-circuités sur eux même. Les réalisations industrielles utilisent généralement un rotor constitué de barres de cuivre ou d'aluminium conductrices, court-circuités par un anneau conducteur à chaque extrémité. L'ensemble ressemble à une cage d'écureuil d'où son appellation courante de **« machine à cage d'écureuil ».** Fig. I.14

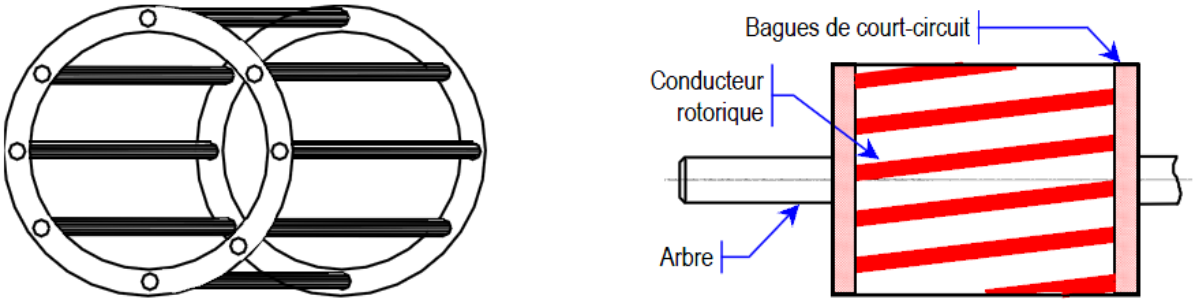


Fig. I.14 : Rotor à cage d'écureuil.

Pour la seconde technologie, le rotor bobiné comprend un bobinage triphasé, semblable à celui du stator raccordé en étoile et dont l'extrémité libre de chaque enroulement est reliée à

une bague tournante avec l'arbre du rotor. Trois balais établissent des contacts sur cette bague et permettent une connexion externe des bobinages au rotor. Cette connexion peut être une alimentation externe qui permet de réaliser un contrôle des grandeurs rotorique. Cette technologie est encore connue sous le nom de **« Machine à Double Alimentation ».**

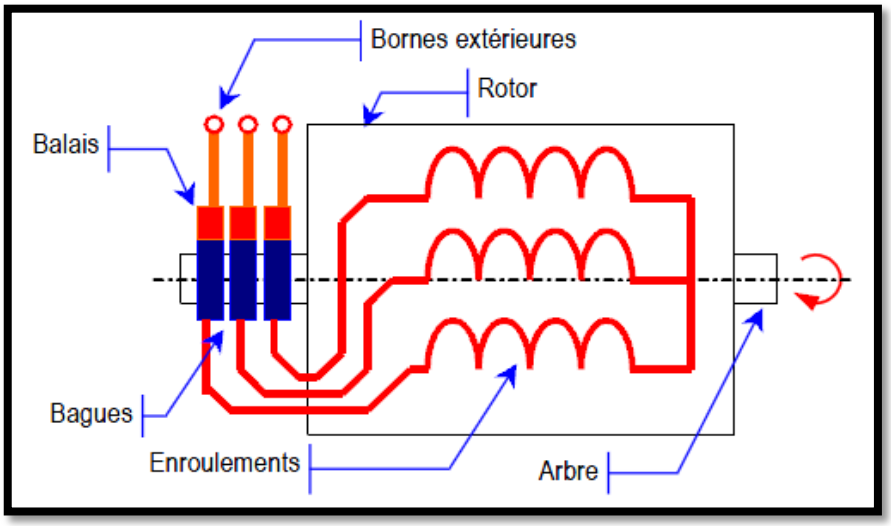


Fig. I.15. Constitution du rotor bobinée.

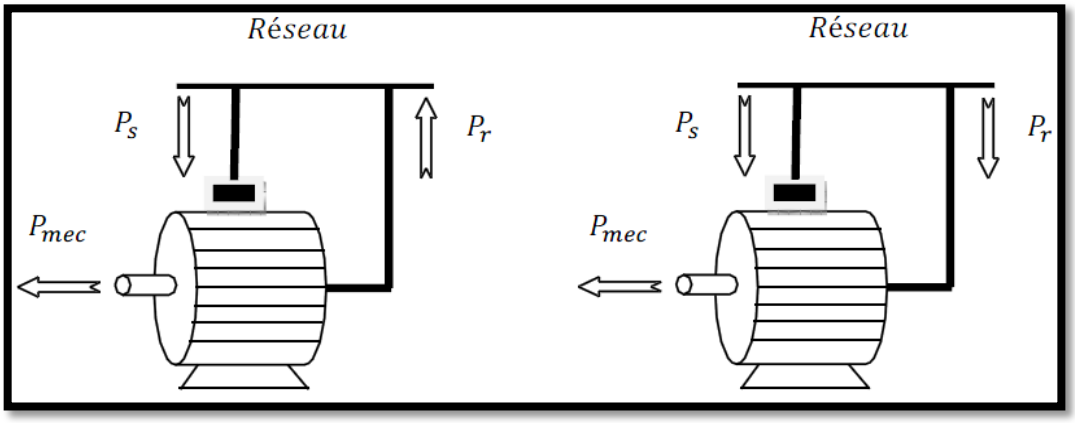
I.13. Modes de fonctionnement de la MADA :

I.13.1 Fonctionnement en moteur hypo-synchrone :

La puissance est fournie par le réseau au stator, et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme, (Fig.16.a). La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.

I.13.2 Fonctionnement en moteur hyper-synchrone :

La puissance est fournie par le réseau au stator et 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, (Fig. I.16.b). La machine à cage classique ne peut fonctionner dans ce régime.



(a) hypo-synchronisme. (b) hyper-synchronisme.

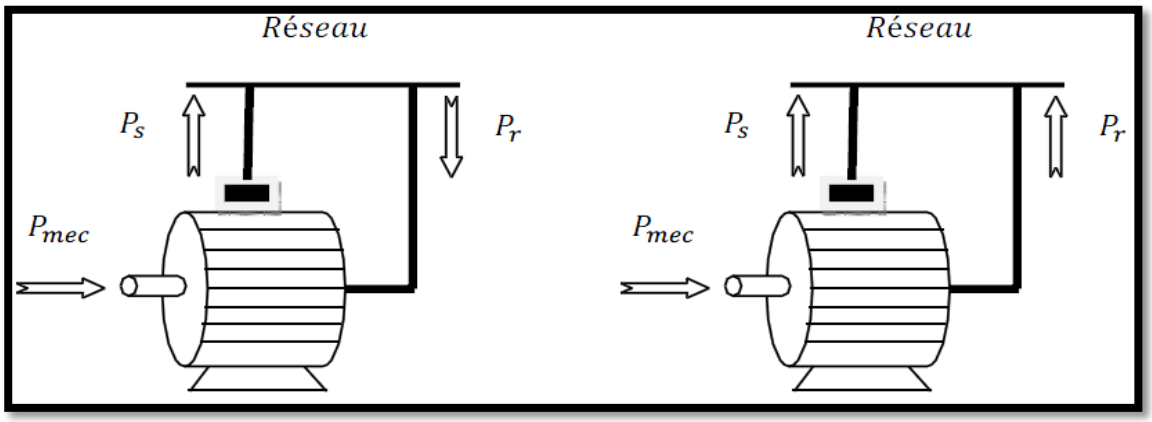
Fig. I.16 **:** Fonctionnement de la MADA en mode moteur.

I.13.3. Fonctionnement en génératrice hypo-synchrone :

La figure (I.17**)** a montre que la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est réabsorbée par le rotor. Nous avons dans ce cas un fonctionnement en mode générateur en dessous de la vitesse de synchronisme.

I.13.4 Fonctionnement en génératrice hyper-synchrone :

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, (Fig. I.17 b). La machine à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement, mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor.



(a) hypo-synchronisme. (b) hyper-synchronisme.

Fig. I.17 : Fonctionnement de la MADA en mode générateur.

I.14. Modélisation de la MADA :

Le modèle de la MADA est équivalent au modèle de la machine asynchrone à cage. En effet, la cage de la machine est assimilée au bobinage triphasé de la MADA. Cependant le rotor de la MADA n'est pas en court-circuit et donc les tensions rotoriques ne sont pas nulles.

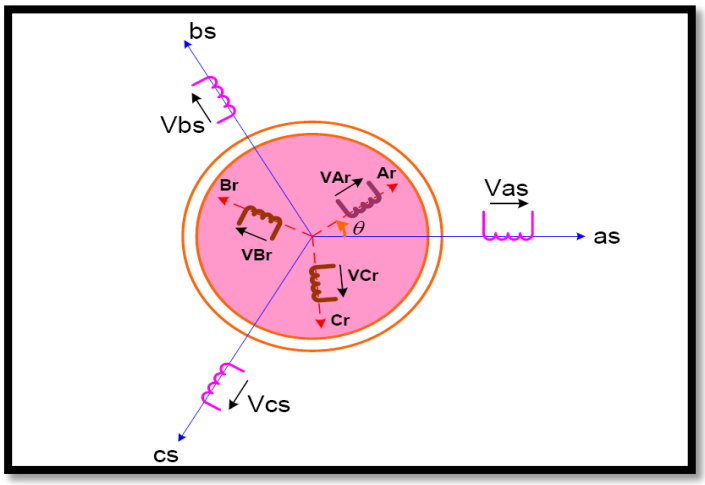


Fig. I.18 : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation

I.14.1. Hypothèses simplificatrice :

La machine asynchrone à double alimentation (MADA), avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter à une analyse tenant de sa configuration exacte. De ce fait, la mise en équations nous impose certaines hypothèses simplificatrices, dans le but d'établir un modèle simple [8].

- La machine est de constitution symétrique et a entrefer constant.
- Le circuit magnétique n'est pas saturé et parfaitement feuilleté, il en résulte que les pertes fer et les pertes par hystérésis sont négligeable et que seul les enroulements sont parcourus par les courant s.
- La f.m.m créée dans une phase au stator et au rotor, est à répartition sinusoïdale le long de l'entrefer.
- n'est pas prise en compte, il en résulte que les résistances sont constantes et tous les coefficients L'influence de l'effet de la température sur les résistances ainsi que la saturation sur les inductances d'inductance propre sont constants et les inductances mutuelles sont fonction de la position de leurs axes magnétiques.

I.14.2. Equations électriques de la machine :

Les équations des tensions statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases}[V_S] = [R_S][I_S] + \frac{d}{dt}[\Phi_S] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\Phi_r]\end{cases} \quad \text{(I.24)}$$

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

$$\begin{cases}[\Phi_S] = [L_S][I_S] + [M_{Sr}][I_r] \\ [\Phi_r] = [L_r][I_r] + [M_{rs}][I_s]\end{cases} \quad \text{(I.25)}$$

Où :

$$[V_S] = \begin{bmatrix}V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs}\end{bmatrix}, [I_S] = \begin{bmatrix}I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs}\end{bmatrix}, [V_r] = \begin{bmatrix}V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr}\end{bmatrix}, [I_r] = \begin{bmatrix}I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr}\end{bmatrix} \quad \text{(I.26)}$$

$$[R_S] = \begin{bmatrix}R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s\end{bmatrix}, \quad [R_r] = \begin{bmatrix}R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r\end{bmatrix} \quad \text{(I.27)}$$

$$[L_S] = \begin{bmatrix}l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s\end{bmatrix}, \quad [L_r] = \begin{bmatrix}l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r\end{bmatrix} \quad \text{(I.28)}$$

$$[M_{Sr}] = \begin{bmatrix}M_{sr}\cos(\theta) & M_{sr}\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr}\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{sr}\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr}\cos(\theta) & M_{sr}\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{sr}\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr}\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr}\cos(\theta)\end{bmatrix} \quad \text{(I.29)}$$

En remplaçant (I.25) dans (I .24), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases}[V_S] = [R_S][I_S] + \frac{d}{dt}([L_S][I_S]) + \frac{d}{dt}([M_{Sr}][I_r]) \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}([L_r][I_r]) + \frac{d}{dt}([M_{Sr}][I_S])\end{cases} \quad \text{(I.30)}$$

La puissance active et réactive statorique peuvent être calculés au moyen des expressions suivantes [9] :

$$P_S = \frac{3}{2} V_S \times I_S \quad \text{(I.31)}$$

$$Q_S = -\frac{3}{2} V_S \times I_S \quad \text{(I.32)}$$

I.14.3. Equations mécaniques de la machine :

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

$$C_{em} = \frac{3}{2} p(\emptyset_{ds} \times i_{qs} - \emptyset_{qs} \times i_{ds}) \quad \text{(I.33)}$$

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

$$J \times \frac{d}{dt} \times \omega = C_{em} - C_r - f_r \times \omega \quad \text{(I.34)}$$

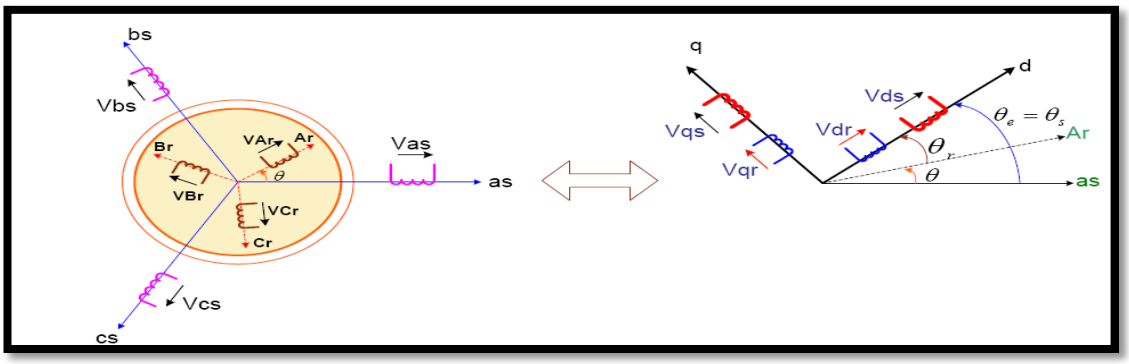


Fig. I.19 : Passage du triphasé au biphasé (Transformation de Park**)**.

La matrice de transformation de Park est définie comme suit :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{(I.35)}$$

Cette matrice permet le passage des composantes du système triphasé aux composantes du système biphasées comme indiqué sur la figure (I.19) Ainsi, les grandeurs statorique et rotorique sont transformées comme suit :

Tension :

$$\begin{cases} [V_{S,dq}] = [P(\theta_s)][V_{S,abc}] \\ [V_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)][V_{r,abc}] \end{cases} \quad \text{(I.36)}$$

Courant :

$$\begin{cases} [I_{S,dq}] = [P(\theta_s)][I_{S,abc}] \\ [I_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)][I_{r,abc}] \end{cases} \quad (I.37)$$

Flux :

$$\begin{cases} [\Phi_{S,dq}] = [P(\theta_s)][\Phi_{S,abc}] \\ [\Phi_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)][\Phi_{r,abc}] \end{cases} \quad (I.38)$$

Les relations entre les flux et les courants sont données par :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (I.39)$$

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (I.40)$$

Avec :

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

$L_s = l_s - M_s$: Inductance cyclique statorique.

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

Les équations des tensions rotoriques et statoriques, écrites dans repères de Park, sont données par le système ci-dessous :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} - \frac{d\theta_s}{dt}\Phi_{qs} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\theta_s}{dt}\Phi_{ds} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} \end{cases} \quad (I.41)$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} - \frac{d\theta_r}{dt}\Phi_{qr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\theta_r}{dt}\Phi_{dr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (I.42)$$

$$\text{Avec : } \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \text{ et } \theta_s = \theta_r + \theta \quad (I.43)$$

I.14.4. Les puissances actives et réactives de la MADA :

Les puissances actives et réactives côté stator :

$$P_s = \frac{3}{2}\left(V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs}\right) \quad (I.44)$$

$$Q_s = \frac{3}{2}\left(V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs}\right)$$

Les puissances actives et réactives côté rotor est :

$$\begin{aligned} P_r &= \tfrac{3}{2}\left(V_{dr} i_{dr} + V_{qr} i_{qr}\right) \\ Q_r &= \frac{3}{2}\left(V_{qr} i_{dr} - V_{dr} i_{qr}\right) \end{aligned} \tag{I.45}$$

I.14.5. Choix du référentiel :

I.14.5.1. Référentiels lie au stator :

$$\theta_s = 0 \implies \frac{d\theta_s}{dt} = 0 \implies \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r$$

$$\begin{cases} V_{\alpha s} = R_s \cdot I_{\alpha s} + \frac{d\Phi_{\alpha s}}{dt} \\ V_{\beta s} = R_s \cdot I_{\beta s} + \frac{d\Phi_{\beta s}}{dt} \\ V_{\alpha r} = R_r \cdot I_{\alpha r} - \frac{d\theta_r}{dt}\Phi_{\beta r} + \frac{d\Phi_{\alpha r}}{dt} \\ V_{\beta r} = R_r \cdot I_{\beta r} + \frac{d\theta_r}{dt}\Phi_{\alpha r} + \frac{d\Phi_{\beta r}}{dt} \end{cases} \tag{I.46}$$

I.14.5.2. Référentiels lie au rotor :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \implies \frac{d\theta_s}{dt} = \omega$$

$$\begin{cases} V_{xs} = R_s \cdot I_{xs} - \frac{d\theta_s}{dt}\Phi_{ys} + \frac{d\Phi_{xs}}{dt} \\ V_{ys} = R_s \cdot I_{ys} + \frac{d\theta_s}{dt}\Phi_{xs} + \frac{d\Phi_{ys}}{dt} \\ V_{xr} = R_r \cdot I_{xr} + \frac{d\Phi_{xr}}{dt} \\ V_{yr} = R_r \cdot I_{yr} + \frac{d\Phi_{yr}}{dt} \end{cases} \tag{I.47}$$

I.14.5.3. Référentiels lie au champ tournant :

Ce référentiel est caractérisé par $\omega = \omega_s$. Dans ce cas les grandeurs statoriques et rotoriques sont continués en régime permanent. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors d'une étude de la commande des machines. Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de PARK lié au champ tournant comme suit : [10]

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} - \omega_s \Phi_{qs} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} - (\omega_s - \omega)\Phi_{qr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + (\omega_s - \omega)\Phi_{dr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad \text{(I.48)}$$

I.14.6. Mise sous forme d'équations d'états :

Vu la nécessité de représenter le modèle non linéaire de la machine asynchrone à double alimentation sous forme d'équation d'état. Nous allons choisir dans tout ce qui suivra, le vecteur $[\Phi_{ds}, \Phi_{qs}, i_{dr}, i_{qr}, \omega]^t$ comme vecteur d'état et les grandeurs V_{dr},V_{qr}comme variables de commande [10].

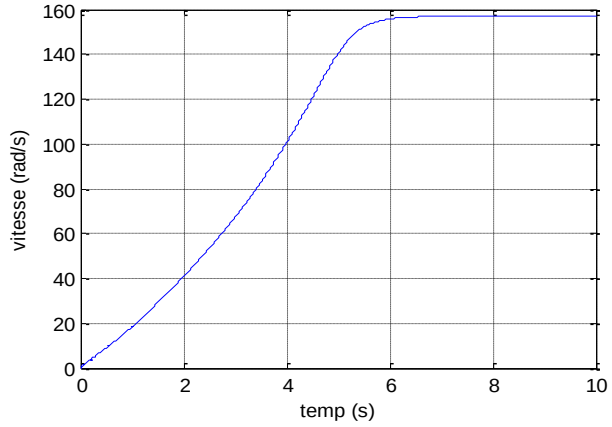
$$\begin{cases} \frac{d\Phi_{ds}}{dt} = -\alpha_s.\Phi_{ds} + \omega_s.\Phi_{qs} + \alpha_s.M.i_{dr} + V_{ds} \\ \frac{d\Phi_{qs}}{dt} = -\alpha_s.\Phi_{qs} - \omega_s.\Phi_{ds} + \alpha_s.M.i_{qr} + V_{qs} \\ \frac{di_{dr}}{dt} = -\gamma_r.i_{dr} + (\omega_s - \omega).i_{qr} + \alpha_s.\beta.\Phi_{ds} - \beta.p.\omega.\Phi_{qs} - \beta.V_{ds} + \left(\frac{1}{\sigma_r}\right).V_{dr} \\ \frac{di_{qr}}{dt} = -\gamma_r.i_{qr} - (\omega_s - \omega).i_{dr} + \alpha_s.\beta.\Phi_{qs} + \beta.p.\omega.\Phi_{ds} - \beta.V_{qs} + \left(\frac{1}{\sigma_r}\right).V_{qr} \\ \frac{d\omega}{dt} = p.\frac{\mu}{J}\left(\Phi_{qs}.i_{dr} - \Phi_{ds}.i_{qr}\right) - \frac{1}{J}.C_r - \frac{f_r}{J}.\omega \end{cases} \quad \text{(I.49)}$$

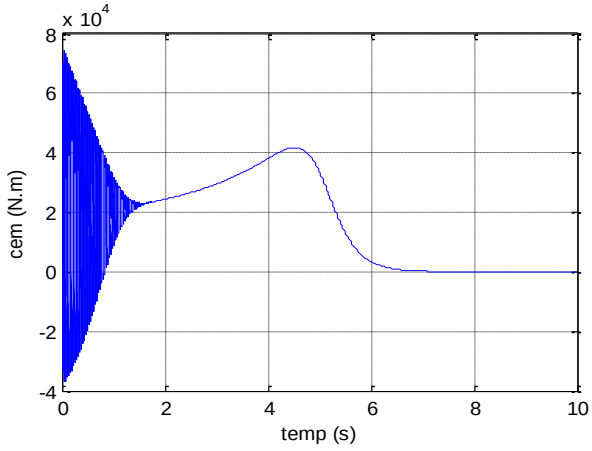
$$\alpha_S = \frac{R_s}{L_s} \;;\; \sigma_r = L_r.\left(1 - \frac{M^2}{L_s.L_r}\right) \;;\; \gamma_r = \frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_s.M^2}{{L_s}^2.\sigma_r} \;;\; \beta = \frac{M}{L_s.\sigma_r} \;;\; \mu = \frac{3.M}{I.L_s}$$

I.15. Résultats de simulation :

I.15.1. Fonctionnement moteur à vide :

Dans ce fonctionnement on applique une couple résistant nulle (Cr = 0 N.m).





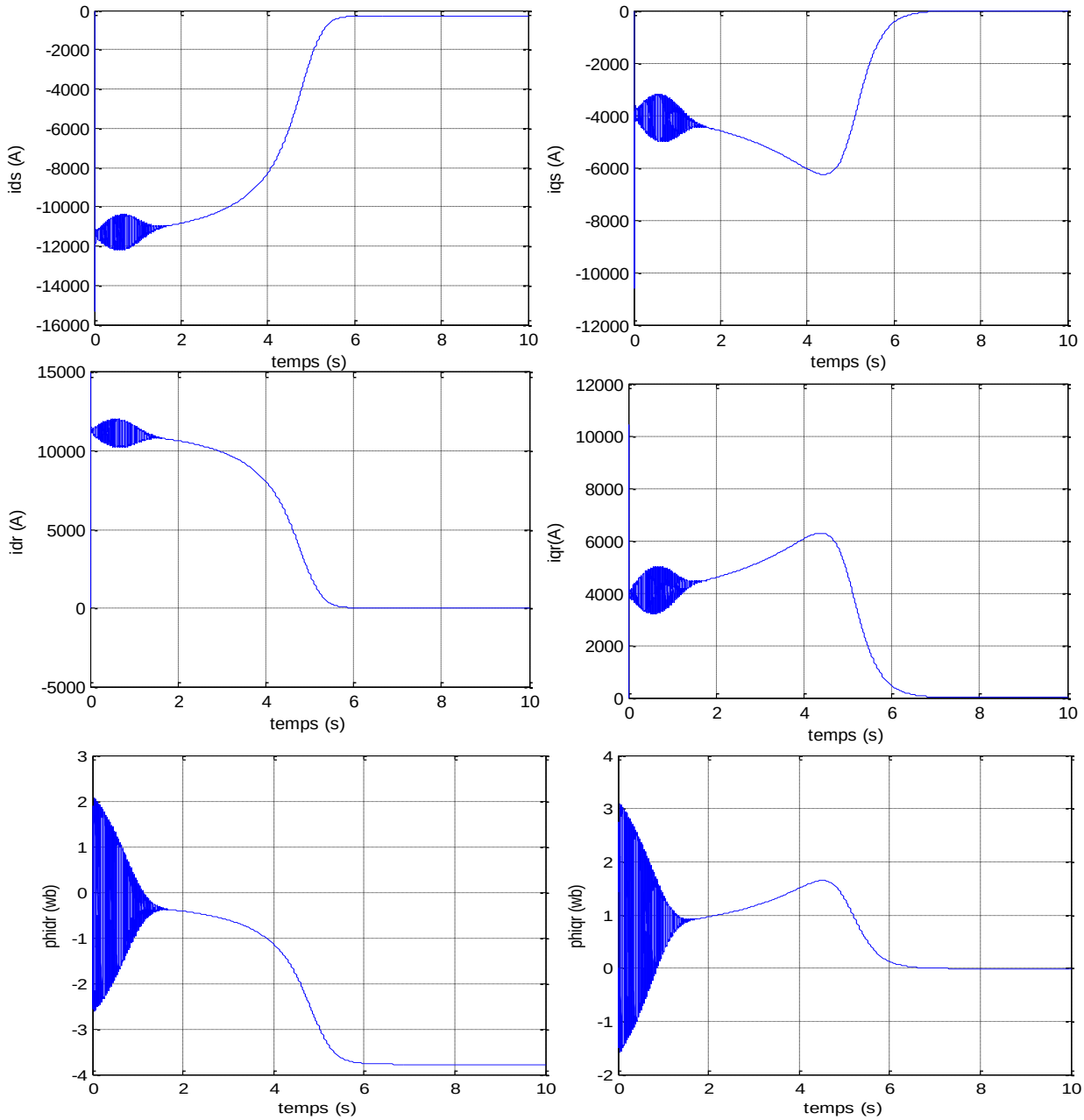


Fig. I.20. : Fonctionnement moteur à vide (Cr= 0).

I.15.2. Fonctionnement moteur en charge :

Dans ce fonctionnement on applique une couple résistant positive (Cr=9550N.m) à l'instant (t=7.5s).

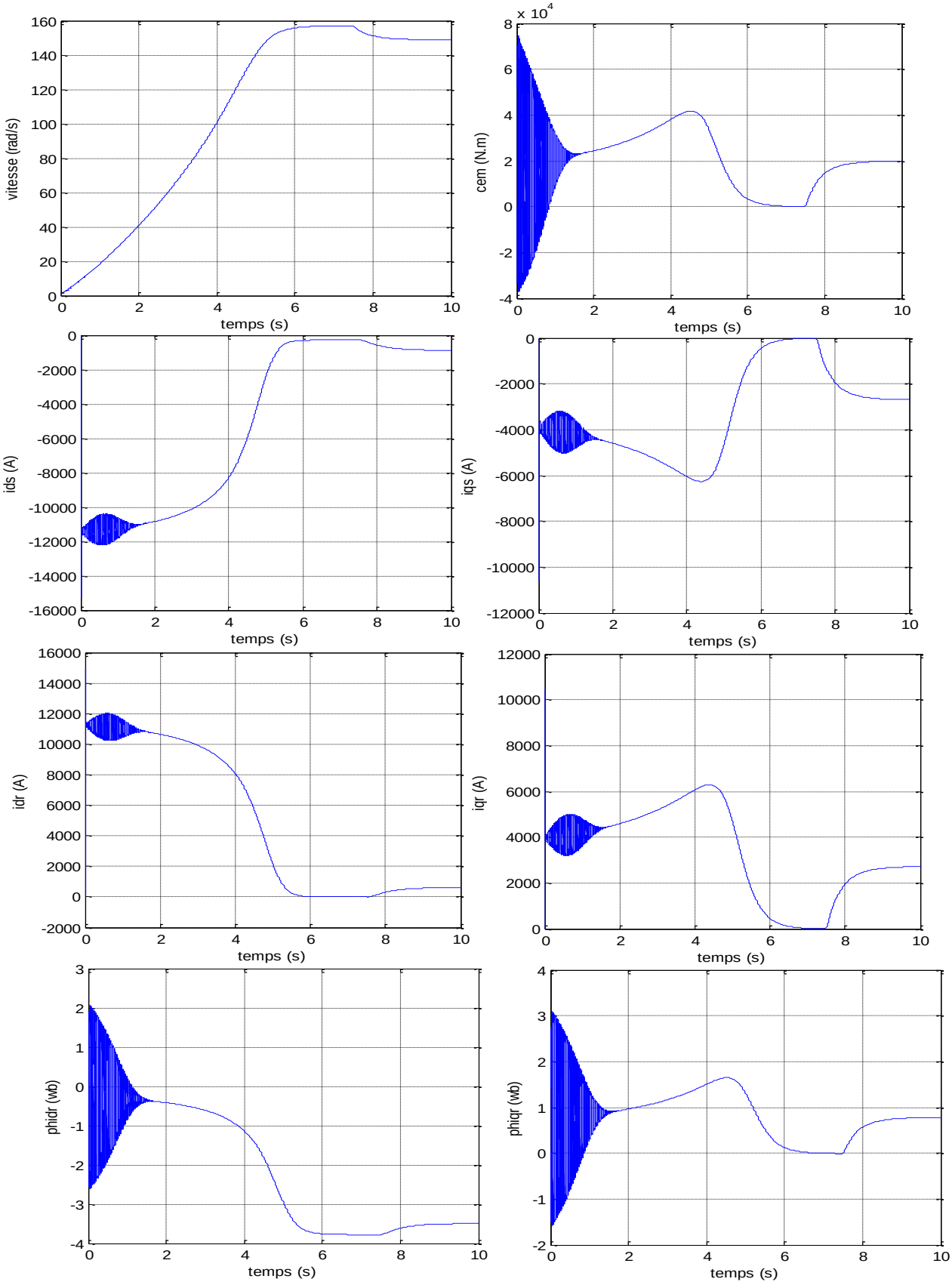


Fig. I.21. : Fonctionnement moteur en charge (Cr= 9550).

I.15.3 Fonctionnement génératrice :

Dans ce fonctionnement on applique une vitesse de vent variable.

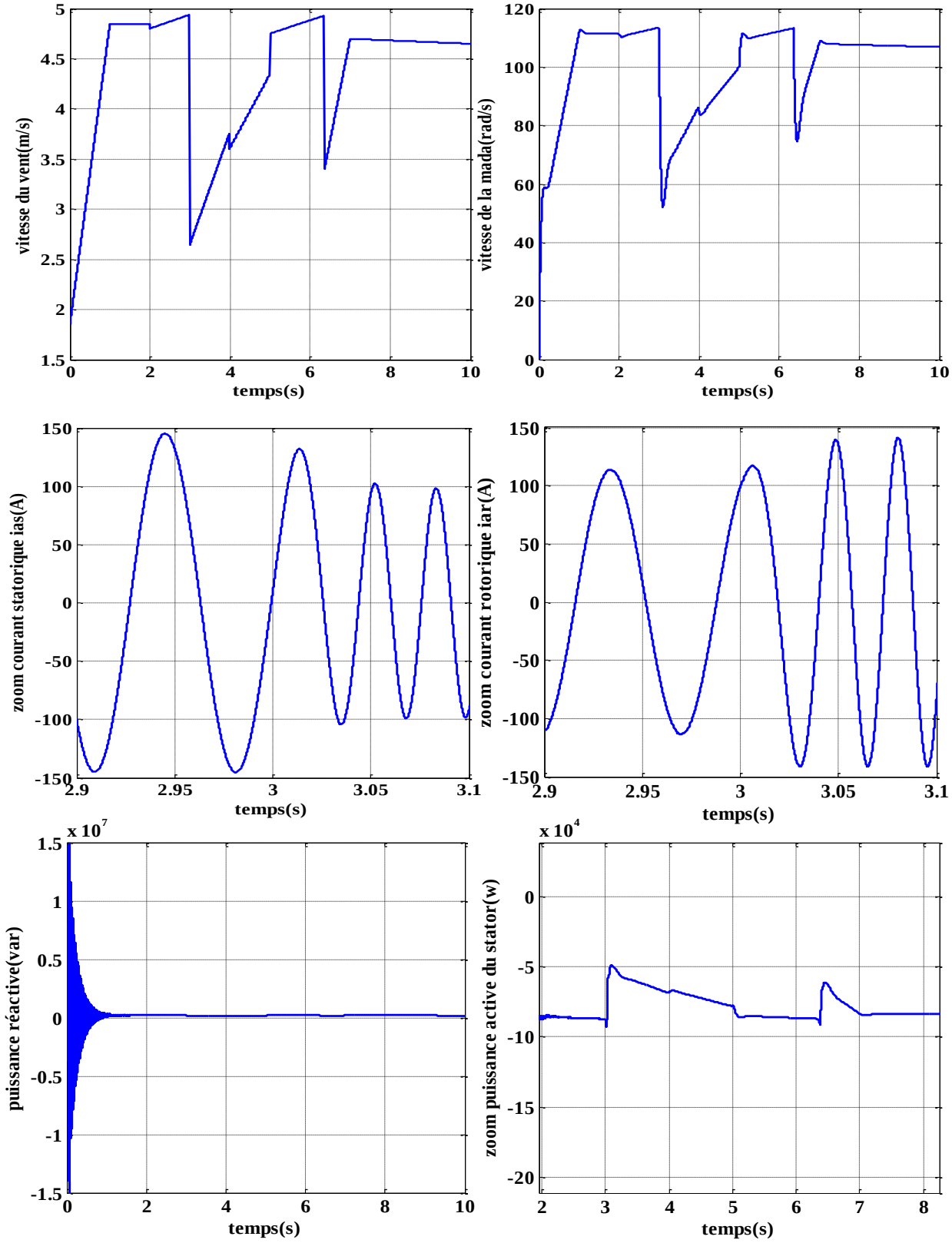


Fig. I.22 : Fonctionnement génératrice.

I.16. Interprétations des résultats de simulation :

Les résultats de la figure (I.21) et (I.22) montrent successivement le mode de fonctionnement en mode moteur a vide et en charge, on peut constater les remarques suivantes :

- on remarque au démarrage que le régime transitoire est oscillatoire par toutes les grandeurs de la machine (elle fonction comme une machine asynchrone classique).
- Apres l'introduction de la charge a l'instant (t=7.5 s) on a une augmentation du couple électromagnétique a fin de compensée le couple de charge (Cr), cela cause une domination de vitesse qui implique une augmentation des courants et des flux rotoriques, qui confirmé le couplage naturelle qui existant entre le flux et le couple.

La figure (I.22) montre le mode génératrice, on peut constater les remarques suivantes :

- la vitesse du vent c'est limage de la vitesse de la génératrice.
- les courants statoriques varient suivante la variation du la vitesse de la génératrice.
- On a une puissance active statorique prendre une signe négative ce qui montrer le fonctionnement génératrice.

I.17. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons modélise la turbine éolienne et la machine asynchrone a double alimentation dont la complexité a été réduite en utilisant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices et en effectuant un changement de repère par l'application de la transformation de Park, l'insertion de la charge engendre une variation de la vitesse (diminution en fonctionnement moteur) ce qui montre le fort couplage qui existe entre les deux axes (d q) ce qui rend le contrôle sépare très difficile. Pour remédier à ce problème, nous proposons dans le chapitre suivant la technique de la commande vectorielle.

On déduire que le vent c'est élément nécessaire qui influencer sur la variation des grandeurs importante qui caractérise le fonctionnement en mode générateur .

Chapitre II : alimentation et commande vectorielle du générateur éolien.

II.1. Introduction :

après avoir présente l'état d'art et le principe de la conversion de l'énergie éoliennes modélise les parties essentielles qui sont la turbine, le multiplicateur mécanique et la génératrice, nous nous attachons dans ce chapitre à présenter en premier lieu la commande vectorielle de la MADA basée sur l'orientation du flux statorique, puis on va modéliser l' alimentation électronique du rotor constituée de deux convertisseurs a commandé par MLI, en expliquant leur rôle et leur intérêt dans la bidirectionnalité et la nature de la conversion énergétique entre le rotor de la machine et le réseau électrique et aussi dans la diminution des distorsions des courants rotoriques qui peuvent être en phase avec les tensions.

La dernière partie de ce chapitre explique la stratégie à suivre pour commander rotoriquement l'éolienne avec une boucle d'asservissement de vitesse munie d'un régulateur pi permettant d'optimiser l'extraction maximale de l'énergie du vent à travers l'ajustement électronique continu de la vitesse spécifique de la turbine qui conduit à un point optimal à chaque fois que la vitesse de vent varie.

II.2. Commande vectorielle de la machine :

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

II.2.1 principe de la commande vectorielle :

Le principe du pilotage vectoriel des machines électriques est déduit de la machine à courant continu qui était dominante dans le marché industriel des machines à vitesse variable à cause de son caractère spécial lie au contrôle séparé du flux par le courant d'excitation et du couple par le courant d'induit (Figure II.1).

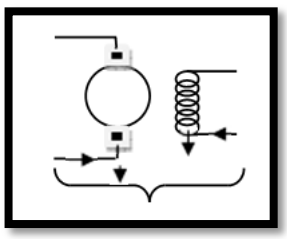


Fig. II.1. : Principe du pilotage découple du couple d'une mcc [11].

Cependant, le développement des nouvelles technologies de semi-conducteurs et de convertisseurs électroniques a facilité l'application de nouveaux algorithmes de commande sur le modèle de la machine a courant alternatif dans le repère de Park, avec l'orientation du flux statoriques ou du flux rotorique sur l'un des deux axes ou , ce qui permet de découpler des grandeurs internes dans la machine en régime transitoire et permanant et de lui donner une meilleure place dans le domaine de la conversion d'énergie électrique-mécanique en tant que moteur avec le contrôle indépendant du flux et du couple, ou mécanique-électrique en tant que générateur avec le contrôle indépendant des puissances active et réactive.

II.2.2. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique :

Pour faire l'orientation du flux statoriques, on fait appel au modèle de la machine dans le repère de Park selon les équations suivantes :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega)\Phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega)\Phi_{dr} \end{cases} \quad \text{(II.1)}$$

On oriente le flux statoriques selon l'axe d pour que la composante suivant l'axe q soit constamment nulle ($\Phi_{qs} = 0, \Phi_{ds} = \Phi_s$), et le modele de la machine sera plus simple comme il est presente ci-dessous :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega)\Phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega)\Phi_{dr} \end{cases} \quad \text{(II.2)}$$

L'expression des flux statoriques sera :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ 0 = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \end{cases} \quad \text{(II.3)}$$

D'où, on peut exprimer les courants statorique en fonction des courants rotorique :

$$\begin{cases} i_{ds} = -\frac{M}{L_s} \cdot i_{dr} + \frac{\Phi_{ds}}{L_s} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} \cdot i_{qr} \end{cases} \quad \text{(II.4)}$$

En remplaçant dans l'équitation des flux rotoriques, on trouve :

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_r \sigma i_{dr} + \frac{M}{L_s} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \sigma i_{qr} \end{cases} \quad \text{(II.5)}$$

En intégrant les équations des courants statoriques et les flux rotorique dans l'ensemble (II.2) le model de la machine devient :

$$\begin{cases} v_{ds} = \frac{R_s}{L_s} \cdot \Phi_{ds} - \frac{R_s}{L_s} \cdot M i_{dr} - \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = -\frac{R_s}{L_s} \cdot M i_{qr} + \omega_s \Phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + L_r \sigma \frac{di_{dr}}{dt} + e_d \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + L_r \sigma \frac{di_{qr}}{dt} + e_\Phi + e_q \end{cases} \quad \text{(II.6)}$$

Tels que :

$$\begin{cases} e_d = -L_r \omega_{gl} \sigma i_{qr} + \frac{M}{L_s} \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \\ e_\Phi = \frac{M}{L_r} \omega_{gl} \Phi_{ds} \\ e_q = L_r \omega_{gl} \sigma i_{dr} \end{cases} \quad \text{(II.7)}$$

On peut réduire, à partir des équations des tensions rotoriques, les relations des courants rotoriques comme suite :

$$\begin{cases} \frac{did_r}{dt} = \frac{1}{L_r \sigma} (v_{dr} - R_r i_{dr} - e_d) \\ \frac{diq_r}{dt} = \frac{1}{L_r \sigma} (v_{qr} - R_r i_{qr} - e_q - e_\emptyset) \end{cases} \quad \text{(II.8)}$$

Le couple électromagnétique devient :

$$T_{em} = -\frac{3}{2} p \frac{M}{L_s} \emptyset_{ds} iq_r \quad \text{(II.9)}$$

D'où, le composant du courant rotorique iq_r sera :

$$iq_r = -\frac{3}{2} \frac{L_s}{pM\emptyset_{ds}} T_{em} \quad \text{(II.10)}$$

Généralement, on utilise pour la production éolienne des génératrices de forte puissance avec des enroulements statoriques de résistances faibles. C'est pour ça, on peut admettre l'hypothèse de négliger ces résistances et simplifier les expressions des tensions statoriques comme suit :

$$\begin{cases} v_{ds} = \frac{d\emptyset_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = \omega_s \emptyset_{ds} \end{cases} \quad \text{(II.11)}$$

Si on suppose que le réseau électrique est stable, ayant pour tension simple et v_s pour

pulsationω_s (supposee constante), cela conduit a un flux statoriques constant $\emptyset_{ds}$, avec une variation nulle en regime etabli, ce qui permet d'ecrire :

$$\begin{cases} v_{ds} = 0 \\ v_{qs} = v_s = \omega_s \emptyset_{ds} \end{cases} \quad \text{(II.12)}$$

II.2.3. Relation entre puissances statoriques et courants rotoriques :

Dans le repère biphasé de Park, les puissances active et réactive statoriques de la machine s'expriment par les équations suivantes :

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2}\left(v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs}\right) \\ Q_s = \frac{3}{2}\left(v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs}\right) \end{cases} \quad \text{(II.13)}$$

Avec : v_{ds}= 0, et on remplaçant i_{ds} et i_{qs} par leurs expressions (II.4), on obtient :

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} v_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = -\frac{3}{2}\left(\frac{v_s}{L_s \omega_s} - \frac{M}{L_s} v_s i_{dr}\right. \end{cases} \quad \text{(II.14)}$$

En tenant compte de la nature de l'alimentation a découpage générée par la technique a MLI qui va être utilisée pour commander la machine ultérieurement, on peut considérer le cas où la machine fonctionne avec un facteur de puissance unitaire du cote du stator, participant ainsi à la production totale de la puissance active P_s (puissance reactive Q_s nulle). Ce qui va permettre à partir des équations (II.14) de déduire la relation suivante :

$$i_{dr} = \frac{\emptyset_{ds}}{M} \quad \text{(II.15)}$$

II.2.4. Relation entre tensions et courants rotoriques :

Exprimant d'abord les flux rotoriques d'après les équations (I.39) et (I.40), en remplaçant les courants statoriques par leurs expressions dans les équations (II.5)

$$\begin{cases} \emptyset_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{dr} + \frac{M v_s}{\omega_s L_s} \\ \emptyset_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{qr} \end{cases}$$

(II.16)

Si on introduit ces expressions dans le système d'équations (II.1), les tensions rotoriques s'expriment en régime permanant, ou les dérivées des courants disparaissent, par :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} - g\omega_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})i_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + g\omega_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})i_{dr} + g\omega_s \frac{Mv_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad \text{(II.17)}$$

Avec :

$L_r - \frac{M^2}{L_s}$: Un terme de couplage entre les deux axes à faible influence compensable dans la boucle de commande [12] ;

$g\omega_s \frac{Mv_s}{\omega_s L_s}$: Une force électromotrice dépendante de la vitesse.

II.3. Modélisation de l'alimentation de la machine :

Comme l'indique la figure (II.2), le stator de la génératrice est directement connecté au réseau alors que son rotor est alimenté par le réseau via un convertisseur statique permettant le redressement et l'ondulation de la tension.

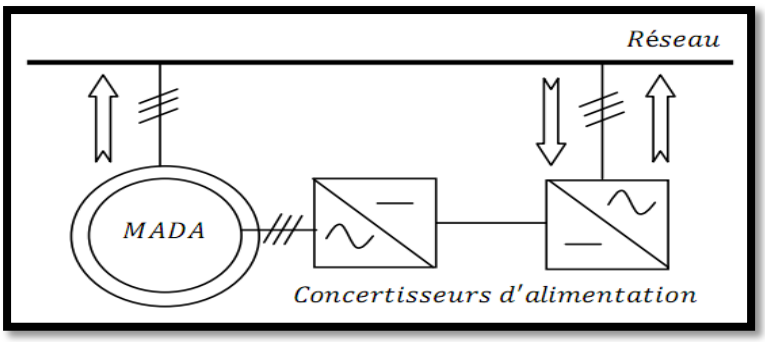


Fig. II.2. : Représentation de la MADA et son système d'alimentation au rotor.

Pour assurer à l'onduleur une tension continue stable, on crée un bus intermédiaire de tension continue. Celui-ci est géré par un redresseur alimenté à travers un transformateur par le système triphasé du réseau électrique supposé symétrique avec des tensions à amplitude et fréquence imposées et constantes. Après le redressement un étage de filtrage est nécessaire afin de stabiliser la tension. Cette opération de redressement électrique, peut être réalisée par deux types de convertisseurs statiques selon la nature de commutation électronique des interrupteurs (naturelle ou forcée).

II.3.1. convertisseurs à commutation forcée :

C'est un autre type de convertisseur (voir figure II.5) réalisé avec des transistors de puissance (bipolaires, MOSFET ou IGBT) pour des puissances allant jusqu'à une centaine de kW, avec des fréquences de découpage ou de commutation égales ou supérieures à 10kHz. Pour des puissances de quelques centaines de kW ou plus, on utilise couramment des GTO mais à des fréquences de commutation assez basses (500 Hz à 1000 Hz) [13]. Ces convertisseurs sont commandés par modulation de largeur d'impulsions (MLI) et possédant comme objectif principal la bidirectionnalité du passage de la puissance permettant à la machine le fonctionnement en deux régimes hypo-synchrone et hyper-synchrone. Aussi, avec la technique de commande à MLI, on aura une alimentation en mode de découpage, ce qui va nous faciliter l'opération de filtrage et réduire la taille des éléments du filtre associé. Ce convertisseur est constitué de trois branches (ou bras), chacune est composée de deux paires d'interrupteurs supposés parfaits, à commutation instantanée et à chute de tension négligeable aux bornes, avec des commandes complémentaires. Chaque Interrupteur est composé par un transistor et une diode de récupération et modélisé par deux états complémentaires.

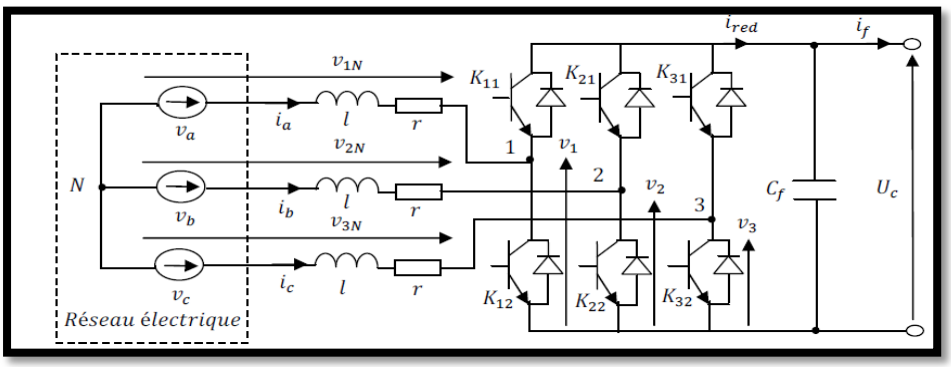


Fig. II.3. : Convertisseur AC-DC triphasé à commutation forcée.

A partir de ce schéma, on peut déduire les relations suivantes :

$$\begin{cases} v_1 - v_{1n} + v_{2n} - v_2 = 0 \\ v_1 - v_{1n} + v_{3n} - v_3 = 0 \end{cases} \quad \text{(II.18)}$$

En additionnant ces équations, on obtient :

$$2v_1 - 2v_{1n} + 2v_n + v_{3n} - v_2 - v_3 = 0 \quad \text{(II.19)}$$

Pour un réseau triphasé équilibré, on peut écrire la relation suivante :

$$v_{1n} + v_{2n} + v_{3n} = 0 \quad \text{(II.20)}$$

Dans la relation (II.20), on peut remplacer $v_{2n} + v_{3n}$ par $-v_{1n}$ et on tire :

$$\begin{cases} v_{1N} = \frac{1}{3}(2v_1 - v_2 - v_3) \\ v_{2N} = \frac{1}{3}(-v_1 + 2v_2 - v_3) \\ v_{3N} = \frac{1}{3}(-v_1 - v_2 + 2v_3) \end{cases} \quad \text{(II.21)}$$

Selon la fermeture ou l'ouverture des interrupteurs K_{ij} les tensions de branche peuvent être égales à U_c ou à 0. On introduit d'autres variables S_{11} , S_{21}et S_{31}qui prennent 1 si l'interrupteur K_{i1}est fermé ou 0 s'il est bloqué. L'équation (II.21) peut être réécrite comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_{1N} \\ v_{2N} \\ v_{3N} \end{bmatrix} = \frac{U_c}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{11} \\ S_{21} \\ S_{31} \end{bmatrix} \quad \text{(II.22)}$$

Le courant redressé peut s'écrire :

$$i_{red} = S_{11} i_{ar} + S_{21} i_{br} + S_{31} i_{cr} \quad \text{(II.23)}$$

Ces variables de commande f_{i1} présentent des signaux logiques déduits de l'application de la technique de commande à MLI. Celle-ci permet de déterminer les intervalles de conduction des interrupteurs et de régler d'une manière indépendante les valeurs moyennes de chacune des tensions sur chaque période de commutation. Dans ce cas, les instants de commutation sont déterminés par une comparaison à hystérésis entre les courants de sortie i_{abcr} et les courants de référence. $i_{abcrref}$

Les états des interrupteurs dans ce cas sont déduits selon les règles suivantes :

Si $i_{aref} - i_a \geq \Delta i$ alors $S_{11} = 0$ et si $i_{aref} - i_a \leq -\Delta i$ $S_{11} = 1$

Si $i_{bref} - i_b \geq \Delta i$ alors $S_{21} = 0$ et si $i_{bref} - i_b \leq -\Delta i$ $S_{21} = 1$

Si $i_{cref} - i_c \geq \Delta i$ alors $S_{31} = 0$ et si $i_{cref} - i_c \leq -\Delta i$ $S_{31} = 1$

Les courants absorbés du réseau i_{abc} sont déduits à partir des équations suivantes :

$$\begin{cases} l\frac{d_{ia}}{dt} = v_a - v_{1N} - ria = v_a - U_c\frac{2S_{11} - S_{21} - S_{31}}{3} - ria \\ l\frac{d_{ib}}{dt} = v_b - v_{2N} - rib = v_b - U_c\frac{-S_{11} + 2S_{21} - S_{31}}{3} - rib \\ l\frac{d_{ic}}{dt} = v_c - v_{3N} - ric = v_c - U_c\frac{-S_{11} - S_{21} + 2S_{31}}{3} - ric \end{cases} \quad \text{(II.24)}$$

Tandis que la tension aux bornes du condensateur est calculée par la relation :

$$C_f \frac{dU_c}{dt} = S_{11} i_a + S_{21} i_b + S_{31} i_c - i_f \quad \text{(II.25)}$$

II.3.2. commande vectorielle du convertisseur à commutation forcée :

Pour la commande de ce convertisseur, on fait un asservissement de la tension de sortie U_c et des courants d'entrée i_{abc} . Ces courants sont reportés au système de référence lié à la tension du réseau. Ce système de référence qui correspond aux axes(d, q), permetde découpler les expressions de la puissance active et la puissance réactive échangées entre le réseau et le rotor. On va contrôler la puissance active et par conséquent la tension dans l'étage continu par l'intermédiaire du courant i_d et la puissance réactive par l'intermédiaire de. i_q.

On a commandé ce convertisseur en choisissant convenablement les deux courants de référence pour l'axe q et l'axe d comme suit :

- Pour un fonctionnement à facteur de puissance unitaire caractérisé par une puissance réactive nulle et des distorsions harmoniques des courants très faibles, la référence de la composante du courant sur l'axe qest choisie égale à zéro ;
- La composante du courant sur l'axe d dépend de la différence entre la tension de référence et celle réelle de l'étage continu à la sortie du redresseur, et l'appel de puissance par la machine. Un régulateur de type PI ayant pour entrer l'erreur de tension de l'étage continu par rapport à sa référence peut répondre à cette exigence.

On a opté pour ce convertisseur à MLI qui forme avec le convertisseur coté rotor une alimentation électrique en double pont à MLI permettant la bidirectionnalité de L'écoulement de puissance et la réduction de la pollution harmonique.

II.3.3. Modélisation du convertisseur a MLI du cote du rotor :

Un onduleur autonome (à commande adjacente ou à MLI) est un convertisseur statique qui assure la transformation de l'énergie d'une source continue en une énergie alternative, à fréquence fixe ou variable. Il est constitué dans le domaine des puissances élevées par des transistors ou des thyristors GTO ; surtout dans le domaine des entrainements électriques à vitesse variable. Pour les puissances moins élevées, on utilise les transistors à commutation rapide [14], [15].

Cet onduleur à commutations commandées est constitué de trois branches disposées de la même manière que dans le redresseur commandé (voir figure II.4) :

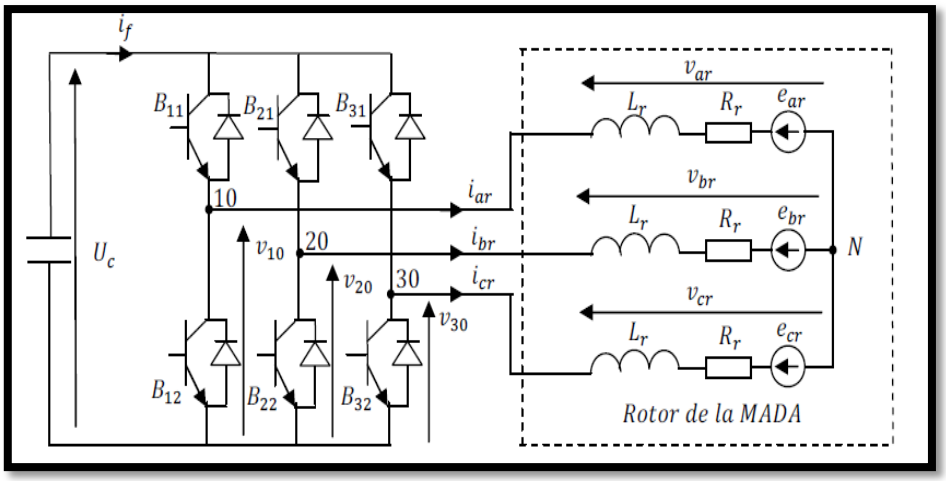


Fig. II.4. : Schéma de principe de l'onduleur triphasé.

De la même manière que pour le redresseur à commutation forcée, on introduit d'autres variables caractérisant l'état des interrupteurs qui prennent 1 si l'interrupteur est fermé ou 0 s'il est bloqué, et on déduit l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} = \frac{U_c}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \end{bmatrix} \quad \text{(II.26)}$$

Le courant filtré peut s'écrire :

$$i_f = f_{11} i_{ar} + f_{21} i_{br} + f_{31} i_{cr} \quad \text{(II.27)}$$

Ces variables de commande f_{i1} présentent aussi des signaux logiques déduits de l'application de la technique de commande à MLI. Dans ce cas, les instants de commutation sont déterminés comme pour le redresseur commandé en courant par une comparaison à hystérésis entre les courants de sortie i_{abcr} et les courants de référence. $i_{abcrref}$

Les états des interrupteurs sont déduits selon les règles suivantes :

Si $i_{arref} - i_{ar} \geq \Delta i$ alors $f_{11} = 1$ et si $i_{arref} - i_{ar} \leq -\Delta i$ $f_{11} = 0$;

Si $i_{brref} - i_{br} \geq \Delta i$ alors $f_{21} = 1$ et si $i_{brref} - i_{br} \leq -\Delta i$ $f_{21} = 0$;

Si $i_{crref} - i_{cr} \geq \Delta i$ alors $f_{31} = 1$ et si $i_{crref} - i_{cr} \leq -\Delta i$ $f_{31} = 0$.

II.4. Stratégie de commande de la turbine :

D'après ce que nous avons vu dans le premier chapitre (voir Figure 1.4), on distingue quatre zones de fonctionnement des turbines à vitesse variable comme l'indique la Figure (II.5) concernant une éolienne de 1.5 MW.

La première zone concerne la période de démarrage, la deuxième est la zone d'extraction de la puissance maximale "«MPPT»", la troisième zone est destinée à la limitation de la vitesse autour de la vitesse nominale et la quatrième a la limitation de la puissance.

Puisque nous sommes intéresses a la deuxième zone de fonctionnement, on va chercher l'extraction de la puissance maximale en temps réel par optimisation de la conversion énergétique. L'angle de calage des pales β étant fixe, on ajuste rotoriquement le couple électromagnétique de la génératrice afin de régler la vitesse de rotation et de rapprocher la vitesse spécifique de l'éolienne λ a sa valeur optimale et le coefficient de puissance a sa valeur maximale.

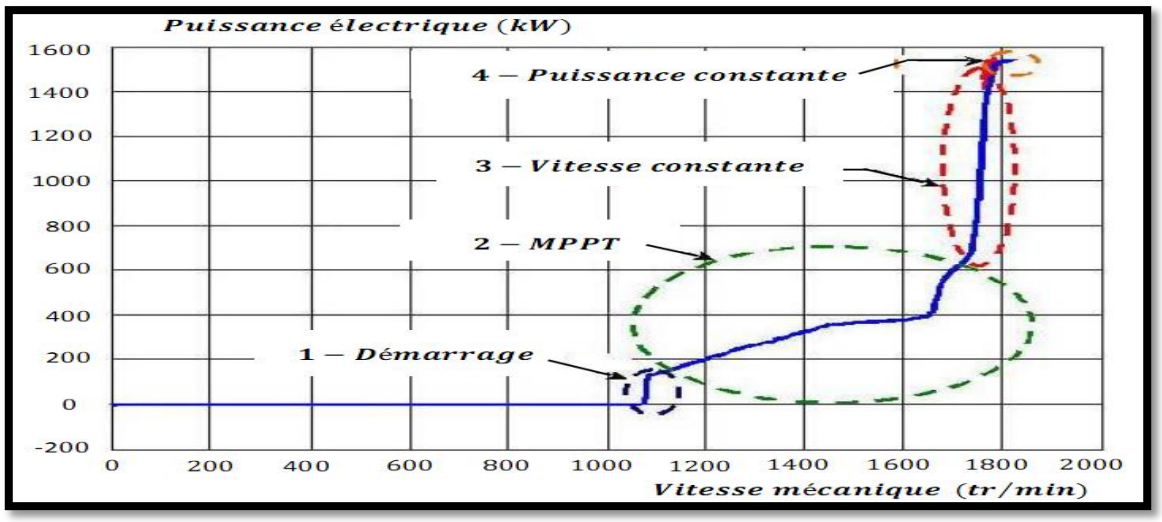


Fig. II.5. : La puissance électrique en fonction de la vitesse d'une éolienne de 1.5mw [7].

II.4.1 commande rotorique de l'éolienne :

Le modèle complet de cette chaine de conversion éolienne repose sur l'assemblage des différents modèles étudies concernant les éléments constituants : la turbine, le multiplicateur, la génératrice et l'alimentation. C'est pour ça que nous ne détaillons pas ici le modèle complet et on va présenter la chaine de conversion éolienne commandée rotoriquement par le schéma simple suivant [16].

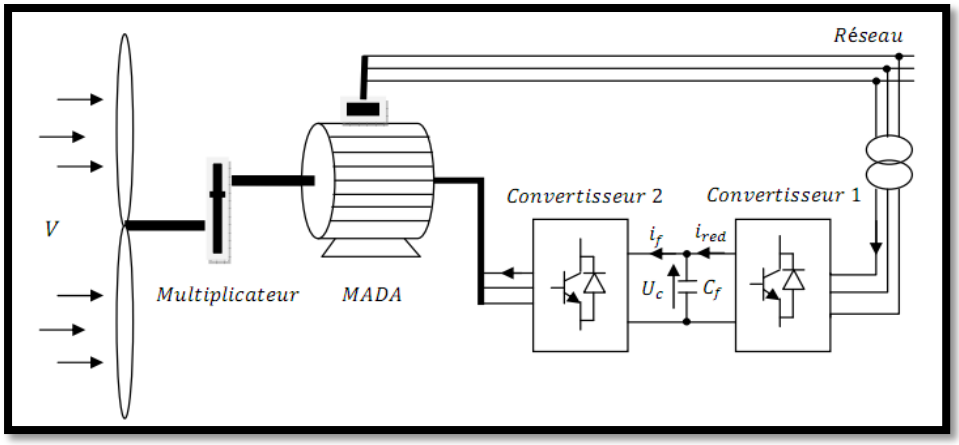


Fig. II.6. : Architecture de la chaine de conversion éolienne commandée par le rotor.

II.4.2. Contrôle de la vitesse :

Dans cette partie on cherche à maintenir la vitesse spécifique à son optimum notée une boucle de vitesse est alors mise en œuvre et sa vitesse de référence ω réf et déduite la relation :

$$\Omega_{eref} = \Omega_{tref} G \tag{II.28}$$

Avec :

$$\Omega_{tref} = \frac{\lambda_{opt} V}{R} \tag{II.29}$$

Cette boucle est munie d'un régulateur de vitesse afin de l'asservir à chaque fois à sa valeur de référence et d'atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entrée perturbatrice. Plusieurs correcteurs de vitesse peuvent être envisages dans ce but, mais nous nous sommes intéresses ici par un correcteur proportionnel intégral pi comme il est présente dans la Figure (II.7).

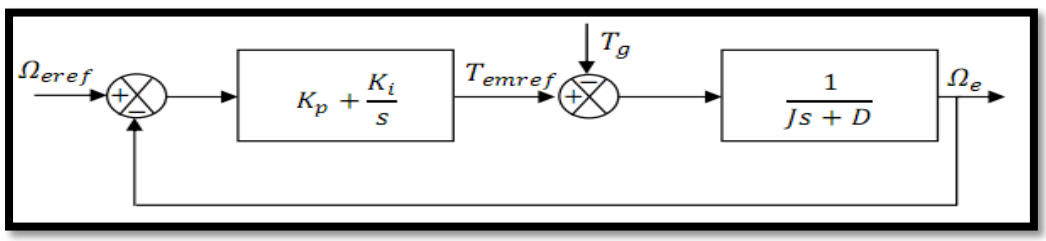


Fig. II.7. : Schéma block simplifie de la boucle de vitesse munie d'un correcteur PI.

Sachant que sous l'effet intégral du régulateur pi, la perturbation due à la variation du couple éolien est compensable en régime permanent, nous pouvons donc déduire une relation

de la fonction de transfert en boucle ouverte comme suit :

$$T(S) = \frac{K_p S + K_i}{JS^2 + DS} \tag{II.30}$$

D'où, en boucle fermée, la fonction de transfert sera :

$$F(S) = \frac{T(S)}{1 + T(S)} = \frac{K_p S + K_i}{JS^2 + (D + K_p)s + K_i} \tag{II.31}$$

Afin d'avoir un comportement d'un système du premier ordre dont la fonction de transfert est sous la forme :

$$G_s = \frac{1}{\tau s + 1} \tag{II.32}$$

Il suffit d'identifier (II.30) à (II.31) comme suite :

$$\frac{K_p S + K_i}{JS^2 + (D + K_p)s + K_i} = \frac{1}{\tau s + 1} \tag{II.33}$$

Ce qui donne :

$$K_p \tau s^2 (K_i \tau + K_p)s + K_i = JS^2 + (D + K_p)s + K_i \tag{II.34}$$

D'où :

$$\begin{cases} K_p = \frac{J}{\tau} \\ K_i = \frac{D}{\tau} \end{cases} \tag{II.35}$$

II.4.3. Optimisation électronique de la conversion énergétique :

En partant de la boucle de la vitesse présentée dans la Figure (II.7), on note que la machine double alimentée n'agira dans le système que sous forme d'un couple d'inertie et d'un couple de frottement et ne présente pas une dynamique propre. Or, la MADA comme toutes les machines électriques a besoin d'un temps de réponse suffisant pour que son système de commande électronique peut la ramener à la vitesse demandée par l'éolienne. Pour cette raison, on doit présenter la boucle de commande avec une manière différente pour montrer la boucle de commande à travers l'alimentation (Figure II.8).

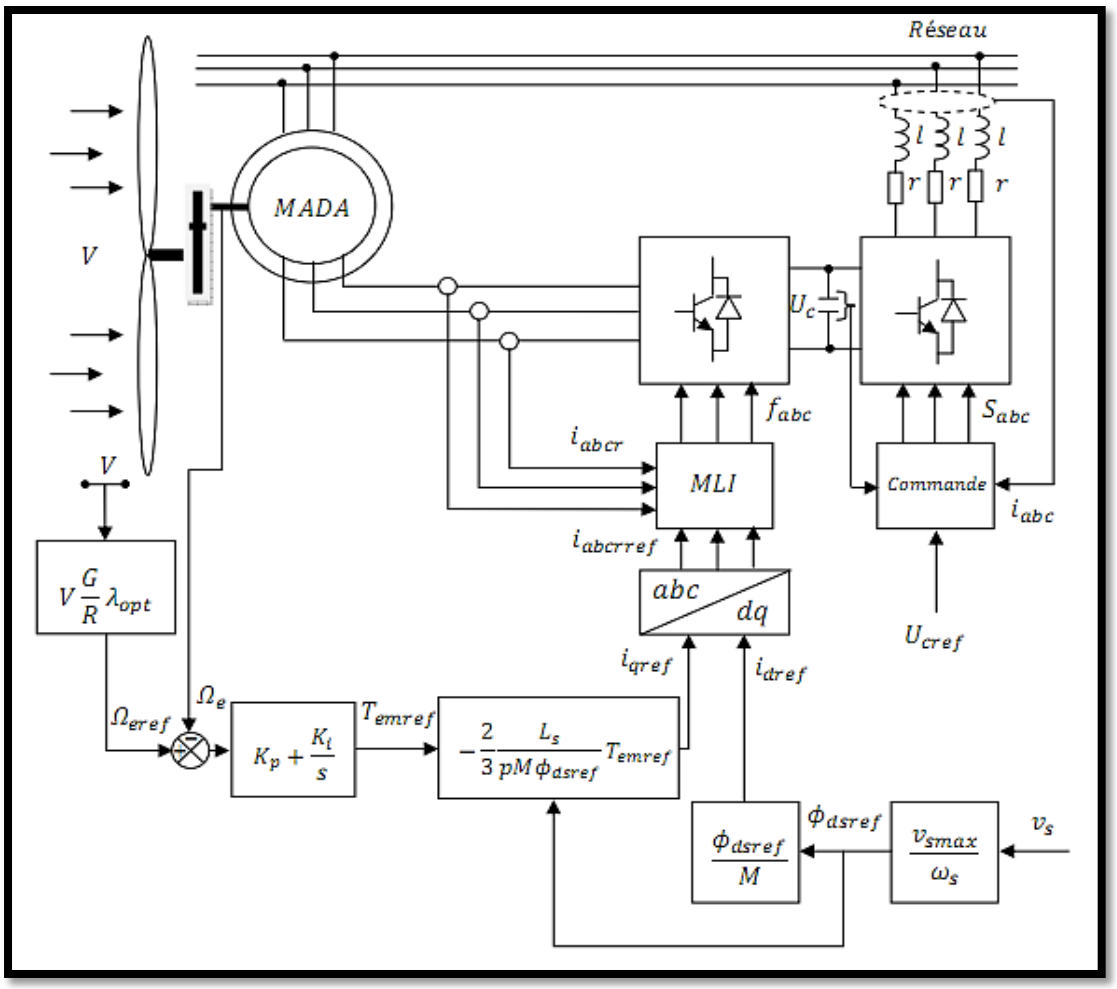
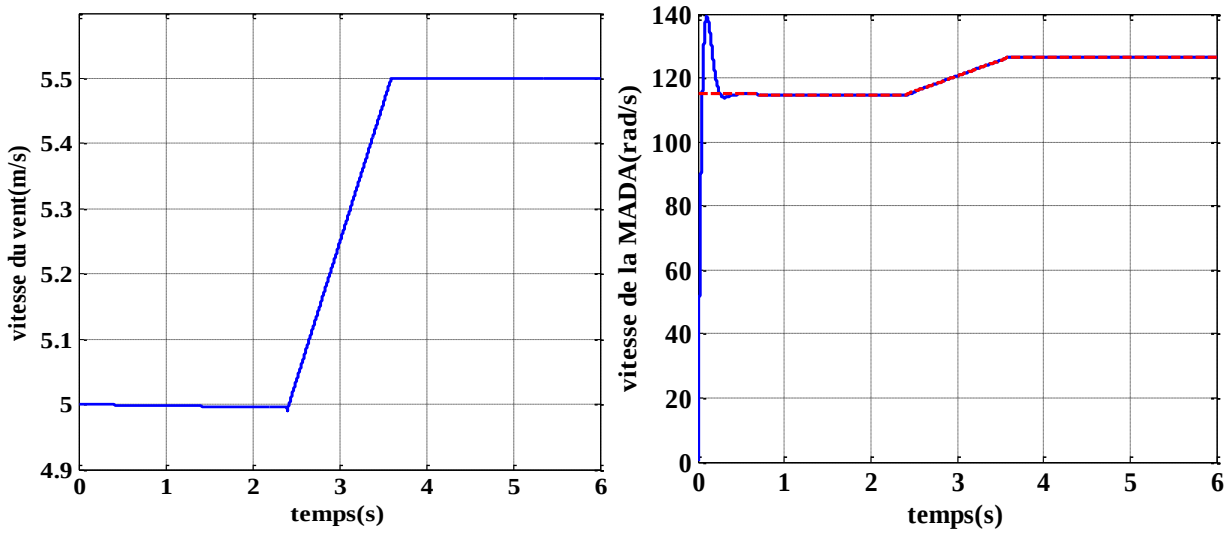
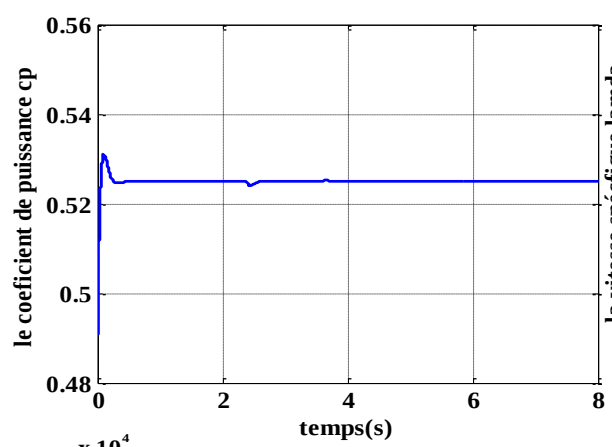
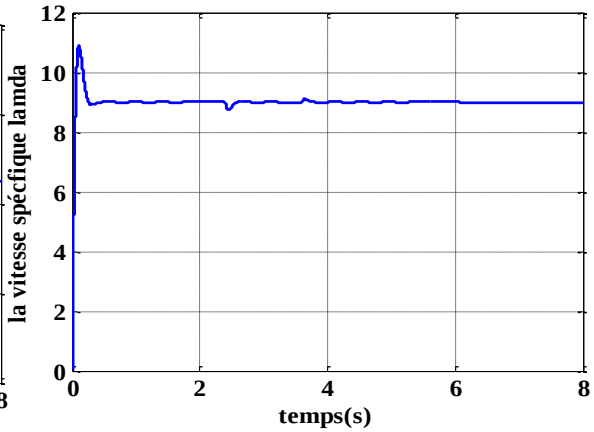


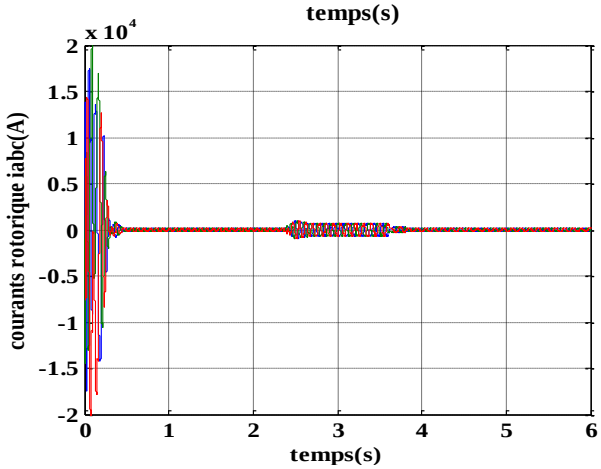
Fig. II.8. : Représentation schématique de la commande par le rotor de la MADA d'un système éolien.

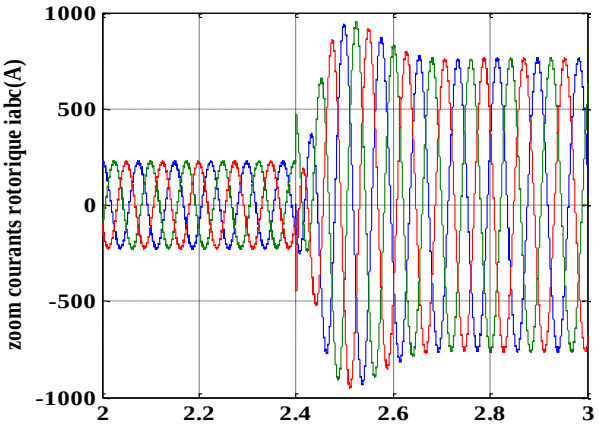
II.5. résultats de la simulation :

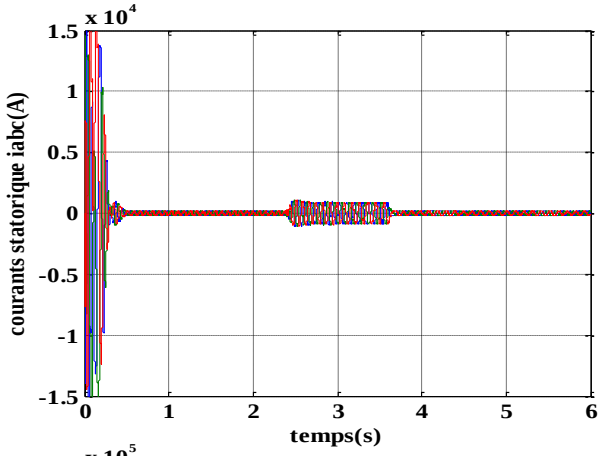


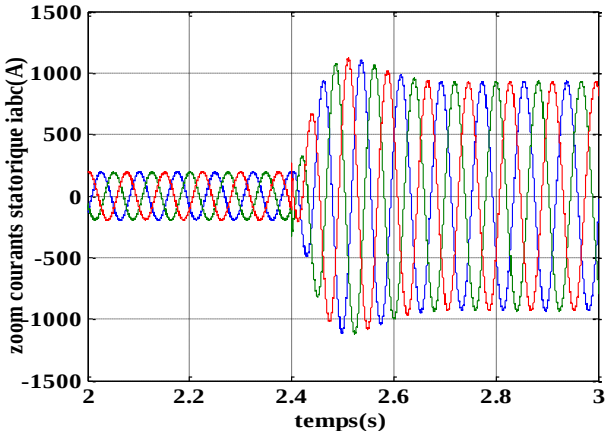

le coeficient de puissance cp
temps(s)

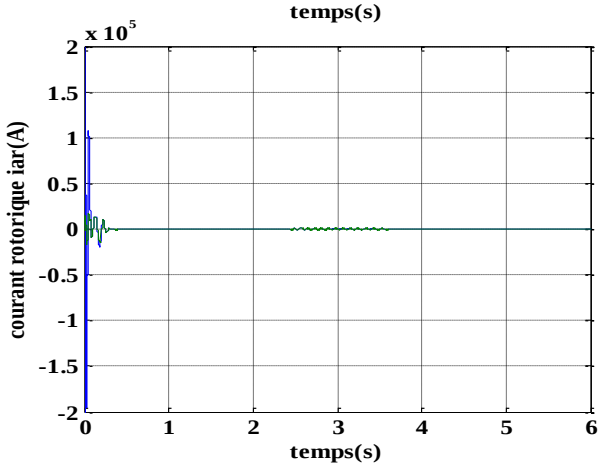

la vitesse spécfique lamda
temps(s)

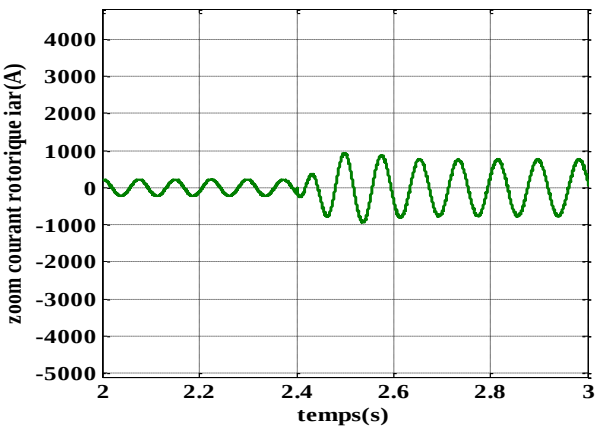

x 10^4
courants rotorique iabc(A)
temps(s)


zoom courants rotorique iabc(A)


x 10^4
courants statorique iabc(A)
temps(s)


zoom courants statorique iabc(A)
temps(s)


x 10^5
courant rotorique iar(A)
temps(s)


zoom courant rotorique iar(A)
temps(s)

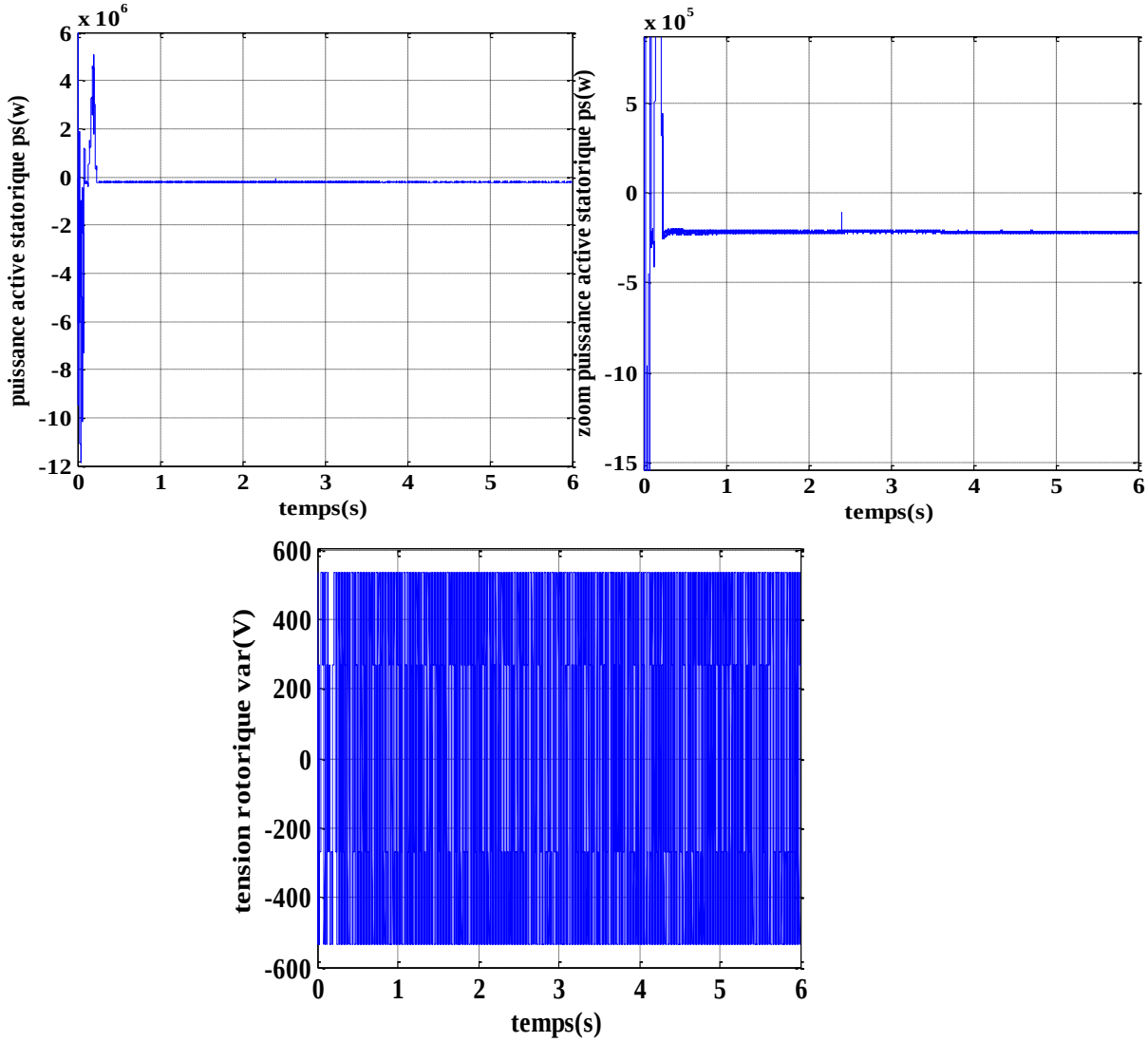


Fig. II.9. : Résultats de la commande vectorielle de la MADA.

II.6. Interprétation des résultats :

Les résultats de la simulation du figure (II.9) présentera commande vectorielle de la MADA, on peut constater les remarques suivantes :

- On remarque que la vitesse de la MADA c'est l'image de la vitesse du vent.
- Lorsque la vitesse de vent augmente ce qui implique une augmentation des puissances active statorique, même les courants (Iabcs, Iabcr, Iar) augmentant.
- Les courants (Iabcs, Iabcr) possède une forme sinusoïdale avec un décalage de (120^0).

II.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, on à présente la commande vectorielle de la machine asynchrone double alimentée pilotée par le rotor à l'aide de deux convertisseurs électroniques a commandé MLI. L'un de ces deux convertisseurs joue le rôle d'un redresseur à transistors à commutation forcée et l'autre convertisseur est un onduleur. Cette combinaison électrique nous a permis d'exécuter la stratégie de commande conçue à ce système éolien étudie qui était l'extraction du maximum de puissance appelée "MPPT" à l'aide d'un asservissement de vitesse réglée par un correcteur PI a gains ajustes par tâtonnement.

Chapitre III : contrôle direct et indirect des puissances du générateur.

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 .

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.

III.2. Modèle Simple :

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives en et établissant les équations quillent les valeurs des tensions rotoriques, générées par un onduleur, aux puissances actives et réactives statoriques [9], [23], [24], [25],[26], [27], [28]. Nous utilisons la modélisation diphasée de la machine. On oriente le repère (d, q) afin que l'axe d soit aligné sur le flux statoriqueφs.

$$\varphi_s = 0 \text{ Et } \varphi_{qs}=0 \qquad \text{(III.1)}$$

Le couple électromagnétique de l'équation III.7s'écrit alors:

$$T_{em} = p\frac{M}{L_s} I_{qr}\varphi_{ds} \qquad \text{(III.2)}$$

Et l'équation des flux III.8devient:

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \qquad \text{(III.3)}$$

Si l'on suppose le réseau électrique stable, ayant pour tension simple Vs, cela conduit à un Flux statorique φs constant.Cette considération associée à l'équation (III.2) montre que le couple électromagnétique T_{em} est directement proportionnel au courant rotorique en quadratureI_{qr}.

De plus, si l'on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse réaliste pour les machines de forte puissance utilisées pour la production éolienne, les équations des tensions statoriques de la machine se réduisent à:

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d\varphi_s}{dt} \\ V_{qs} = \omega_s \varphi_s \end{cases} \quad \text{(III.4)}$$

Avec : ω_s la pulsation électrique des grandeurs statoriques. Et l'hypothèse du flux statorique constant, on obtient:

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s \end{cases} \quad \text{(III.5)}$$

A l'aide de l'équation (III.3), on peut établir le lien entre les courants statoriques et rotoriques:

$$\begin{cases} I_{ds} = -\frac{M}{L} I_{dr} + \frac{\varphi_s}{L_s} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L} I_{qr} \end{cases} \quad \text{(III.6)}$$

Les puissances actives et réactives statoriques s'écrivent:

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

Ou bien encore, d'après l'équation III.12par:

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

Pour obtenir l'expression des puissances en fonction des courants rotoriques, on remplace Dans l'équation précédente les courants par l'équation (III.6):

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

A partir des équations (III.4) et (III.5), nous obtenons, pour le flux statorique, l'expression suivante:

$$\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \tag{III.10}$$

L'expression des puissances (III.4) peut donc se simplifié de la manière suivante :

$$\begin{cases} P = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q = -V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \tag{III.11}$$

Si l'on considère l'inductance magnétisante M constante, on remarque que l'équation (III.11) Fait apparaître que la puissance active P statorique est directement proportionnelle au courant rotorique en quadrature I_{qr}.

De plus, la puissance réactive Q est proportionnelle au courant rotorique directeI_{dr},à une constante près$\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$. Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il nous faut alors établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliqués à la machine. En remplaçant dans l'équation des flux.les courants statoriques par l'expression (III.6) On obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{dr} + \frac{M V_s}{L_s \omega_s} \\ \varphi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{qr} \end{cases} \tag{III.12}$$

En remplaçant l'expression des flux rotoriques de l'équation précédente (III.12) par leurs expressions dans l'équation du flux on obtient:

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{dr}}{dt} - g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{qr}}{dt} + g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \tag{III.13}$$

Où g correspond au glissement de la machine asynchrone.

A partir des équations que nous venons de mettre en place, nous pouvons établir les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques que cela engendre. Il est donc possible maintenant de décrire le schéma bloc de la machine asynchrone à double alimentation qui sera le bloc régulé par la suite.

En examinant les équations (III.11) et (III.13), on peut établir le schéma bloc de la figure (III.1) qui comportée entrées les tensions rotoriques et en sorties les puissances actives et réactives statoriques.

On remarque que les puissances set les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. Déplus, daufait delà faible valeur du glissement g, il sera possibled'établir sans difficulté une commande de vectorielle car les influences découplages resteront faibles et les axesdetq pour rond donc être command dés séparément avec leurs propres régulateurs.

Ainsi, il apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine [10] :

La première méthode consiste à négliger les termes découplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôle 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.

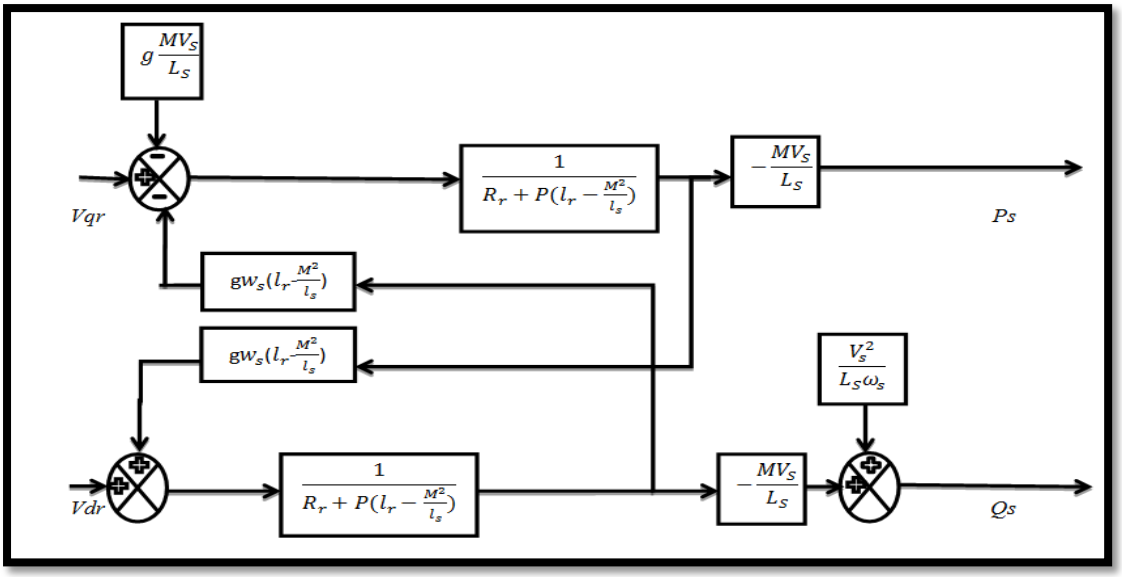


Fig.III.1. : Schéma bloc de la MADA.

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 set les courants rotoriques. Cette méthode appelée méthode indirect découle directement des équations (III.11) et (III.13) Ces deux méthodes vont être étudiées et simulées dans la suite de ce chapitre. L'intérêt que Présente la méthode directe est que sa mise en œuvre

est simple, par contre la méthode indirecte a l'avantage de contrôler les courants rotoriques ce qui permettra de raire une protection de la machine en limitant ces courants ou de rajouter une référence de courant harmonique pour faire fonctionner la MADA en filtre actif, mais elle est plus Complexe à mettre en œuvre.

III.3. Contrôle directe de puissance :

Dans cette section, nous présentons la régulation indépendante des puissances actives et réactives de la machine en utilisant les remarques faites au paragraphe précèdent. Il a été mis en évidence le lien entre, d'une part la puissance active et la tension Vqr et d'autre part lapuissance réactive et la tension Vdr

III.4. Mise en place de la régulation :

Considérons le schéma bloc du système à réguler de la figure (III.1) afin de déterminer les éléments à mettre en place dans la boucle de régulation. Si l'on regarde la relation qui lie les courants rotoriques aux puissances statoriques, on voit apparaître le terme $\frac{MV_s}{L_s}$.

Dans notre étude, nous avons considéré que l'éolienne était raccordée à un réseau de forte puissance et stable, donc ce terme est constant. Nous ne placerons donc pas de régulateur entre les courants rotoriques et les puissances. Pour réguler la machine, nous allons mettre en place une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant tout en compensant les termes de perturbation qui sont présents dans le schéma bloc de la figure (III.1). [29], [30], [9]. Nous négligerons les termes de couplage entre les deux axes de contrôle du fait de la faible valeur du glissement. Nous obtenons alors une commande vectorielle avec un seul régulateur par axe, présentée sur la (Fig.III.2)

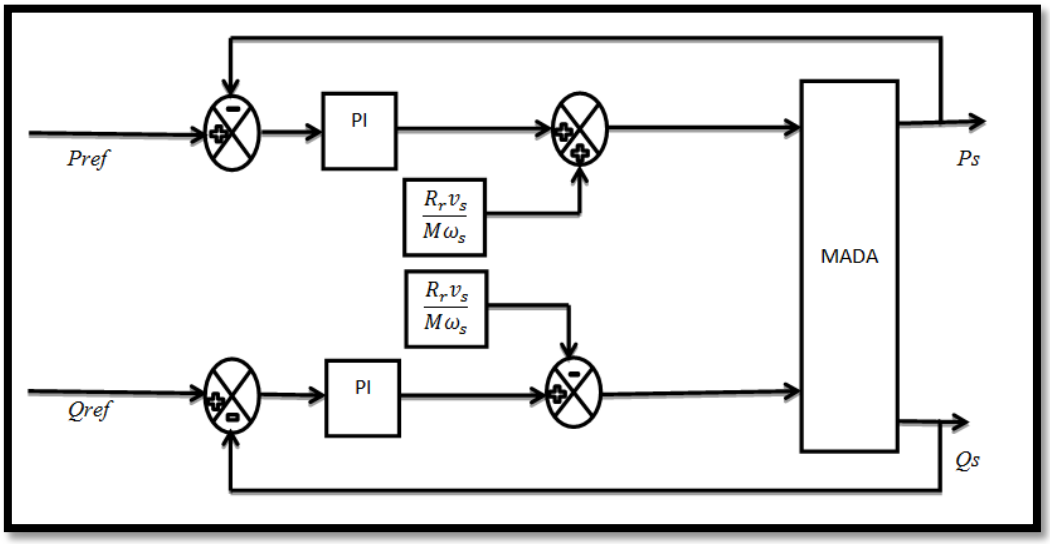


Fig.III.2. : Schéma bloc de la commande directe.

III.5. Synthèse du régulateur PI :

Le régulateur proportionnel intégral (PI) utilisé pour commander la MADA en génératrice est simple et rapide à mettre tout en offrant des performances acceptables [9] c`est pour cela qui il a retenu notre attention pour une étude globale du système de génération éolien.

La figure (III.3) montre une partie de notre système bouclé et corrigé par un régulateur PI ont la fonction de transfert est de la forme $K_p + \frac{K_i}{P}$ correspondant aux deux régulateurs utilisés dans la figure (III.2).

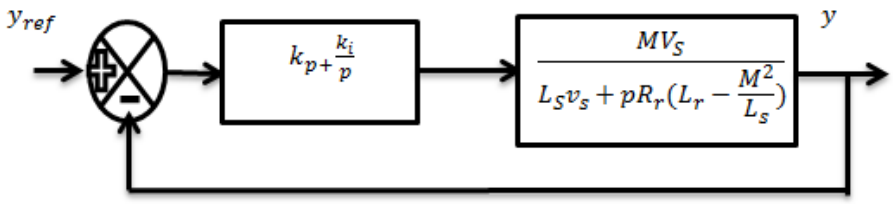


Fig.III.3. : Système Régule par un PI.

La fonction de Transfert en boucle ouverte (FTBO) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante:

$$FTBO = \frac{p+\frac{K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}} * \frac{\frac{MV_S}{L_S(L_r-\frac{M^2}{L_s})}}{p+\frac{L_S R_r}{L_S(L_r-\frac{M^2}{L_s})}} \qquad \text{(III.14)}$$

Nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert. Ceci nous conduit à l'égalité suivante:

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s R_r}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})} \qquad \text{(III.15)}$$

Notons toute fois ici que la compensation des pôles n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs dépendent directement de ces paramètres. Si tel n'est pas le cas, la compensation est moins performante.

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

$$FTBO = \frac{K_p \frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p} \qquad \text{(III.16)}$$

cc qui nous donne en boucle fermée :

$$FTBO = \frac{1}{1+\tau_r p} \qquad \text{Avec} \quad \tau_r = \frac{1}{K_p} \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_s} \qquad \text{(III.17)}$$

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

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

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

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_s} \quad K_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s R_r}{MV_s} \qquad \text{(III.18)}$$

Nous avons utilisé ici la méthode de compensation des pôles pour sa rapidité ; il est évident qu'elle n'est pas la seule méthode valable pour la synthèse du régulateur PI. Cette même méthode de synthèse de correcteurs sera applique pour détermine les gains des correcteurs des autres types de commandes étudiées à la section (III.2).

III.6. Simulation et interprétation des résultats :

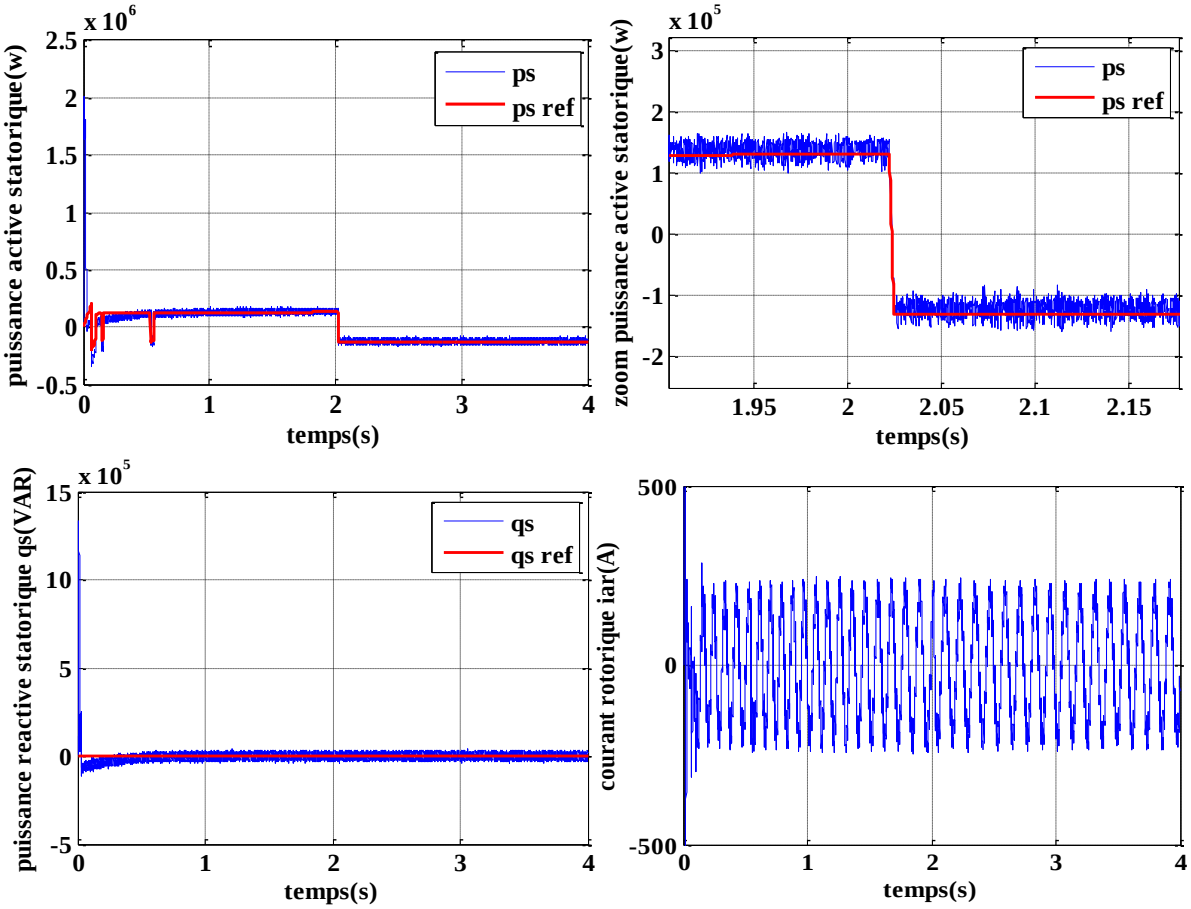


Fig. III.4. : Résultats de la simulation directe de puissance par PI.

On peut remarquer que les échelons de puissance sont bien suivis par la génératrice aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive. Cependant on observe l'arrêt du couplage entre les deux axes de commande (d et q) car un échelon imposé à l'une des deux puissances (active ou réactive) induit de faibles oscillations sur la seconde.

III.7. Contrôle indirecte de puissance par le régulateur PID :

La méthode indirecte consiste à reproduire, en sens inverse, le schéma bloc du système à réguler [31], [32], [9], [33], [24]. 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. On part donc de la puissance statorique en fonction des courants rotoriques et des expressions des tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques.

III.7.1. Commande sans boucle de puissance :

En gardant les mêmes hypothèses sur la stabilité du réseau, on établit le système de régulation de la figure (III.5) où l'on trouve désormais une boucle de régulation des courants rotoriques dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine.

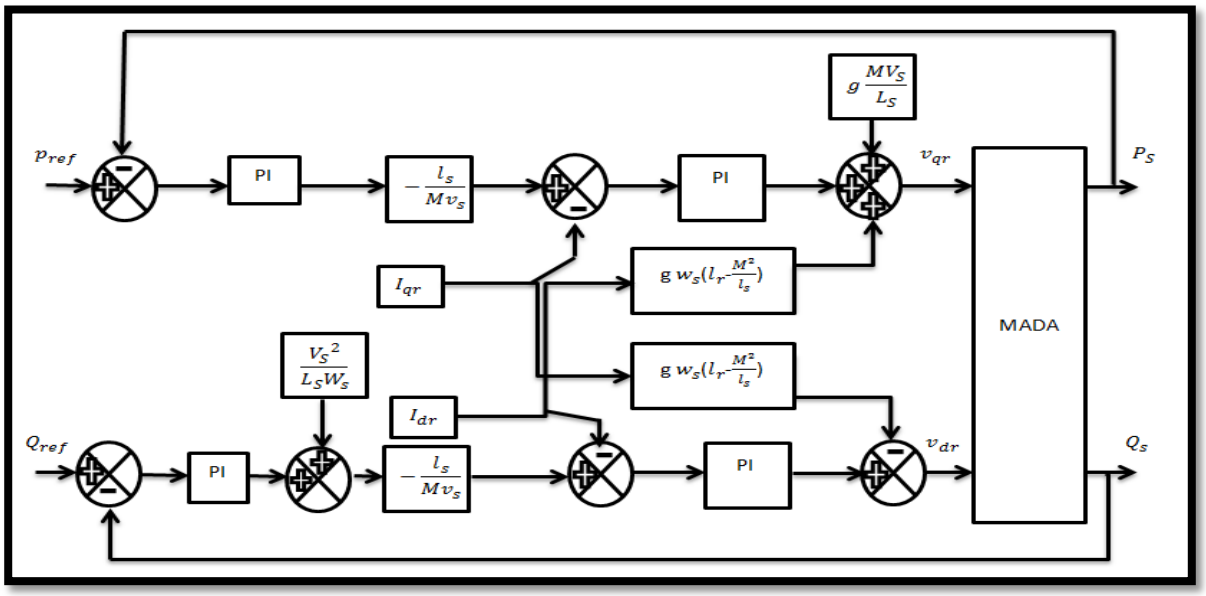


Fig.III.5. : Schéma bloc de la commande indirecte (Ps en haut, Qs en bas).

La simulation de cette régulation sur MATLAB a donné de bons résultats en termes de Dynamique et de réponse aux échelons pour la puissance réactive, comme on peut le voir sur la figure (III.6). On peut cependant observer une erreur de la puissance réactive lorsque la puissance active est faible. Par contre, elle fait apparaître une erreur statique au niveau de la puissance active et réactive qui est due au fait que dans cette régulation on ne trouve qu'une seule boucle sur les courants et que les puissances sont donc restées en boucle ouverte.

Une des hypothèses de notre modèle était que la tension Vs soit constante, mais lorsque la puissance active produite varie, cela entraîne nécessairement une légère variation de tension.

III.7.1.1. résultats de la simulation :

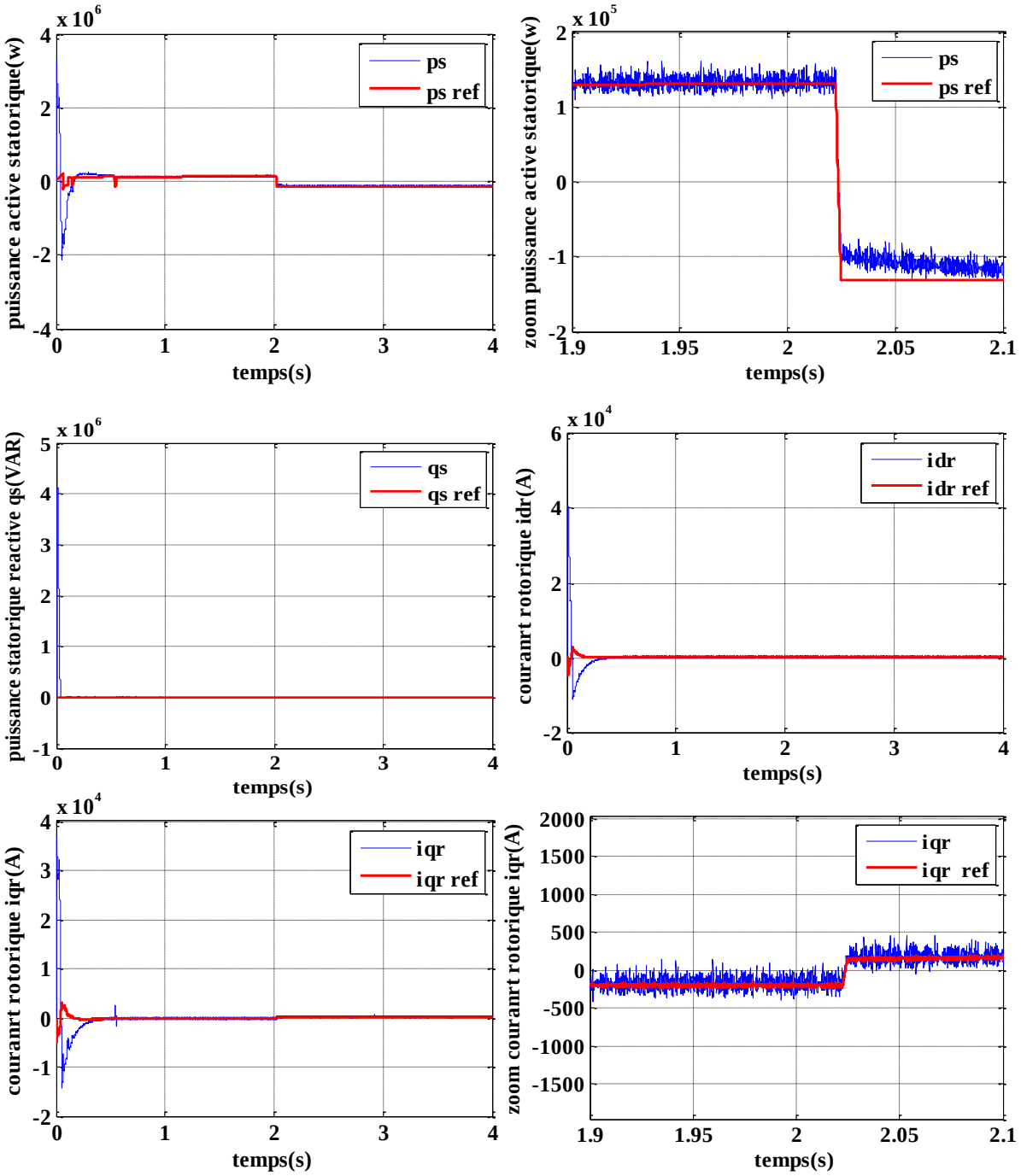


Fig. III.6. : Résultats de la commande indirecte sans boucle de puissance.

III.7.1.2. Interprétation:

On a une erreur statique au niveau de la puissance active qui est due au fait que dans cette régulation on ne trouve qu'une seule boucle sur les courants et que les puissances sont donc restées en boucle ouverte. Une des hypothèses de notre modèle était que la tension Vs soit constante, mais lorsque la puissance active produite varie, cela entraîne nécessairement une légère variation de tension Vs du fait des impédances de liaison entre le réseau et

l'éolienne. Cette petite variation est aussi à l'origine d'écart des puissances. De plus, la résistance statorique, qui a été négligée dans notre modélisation, a une influence sur les puissances, l'erreur est nettement plus importante sur la puissance réactive par rapport la puissance active.

On voit aussi l'effet du couplage entre les axes qui est tout de même moins perceptible que pour la commande directe.

III.7.2. Commande avec boucles de puissance :

Afin d'améliorer la commande précédente, nous allons incorporer une boucle de régulation supplémentaire au niveau des puissances afin d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système. Nous aboutissons au schéma bloc présenté en figure III.13 sur lequel on distingue bien les Deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance.

La simulation est faite avec les paramètres suivants, les mêmes que pour la commande Directe à l'exception des correcteurs:

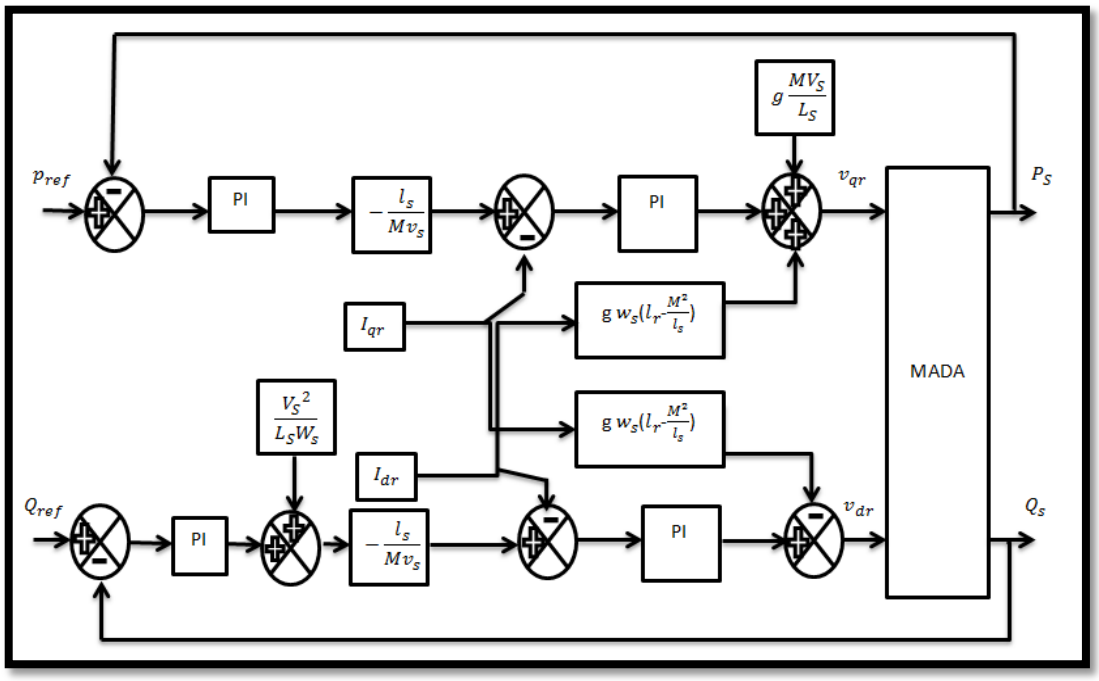


Fig.III.7 Schéma bloc de la commande indirecte avec boucles de puissance.

III.7.2.1. Simulation et interprétation des résultats :

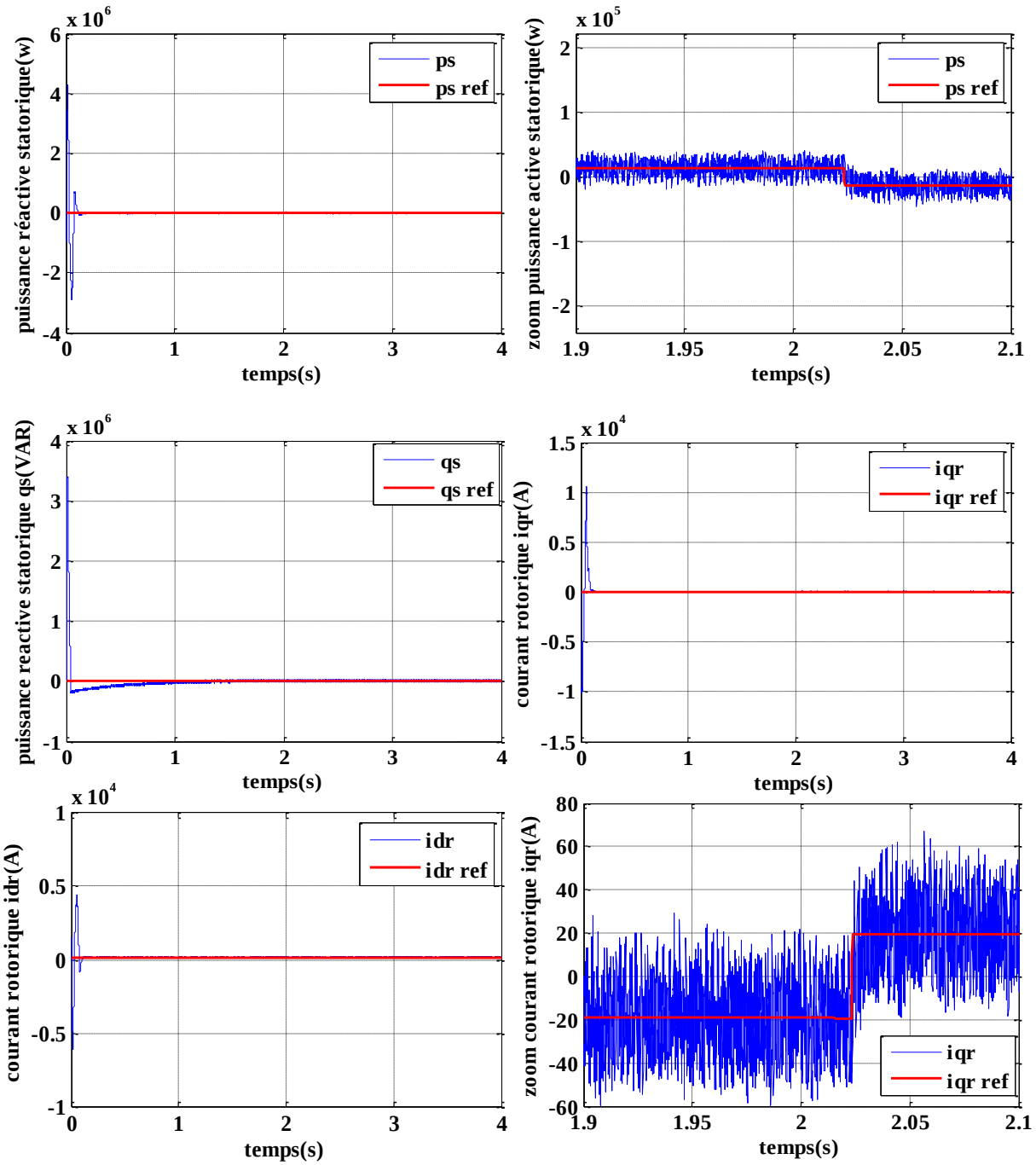


Fig.III.8. : Résultats de simulations pour la commande avec boucle de puissance.

III.7.2.2. Interprétation :

On remarque que notre système présente une dynamique très important et une erreur statique nulle. Que ce soit pour la puissance active ou réactive, on observe une dynamique qui réagit lente 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. Il ne devrait pas poser de problème pour la suite de l'exploitation du modèle machine. Cette

commande est donc plus performante que la commande directe qui présentait plus de perturbations entre les deux puissances. Nous allons donc retenir la commande indirecte avec boucles de puissances pour le reste de notre étude. De plus, elle permet de pouvoir limiter simplement les courants rotoriques de la machine en fixant une limite dans la boucle de courant. Ces puissances seront aussi utilisées pour le contrôle général de l'éolienne afin de déterminer les références de puissance pour l'unité de stockage.

III.8. Conclusion :

Effectivement, nous avons pu voir que la commande directe, la plus simple à mettre en œuvre, présentait des résultats convenables avec une faible complexité de mise en œuvre.

En revanche, la méthode indirecte nous permet, en association avec le bouclage des puissances, d'obtenir un système performant et robuste. Cette commande, certes plus complexe à mettre en œuvre, permettra d'avoir un fonctionnement optimal du système de génération électrique.

La boucle de régulation de courant rotorique permettant ainsi de protéger la machine en intercalant des limitations de courant, ce que la méthode directe ne permettait pas. Effectivement, comme l'on dispose d'une boucle de régulation des courants rotoriques, il est simple de limiter la valeur maximale des courants de référence.

Chapitre IV : Contrôle par logique floue et réseau de neurone du générateur éolien.

IV.1. Contrôle indirecte des puissances par logique floue :

IV.1.1. Introduction :

La logique floue est une branche des mathématiques, basée sur la théorie des probabilités et des concepts flous. A ce titre, toute une série de notions fondamentales a été développée. Ces notions permettent de justifier et de démontrer certains principes de base de la logique floue.

Dans ce chapitre nous présentons les approches de conception d'un régulateur flou (RF). Les notions de base nécessaire à la compréhension de régulation floue seront rappelées. Nous synthétisons le choix possible pour les nombreux paramètres du contrôleur à logique flou (RLF) utilisé pour le réglage des puissances statorique de la machine asynchrone à double alimentation.

IV.1.2. Principe de la logique floue :

La logique floue a été introduite en 1965 par le Professeur L. Zadeh. Elle permet de faire correspondre un degré de vérité (d'appartenance) à une variable qui peut être linguistique. Cette graduation dans l'appartenance d'un élément à une situation permet la modélisation de l'observation humaine exprimée sous forme linguistique, [29-32]. À partir des années 70 cette théorie a été appliquée à la commande des systèmes, [33-34]. Ces travaux permettaient de mettre en œuvre des commandes de façon heuristique. Dans les années 80 la communauté des automaticiens a commencé à bâtir une théorie de mise en œuvre de commande floue où l'étude de la stabilité a été introduite de façon systématique.

IV.1.3. Variables linguistiques :

La description d'une certaine situation imprécise ou incertaine peut contenir des expressions floues comme par exemple: très grand, grand, moyen, petit. Ces expressions forment les valeurs d'une variable x, appelée "linguistique", soumise à des fonctions appelées fonctions d'appartenance, [35-36].

IV.1.4. Fonctions d'appartenance :

La variable x varie dans un domaine appelé univers de discours, ce dernier est partagé en sous-ensembles flous de façon que dans chaque zone il y ait une situation dominante. Ces zones sont décrites par des fonctions convexes, généralement sous forme triangulaire ou trapézoïdale, elles admettent comme argument la position de la variable x dans l'univers de

discours, et comme sortie le degré d'appartenance de x à la situation décrite par la fonction; notée : $u_E(x)$: degré d'appartenance de x au sous ensemble E.

Le choix de la répartition des fonctions, leurs chevauchements ainsi que leurs formes doit être judicieux comme indiqué dans [36].La figure (IV.1) donne quelques fonctions d'appartenance.

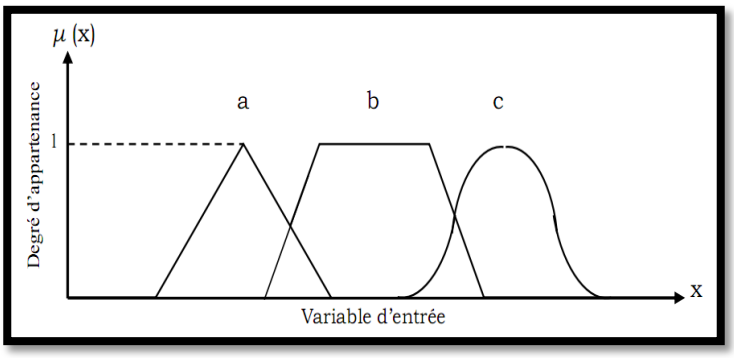


Fig. IV.1. : Exemple de fonctions d'appartenance.

a) Fonction triangulaire.

b) Fonction trapézoïdale.

c) Fonction gaussienne.

IV.1.5. Structure de base d'un contrôleur flou :

Le schéma synoptique général d'un contrôleur flou est représenté dans la figure (IV.2)

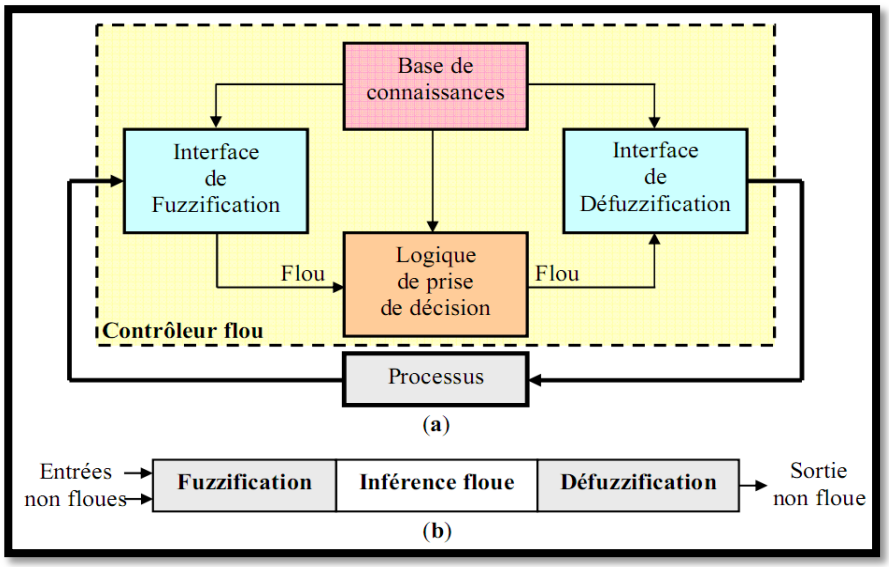


Fig. IV.2. : a) Schéma synoptique d'un contrôleur flou,

b) Configuration d'un Contrôleur flou.

IV.1.5.1. Base de connaissances :

La base de connaissance comprend une connaissance du domaine d'application et les buts du contrôle prévu. Elle est composée :

- D'une base de données fournissant les informations nécessaires pour les fonctions de normalisation, [37].
- La base de règle constitue un ensemble d'expressions linguistiques structurées autour d'une connaissance d'expert, et représentée sous forme de règles: Si < condition > Alors < conséquence >.

IV.1.5.2. Fuzzification :

La Fuzzification est l'opération qui consiste à affecter pour chaque entrée physique, un degré d'appartenance à chaque sous-ensemble flou. En d'autres termes c'est l'opération qui permet le passage du numérique (grandeurs physiques) au symbolique (variables floues).

Pour illustrer le mécanisme de la Fuzzification, nous allons donner un exemple en fixant comme valeur d'entrée e_k = 0.45. Le résultat de la Fuzzification sera présenté sur la figure (IV.3). On remarque que pour cette erreur correspond les ensembles flous PP et PM avec les degrés d'appartenances $u_{pp}(e_k)$= 0.75 et $u_{pM}(e_k)$ = 0.25.

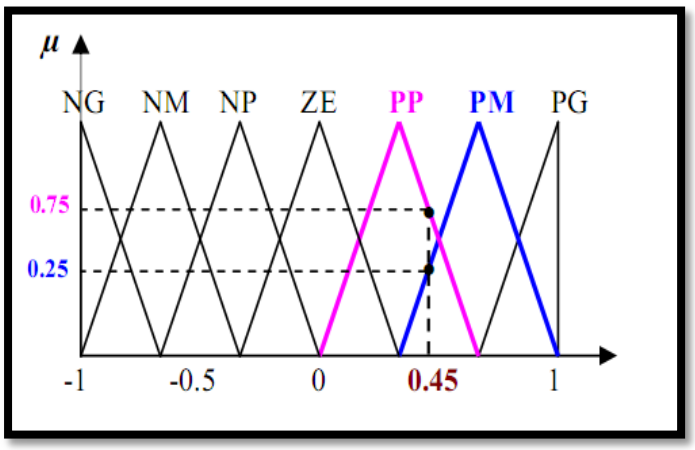


Fig.IV.3. Exemple de Fuzzification.

IV.1.5.3. Règles d'inférence floue :

Les règles d'inférence peuvent être décrites de plusieurs façons, linguistiquement, symboliquement ou bien par matrice d'inférence, dans ce dernier cas, une

matrice dite d'inférence rassemble toutes les règles d'inférence sous forme d'un tableau. Dans le cas d'un tableau à deux dimensions, les entrées du tableau représentent les ensembles flous des variables d'entrées, [38-39]. L'intersection d'une colonne et d'une ligne donne l'ensemble flou de la variable de sortie définie par la règle, le tableau IV.1présente la matrice d'inférence à sept règles. Les trois méthodes d'inférence les plus usuelles sont : Max-Produit, somme-produit et Max-Min (Implication de Mamdani), [40], cette dernière méthode la plus utilisée à cause de sa simplicité, elle réalise l'opérateur "ET «par la fonction "Min", la conclusion "ALORS" de chaque règle par la fonction «Min" et la liaison entre toutes les règles (opérateur "OU") par la fonction Max, [41-42].

Δe \ e	**NG**	**NM**	**NP**	**ZE**	**PP**	**PM**	**PG**
NG	NG	NG	NG	NG	NM	NP	ZE
NM	NG	NG	NG	NM	NP	ZE	PP
NP	NG	NG	NM	NP	ZE	PP	PM
ZE	NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
PP	NM	NP	ZE	PP	PM	PG	PG
PM	NP	ZE	PP	PM	PG	PG	PG
PG	ZE	PP	PM	PG	PG	PG	PG

Tableau. IV.1. Matrice d'inférence.

IV.1.5.4. Défuzzification :

Plusieurs stratégies de Défuzzification existent. Les plus utilisées sont, [43]:

IV.1.5.4.1. Méthode du maximum :

Comme son nom l'indique, la commande en sortie est égale à la commande ayant la fonction d'appartenance maximale.

La méthode du maximum simple, rapide et facile mais elle introduit des ambiguïtés et une discontinuité de la sortie (parfois on trouve deux valeurs maximales).

IV.1.5.4.2. Méthode de la moyenne des maxima :

Elle considère, comme valeur de sortie, la moyenne de toutes les valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance issue de l'inférence est maximale, [44].

IV.1.5.4.3. Méthode du centre de gravité :

Cette méthode est la plus utilisé dans les contrôleurs flous. Elle génère l'abscisse du centre de gravité de l'espace flou comme commande de sortie, l'abscisse de centre de gravité n u Δ peut être déterminé à l'aide de la relation générale suivante :

$$\Delta u_n = \frac{\int x.u(x)dx}{\int u(x)dx} \quad \text{(IV.1)}$$

Nous nous somme intéressé à cette dernière méthode à cause de sa simplicité de calculs et sa sortie unique.

IV.1.6. Développement du contrôleur flou :

IV.1.6.1 Description du contrôleur :

Notre but est de contrôler les puissances statorique d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA). Le contrôleur développé utilise le schéma proposé par Mamdani. Ce schéma est représenté par la figure (IV.4), il est composé:

- Des facteurs de normalisation associent à l'erreur e, à sa variation Δe et à la variation de la commande (Δu);
- D'un bloc de Fuzzification de l'erreur et sa variation;
- Des règles de contrôle flou;
- La stratégie de commande est présentée par une matrice d'inférence du même type que celle présentée dans le tableau (IV.1);
- D'un bloc de Défuzzification utilisé pour convertir la variation de commande floue en valeur numérique;
- D'un intégrateur.

La sortie du régulateur est donnée par :

$$v_{dr}{}^{r}(\mathrm{k}) = v_{dr}{}^{r}(k) + \mathrm{d}\,\mu(k) \quad \text{(IV.2)}$$

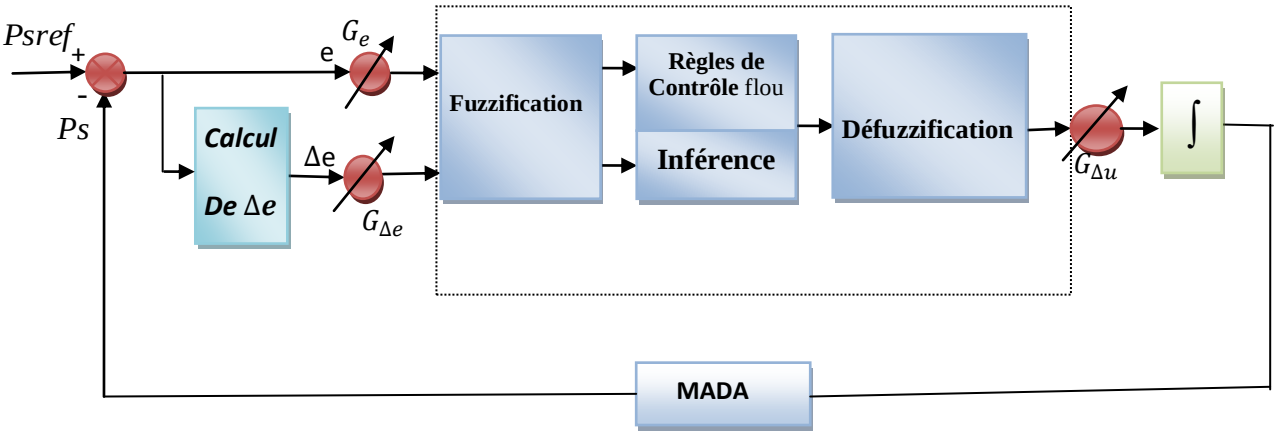


Fig.IV.4. Schéma bloc d'un contrôleur flou.

Le contrôleur flou considéré utilise :

- Les fonctions d'appartenances triangulaires et trapézoïdales, ce choix est dû à la simplicité de mise en œuvre.
- Un univers de discours normalisé.
- L'univers de discours est découpé en sept (réglage fin) pour les variables d'entrées et de sortie; une subdivision très fine de l'univers de discours sur plus de sept ensembles flous n'apporte en général aucune amélioration du comportement dynamique du système à réguler, [34].
- L'implication de Mamdani pour l'inférence.
- La méthode du centre de gravité pour la Défuzzification.

IV.1.6.2. Loi de commande :

Cette loi est fonction de l'erreur et sa variation (μ=f(e,Δu)). Elle est donnée par :

$$u_{k+1}=u_k+G_{\Delta\mu}.\Delta\mu_{k+1} \qquad \text{(IV.3)}$$

Avec :

$G_{\Delta\mu}$ Le gain associé à la commande μ_{k+1}.

$\Delta\mu_{k+1}$: La variation de la commande.

L'erreur e et la variation de l'erreur Δe sont normalisées comme suit :

$$\begin{cases} x_e = G_e.\mathrm{e} \\ x_{\Delta e} = G_{\Delta e}.\Delta_e \end{cases} \quad \text{(IV.4)}$$

Avec :

G_e Et $G_{\Delta e}$ sont les facteurs d'échelle (normalisation). Nous faisons varier ces facteurs jusqu'à ce qu'on puisse avoir un phénomène transitoire de réglage convenable. En effet, ce sont ces derniers qui fixeront les performances de la commande.

IV.1.7. Réglage des puissances statorique de la MADA :

A partir des résultats de la simulation précédente (PI), on peut remarquer la commande indirecte avec boucle de puissance (4 régulateurs PI) qui donne meilleur résultats donc on remplacer ces quatre régulateurs PI par quatre régulateurs floue.

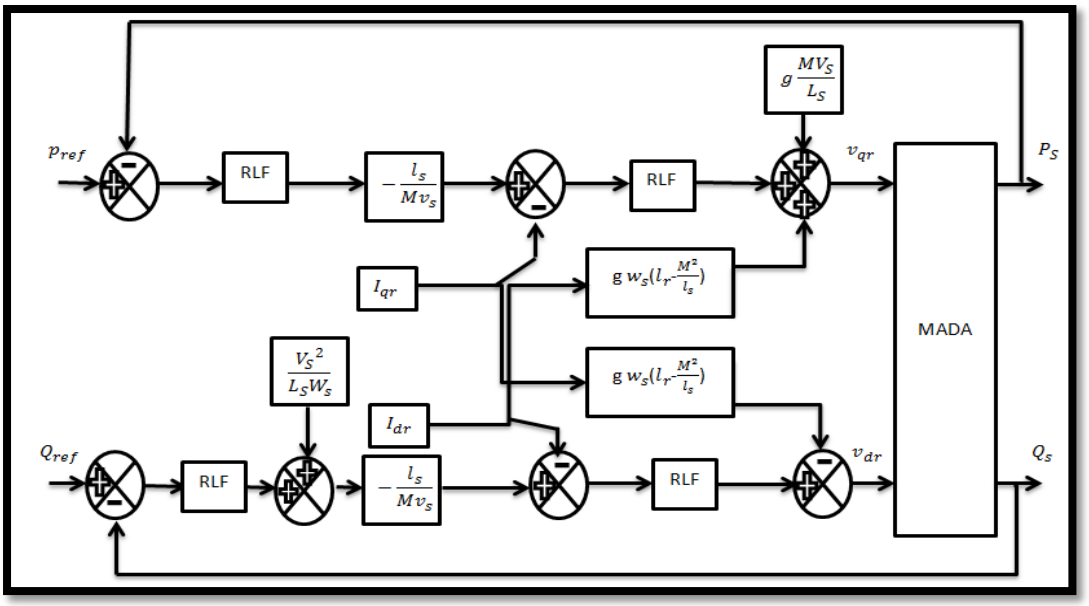


Fig.IV.5. Schéma bloc global de commande de la MADA par logique floue.

Les quatre régulateurs sont de même type (régulateur de type Mamdani à sept classes), et possèdent les mêmes fonctions d'appartenance.

- Remarque : les gains de normalisation sont des mêmes valeurs.

IV.1.7.1. Résultats de simulation :

Les résultats de simulation reportés sur les figures (IV.6).

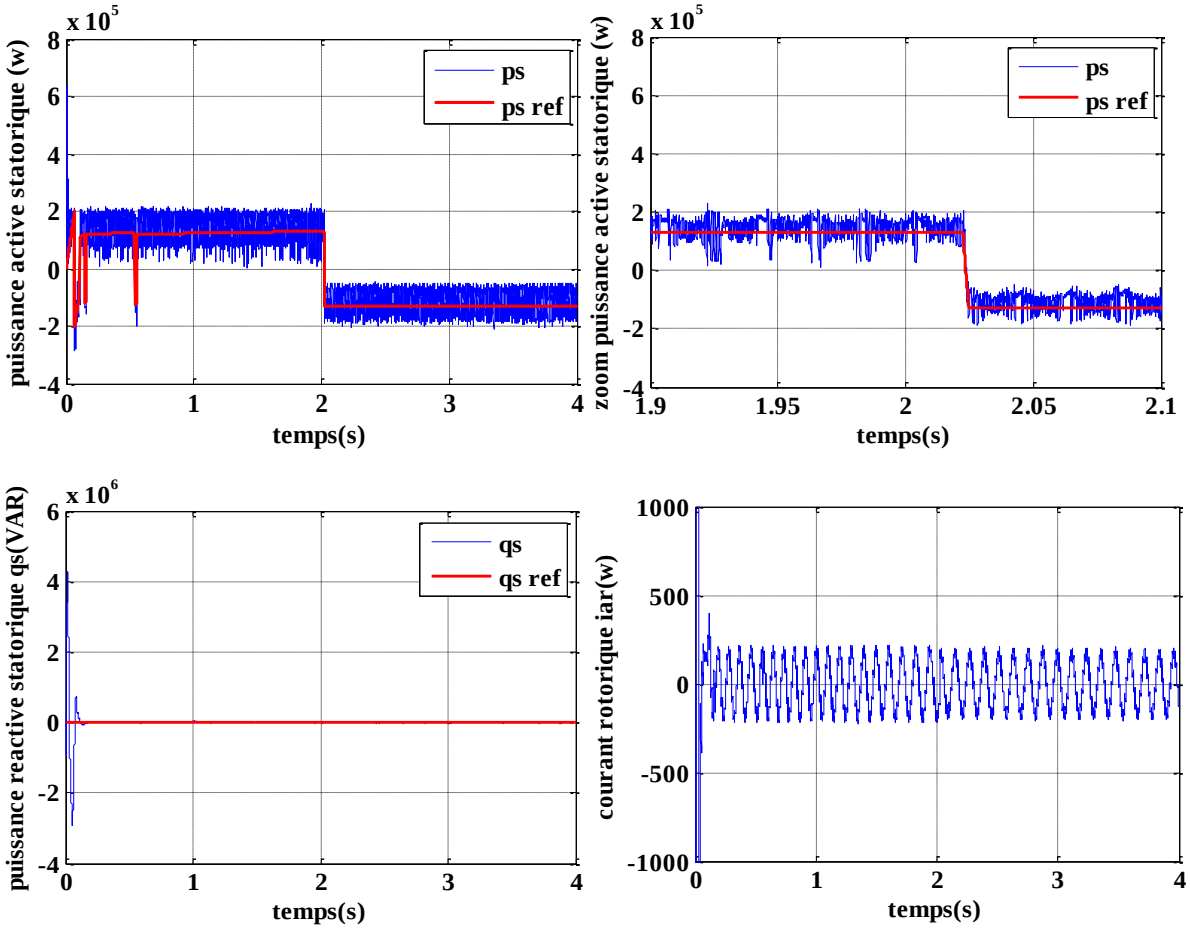


Fig. IV.6. : Résultats de simulation par la logique floue.

IV.1.7.2. Interprétation des résultats :

A partir de la figure (IV.6), on peut constater les remarques suivantes :

- On remarque que les puissances active suivre leurs références, avec la présence d'erreur statique (non nulle), mais le temps de réponse très petit (t=0.55s).
- On a une oscillation très importante.
- On peut remarque que la forme sinusoïdale de courant rotorique de phase (Iar).

IV.2. Contrôle indirecte des puissances par le réseau de neurone :

IV.2.1. Introduction :

Les réseaux de neurones artificiels sont une technique qui permet de faire un apprentissage plutôt numérique que symbolique et qui se fonde plutôt sur l'arithmétique que sur la logique (règles de production). Ils ont été utilisés avant tout pour les tâches de reconnaissance de formes, reconnaissance de parole, optimisation etc., mais leurs capacités d'apprentissage les rendent intéressants dans le domaine de la régulation et de la commande des processus aussi.

Cette partie est consacrée à l'application du contrôle neuronal pour le réglage des puissances statorique de la MADA, après avoir présenté l'approche neuronale, les réseaux de neurones, ainsi que leurs propriétés, on étudie en profondeur, l'algorithme de rétropropagation du gradient avec ses propriétés et ses limites d'utilisation.

IV.2.2. 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 (Fig. IV.7), [45-46]:

- 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.

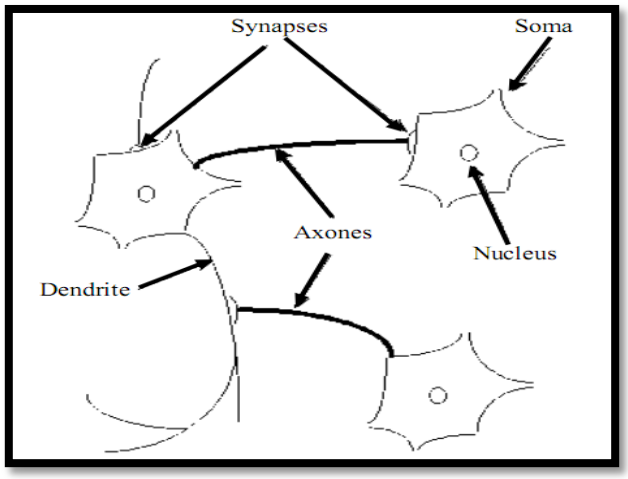


Fig. IV.7. : Schéma d'un réseau de neurones biologiques.

IV.2.3. 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, [47-48].

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 une tangente hyperbolique; cette fonction est dite fonction d'activation du neurone (Fig. IV.8.), [49].

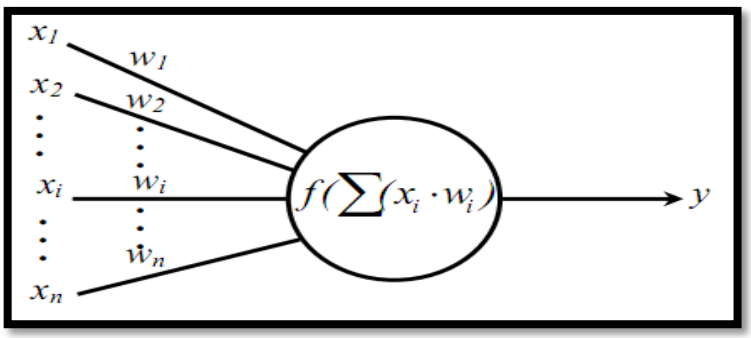


Fig. IV.8. : Schéma d'un neurone formel.

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.2.4 Réseaux de neurones artificiels :

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

IV.4.1. Les réseaux non boucles :

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, [50].

IV.4.2. Les réseaux boucles :

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, [51].

IV.2.5 Bref historique :

- 1943 : Mc Culloch et Pitts présentent le premier neurone formel.
- 1949 : Hebb propose un mécanisme d'apprentissage.
- 1958 : Rosenblatt présente le premier réseau de neurones artificiels : le Perceptron. Il est inspiré du système visuel, et possède deux couches de neurones : perceptive et décisionnelle. Dans la même période, le modèle de l'ADALINE (Adaptive Liner Elément) est présenté par Widrow. Ce sera le modèle de base des réseaux multicouches.
- 1969 : Minsky et Papert publient une critique des perceptrons en montrant leurs limites, ce qui va faire diminuer la recherche sur le sujet.
- 1972 : Kohonen présente ses travaux sur les mémoires associatives.
- 1982 : Hopfield démontre l'intérêt d'utiliser les réseaux récurrents pour la compréhension et la modélisation des fonctions de mémorisation.
- 1986 : Rumelhart popularise l'algorithme de rétropropagation du gradient, conçu par Werbos, qui permet d'entraîner les couches cachées des réseaux multicouches.

Les réseaux neuronaux ont été depuis été beaucoup étudiés, et ont trouvé énormément d'applications, [47].

IV.2.6. 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, [52].

IV.2.6.1. Apprentissage supervise:

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.2.6.2. Apprentissage non supervise:

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.2.6.3. 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, [51]. 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.2.7. Rétropropagation :

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, [48], [53-55].

IV.2.7.1. Principe de la rétropropagation :

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 :

$$O_i^k(t)=f^k\left[s_i^k(t)\right] i=1,\ldots,n_k \quad \text{(IV.5)}$$

$$s_i^k(t) = \left(\sum_{j=0}^{n^{k-1}}\right) w_{ijO_i}{}^{k-1} \quad \text{(IV.6)}$$

n_k : Le nombre de neurone.

O_i^k : La sortie de neurone i.

w_{ij}^k : Le coefficient synaptique de la connexion entre le neurone i de la coche k et le neurone j de la coche 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 :

$$E = \frac{1}{2}\sum_{t=1}^{T} E(t)\,E(t)^t = \frac{1}{2}\sum_{t=1}^{T}\left[y^d(t)-y(t)\right]\left[y^d(t)-y(t)\right]^t \quad \text{(VI.7)}$$

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, [55].

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 :

$$w^k{}_{ij}(\mathbf{n}) = w^k{}_{ij}(\mathbf{n-1}) + \Delta w^k{}_{ij}(\mathbf{n}) \quad \text{(VI.8)}$$

$$\Delta w^k{}_{ij} = -\mu \frac{\delta E}{\delta W^k{}_{ij}} \quad \text{(VI.9)}$$

Le réajustement des biais se fait de 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 pouvant se présenter. 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, [47].

IV.2.7.2. Algorithme d'apprentissage :

Étape 1 : Initialiser les poids $w^k{}_{ij}$ avec de petites valeurs généralement dans l'intervalle [1,1].

Étape 2 : Présenter un exemple et calculer la sortie et l'erreur correspondante en utilisant les équations (IV.5), (IV.6), (IV.7), (IV.8) et (IV.9).

Étape 3 : Calculer les dérivées partielles de l'erreur par rapport à chaque poids.

- ✓ Pour la première technique :
  - ➢ Mettre $\Delta w^k{}_{ij}(\mathbf{n}) = \left[\Delta w^k{}_{ij}(\mathbf{n})\right] p$

- Aller à l'étape 4.

✓ Pour la première technique :

- Si P ≠ T retourner à l'étape 2
- Si no, $$\Delta w_{ij}^{k}(n) = \sum_{t=1}^{T} [\Delta w_{ij}^{k}(n)]$$

Étape 4 : Ajuster les paramètres par l'équation (IV.8). 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.2.7.3. Étude 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; un phénomène d'oscillation intervient dès qu'une importance capacité dans cet algorithme d'apprentissage. 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, [55-59]. Une autre technique plus simple pour la modification du taux d'apprentissage. Cette technique 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, [55-56], [59]. Pour éviter le problème des oscillations, beaucoup d'auteurs modifient l'algorithme en lui ajoutant un moment, [60]. La loi d'adaptation devient :

$$w^{k}_{ij}(n) = w^{k}_{ij}(n-1) + \Delta w^{k}_{ij}(n) + \beta w^{k}_{ij}(n-1) \qquad \text{(IV.10)}$$

IV.2.8. Développement du contrôleur neuronal :

Dans notre travail, Le réseau statique multicouche utilisé comme contrôleur neuronal possède une couche d'entrée un deux neurones, une couche cachée de 3 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.

Son apprentissage est réalisé à l'aide de l'algorithme de rétropropagation du gradient basé sur l'erreur $e = p_{ref} - p_{mes}$, avec un taux d'apprentissage adaptatif. Les paramètres du contrôleur sont adaptés en temps réel. L'architecture de ce réseau de neurones est montrée dans la (Fig. IV.9), Où : O_i,O_j,O_m représentent respectivement les valeurs à la sortie des neurones de la couche d'entrée, de la couche cachée et de la couche de Sortie.

Le choix de cette architecture (structure) a été fait par simulation. Dans ce cas, les entrées du réseau de neurones sont :

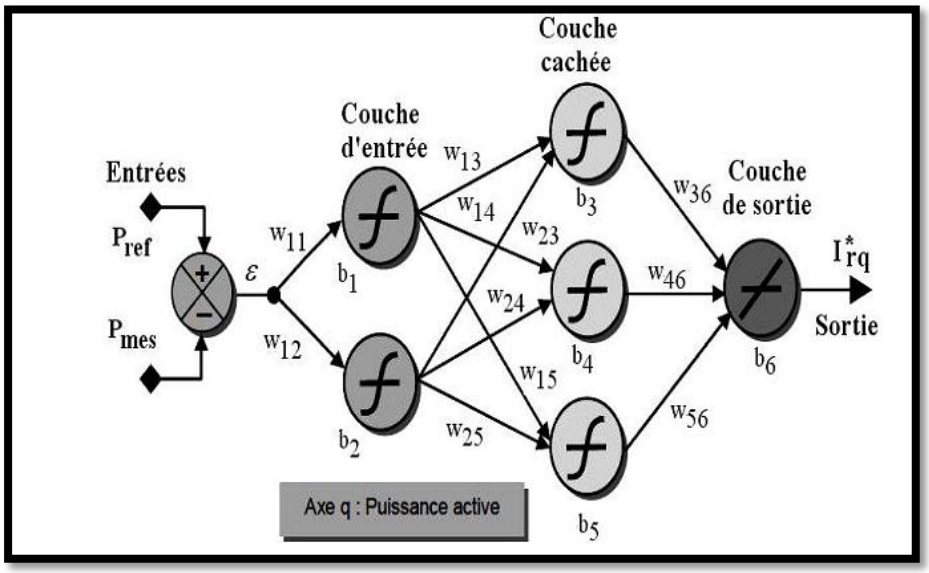


Fig. IV.9. : Architecture neuronal proposée pour l'implémentation du contrôleur.

Pour la couche cachée, suite à une série d'essais de l'erreur quadratique, la simulation nous a mené à choisir une seule couche à trois neurones. (La valeur de l'erreur quadratique est la plus petite (0.1) et a été obtenue au bout de mille itérations seulement comparativement aux autres essais).

IV.2.9. Application des réseaux de neurones au réglage des puissances de la MADA :

On remplacer ces quatre régulateurs floue par quatre régulateurs neuronaux.

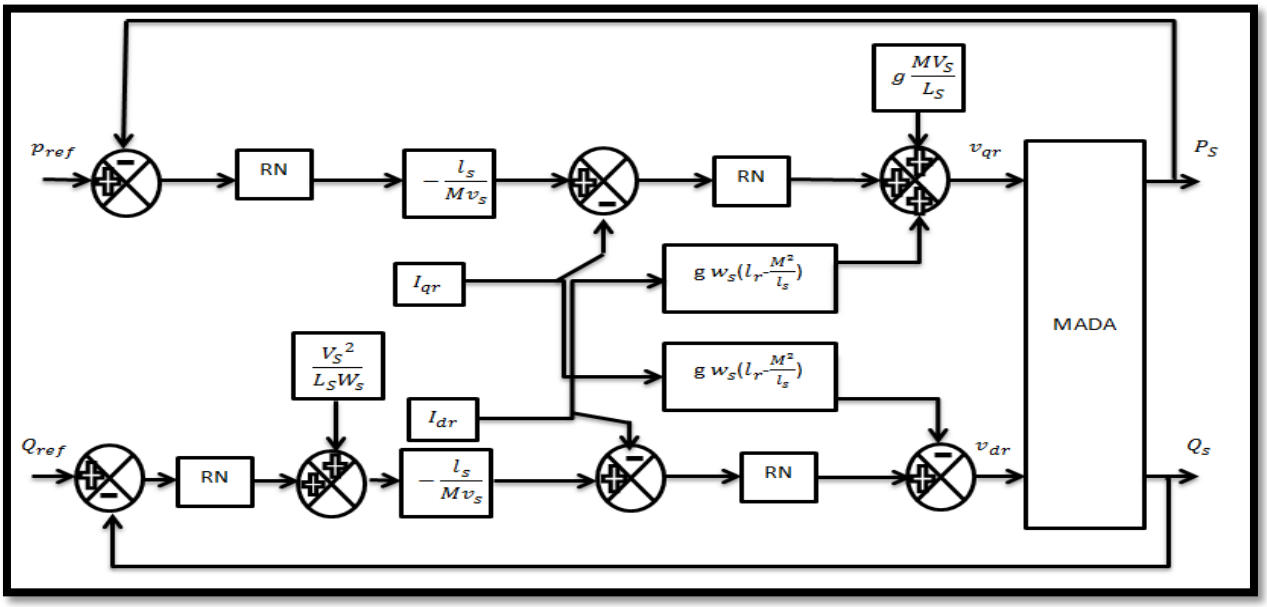
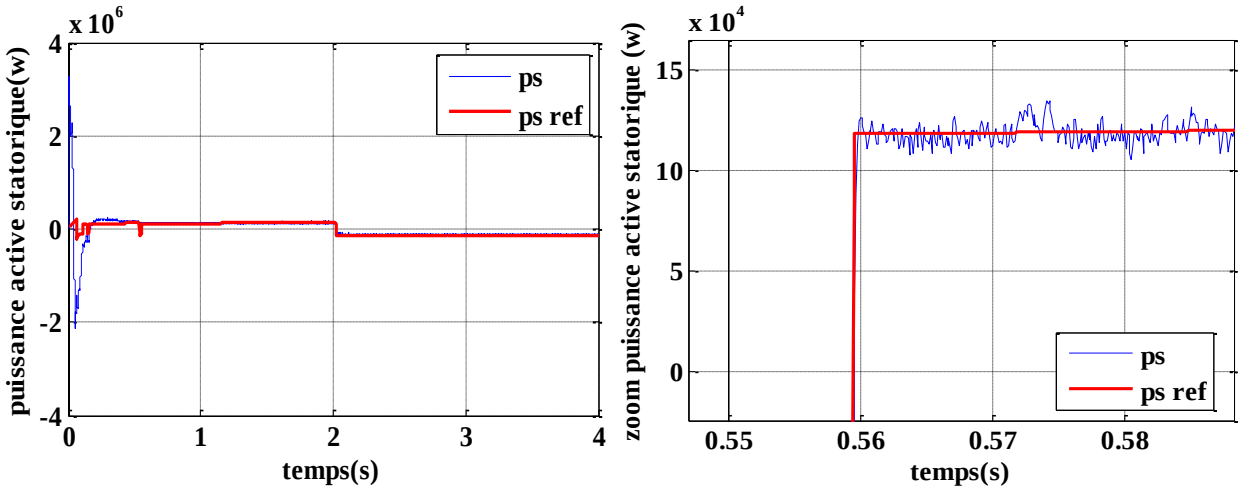


Fig. IV.10. : Schéma bloc global de commande de la MADA par les réseaux de neurones.

IV.2.10. Résultats de simulation :

La figure (IV.10) présente les résultats de simulation des puissances (active, réactive) et les courants rotoriques (idr, iqr, iar). Le régulateur PI est remplacé par un régulateur neuronal.



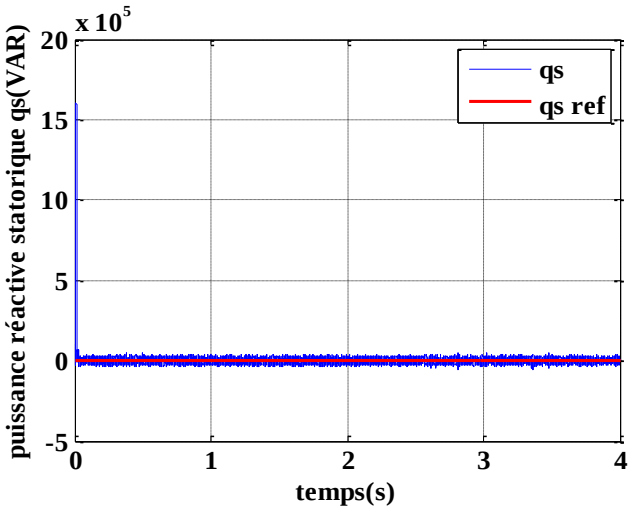


Fig. IV.11.: Résultats de simulation par le réseau de neurone.

IV.2.11. Interprétation des résultats :

A partir des ces résultats de simulation, on peut constater les remarques suivantes :

-On remarque que les puissances active et réactive suivent leurs références, avec une erreur statique nulle et temps de réponse très petit (t=0.13s) par rapporte les autres régulateurs (PI, floue).

IV.3. Conclusion :

La technique de la logique floue a été choisie basé sur un contrôleur floue utilisant la notion de table de décision hors ligne est Implantée dans le contrôle indépendante des puissances statorique pour la machine asynchrone à double alimentation (MADA). Ce choix de la commande a été justifié par la capacité de la logique floue à traiter l'imprécis, l'incertain et le vague.

Les résultats obtenus montrent que le RLF présente des performances de poursuite très satisfaisantes, il a amélioré la dynamique de la puissance par rapport à celle du réglage par PI. Le problème majeur dans la conception d'un RLF est le choix des fonctions d'appartenance pour les variables d'entrées et de sortie qui se fait généralement grâce à l'expertise du processus.

On utilise une synthèse générale pour les réseaux de neurones à apprentissage supervisé spécialement les 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. On peut dire que l'apprentissage en ligne aboutit à une commande nettement plus performante.

A partir des résultats de simulation présentés, on peut dire que le régulateur neuronal présent des améliorations importantes par rapport au régulateur PI et le régulateur floue (temps de réponse et l'erreur statique).

Conclusion générale

La première partie représente l'énergie renouvelable, un état de l'art de la génération éolienne est présenté dans le premier lieu, on rappelle les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique 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 en prendre une étude générale de la machine asynchrone à double alimentation, ses applications, ses modes de fonctionnement et ses avantages. Nous avons exposé la modélisation de cette machine en utilisant la transformation de PARK.

Les résultats de simulation de ce modèle sur Matlab/Simulink nous confirment la possibilité de la double alimentation de la machine par la stabilité de ces différentes grandeurs étudiées pour un fonctionnement générateur et moteur.

Ensuite, nous avons consacré la deuxième partie à l'utilisation d'une commande vectorielle à orientation du flux statorique. Nous avons introduit ensuite la commande vectorielle par orientation du flux statorique de la machine asynchrone à double alimentation. Ce contrôle est réalisé avec corrélation par des puissances de références afin de contrôler l'échange de puissances active et réactive entre le stator et le réseau. On a utilisé une stratégie MPPT sans asservissement de vitesse au niveau de la turbine éolienne pour capter le maximum de puissance du vent.

A la fin, nous nous sommes intéressés à l'application de l'une des techniques de commande pour contrôler les puissances statoriques, cette commande utiliser trois régulateurs différents. Les résultats obtenus ont montrés que le régulateur neuronal faire des améliorations remarquables par rapport les autres régulateur PI et floue. En générale, offrent de bonnes performances statiques et dynamiques, aussi une meilleure poursuite.

ANNEXE I

Les paramètres de la turbine utilisée dans la simulation du chapitre I **:**

Paramètres	Signification
V = 5 m/s	La vitesse du vent
β = 0 °	Angle de calage
ρ = 1.29 Kg/m^3	Masse volumique de l'aire
R = 35.25 m	Rayon de la pale
G = 90	Rapport de transmission du multiplicateur
kf=0.0024 N.m /rad /s	Coefficient de frottement visqueux du générateur

ANNEXE II

Les paramètres de la machine asynchrone à double alimentation (M.A.D.A) :

Paramètres	Signification
P = 1.5MW	puissance nominal consommé
Ω =1500 tr/m	Vitesse nominale
p =2	Paire de pôles
V = 690 V/50 Hz	Tension d'alimentation /fréquence
Rs =0.012Ω	Resistance statorique
Rr =0.021Ω	Resistance rotorique
Ls =0.0137H	Inductance statorique
Lr =0.0136H	Inductance rotorique
M = 0.0135H	Inductance Mutuelle
J = 1000 $Kg.m^2$	Inertie du rotor
kf = 0.0024N.m.s/rad	Coefficient de frottement

Références bibliographiques

[1] http://www.canwea.ca

[2] Nesmat Abu-Tabak, « Stabilité dynamique des systèmes électriquesmulti machines : modélisation, commande, observation et simulation », Thèse dedoctorat, école doctorale électronique, électrotechnique, automatique, Lyon, France, 2008.

[3] L. Khettache, ″Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Machine Electrique Double Alimentée″, Mémoire de Magister, Université de Batna,Algérie , 2007.

[4] C. Nichita, E. Ceanga, A. Piel, J.J. Belhache, L. Protin, ″Real Time Servosystem for a Wind Turbine Simulator″, IEEE 3rd International. Workhop on Advanced Motion Control, USA, pp. 1039-1048, 1994.

[5] M. Budinger, D. Leray, Y. Deblezer, ″A Fuzzy Logic Controlled Power ElectronicSystem for Variable Speed Wind Energy Conversion Systems″, Revue 3EI No21,Juin 2000.

[6] A. Abdelli, ″Optimisation Multicritère d'une Chaîne Eolienne Passive″, Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France,2007.

[7] 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, SOUTENUE LE 06/12/2004.

[8] J. Chatelain, « Machine Electrique Traité d'électricité », Edition Dunod,Tome1,1983, France.

[9] M. V. Kazemi, A. S. Yazdankhah, H. M. Kojabadi, « Direct power control ofDFIG based on discrete space vector modulation, » Elsevier, RenewableEnergy, vol. 35, no. 5, pp. 1033-1042, May 2010

[10] Rachid. Azaizia, « Etude et commande d'une machine asynchrone àdouble alimentation alimentée par un convertisseur multi niveaux », Mémoirede Magister en Génie Electrique, Universite M'hamedBougara des Hydrocarbure et de Chimie, Algérie, 2008.

[11] G. Grellet, G. Clerc, ″Actionneurs Electriques : Principes, Modèles, Commande″, Deuxième Tirage, Editions Eyrolles, Paris, France, 1997.

[12] F. Poitiers, ″Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'Utilisation de L'Energie Eolienne : Machine Asynchrone à Cage Autonome, Machine Asynchrone à Double Alimentation Reliée au Réseau″, Thèse de Doctorat en Electronique et Génie Electrique, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, France, 2003.

[13] M. Birame, ″Commande Floue d'un Convertisseur AC-DC à UPF en Cascade avec un Convertisseur DC-DC Double Etage Alimentant un Système de Biberonnage par Supercapacités d'un Véhicule Electrique ″, Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2005.
[14] E. Merabet, ″Commande Floue Adaptative d'une Machine Asynchrone

[15] S. Zaidi, ″Commande non Linéaire du Moteur à Induction″, Mémoire de Magister,Université de Batna, Algérie, 2005.

[16] V. Rogez, ″Modélisation Simplifiée de Sources de Production Décentralisée pour des Etudes de Dynamique de Réseaux. Application à l'Intégration d'une Production Eolienne dans un Réseau de Distribution Insulaire″, Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université d'Artois, Lille, France, 2004.

[17] J.R. Saenz, A. Tapia, G. Tapia, X. Ostolaza, 1. Albizu, F. Pérez-Hidalgo, M. Irizar, IiReactivePower Regulation in \VindFarrns: Control Strategies H, EPE 2001 - Graz.

[18] ZhangXin-fang, LIU yi-bINg, "Predictive Functional Control Of a Doubly Fed Induction Generatorfor Variable Wind turbines, department of automation north china electrical poweruniversity, IEEE2004 China.

[19] H. Akagi, S. Ogasawara, H. Kim, "The theory of instantaneous power in three phase four wire

[20] José CotoAladro , M Isabel Garda Alvarez, GuzrminDîazGonzaLez, Javier Gémrcz-Aleixandre,

[21] Poul-Etienne VIDAL, « Commande non-linéaire d'une machine asynchrone a double alimentation» thèse 2004.

[22] Armand Boyette, Philippe Poure and Shahrokh Saadate," Direct and indirect control of a Doubly Fed Induction Generator wind turbine including a storage unit", IECON06 novembre 2006 Paris (CD rom ISBN~ 1-4244-0136-4).

[23] Lie Xu and Phillip Cartwright, "Direct Active and Reactive Power Control of DFIG for wind Energy Generation", IEEE TRANSACTIOINS ON ENERGY CONVERSIO,VOL. 21 NO:3 SEPTEYMBER 2006

[24] Hans Øverscth RØstØen, Tore M. Undeland, Terje Gjengedal, "DOUBLY FED INDUCTION Generator A WIND TURBINE"

[25] IoanSerban, FredeBlaabjerg, Ion Boldea, Zhe Chen « A Study of the Doubly-Fed Wind Power Generator Under Power System Faults » , EPE 2003 - Toulouse, ISBI : 90-75815-07-7.

[26] IoanSerban, FredeBlaabjerg, Ion Boldea, Zhe Chen « A Study of the Doubly-Fed Wind Power Generator Under Power System Faults » , EPE 2003 - Toulouse, ISBI : 90-75815-07-7.

[27] A. Tapia, G. Tapia, X. Ostolaza, J.J. Molina, J.R. Saenz, WINDEFARM MODELLING AND PEHFOHYIAKCE SIMULATION »

[28] J. Rosner, H. P. Beck, C Sourkounis, "Wind Energy converter with Asynchronous Machines and Three-Phase AC Controller in Generator Mode", ETEP Vol. 10, NO:4 July/August 2000.

[29] Zadeh, L. A, "Fuzzy Sets", Information and Control, 8, 338, 1965.

[30] Zadeh, L. A, "Fuzzy Sets", Information and Control, 8, 338, 1965.

[31] Zadeh, L. A, "Fuzzy Sets", Information and Control, 8, 338, 1965.

[32] J. Yan, M. Ryan & J. Power, "Using fuzzy logic", Prentice Hall International (UK), 994.

[33] E. Mamdani, "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controllers", nter. Jour. on Man-Machine Studies, Vol. 7, pp. 1-13, 1975.

[34] Mamdani E. H, "Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic lant", Proc. of IEE, Vol. 121, No. 12, 1974.

[35] H. Bühler, "Réglage par logique floue", Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1994.

[36] P. Borne, J. Rozinoer, J. Y. Dieulot, "Introduction à la logique floue", Edition technip, 1998.

[37] Kickert. W. J.M and Mamdani, E.H, "Analysis of a fuzzy logic controller", Fuzzy Sets and Systems, 1, 29–44, 1978.

[38] Backley, J. J, "Theory of the fuzzy controller: an introduction", Fuzzy Sets and Systems, 51, 249–258, 1992.

[39] Nezar. M, "Diagnostic des associations convertisseurs statiques- machines asynchrones en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle", thèse de doctorat d'état de l'université de Batna, 2006.

[40] Braae. M and Rutherford, D.A, "Theoretical and linguistic aspects of the fuzzy logic controller", Automatica, 15, 553–577, 1979.

[41] Hohle. U and Stout, L.N, "Foundations of fuzzy sets", Fuzzy Sets and Systems, 40, 257–296, 1991.

[42] 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.

[43] Mizumoto, M, "Fuzzy controls under various fuzzy reasoning methods", Information Sciences, 45, 129–151, 1988.

[44] Hellendoorn. H, "Closure properties of the compositional rule of inference", Fuzzy Sets and Systems, 35, 163–183, 1990.

[45] Morère. Y, "TP Réseau de neurones feedforward", Master2, université de Metz, 2005.

[46] Davalo. E, Naim. P, "Des Réseaux de Neurones", Edition Eyrolles, 1993.

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

[48] 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.

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

[50] Nezar. M, "Diagnostic des associations convertisseurs statiques- machines asynchrones en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle", thèse de doctorat d'état de l'université de Batna, 2006.

[51] Ould abdeslam. D, "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.

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

[53] 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.

[54] Jean-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.

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

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

[57] 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.

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

[59] Mokhnache. L, "Application de RN dans le diagnostic et la prédiction des isolations HT", Thèse de Doctorat, école nationale polytechnique, 2004.

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