الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique

et de l'Informatique



Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme

de Master en Génie Électrique

Option : commande et électronique industriels

THEME

Régulation d'une éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation

Proposé et dirigé par,

Dr. BOULKHRACHAF. Salah

Dr. BOUDANA . Djamel

Préparé et présenté par,

BOUTRIG. Souhil

BELMADANE . Hassene

AnnéeUniversitaire2014-2015

التحكم في الماكنة اللامتزامنة مضاعفة التغذية متصلة بالشبكة الكهربائية

ملخّص:

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

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

Régulation d'une éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau électrique.

Résumé :

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

Mots Clés : Machine asynchrone à double alimentation (*MADA*), Commande vectorielle logique floue.

Intelligent Artificial Control of a Doubly Fed Asynchronous Machine

Abstract :

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

Keywords: Doubly fed asynchronous machine (*DFAM*), Field oriented control, Fuzzy control.

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

A mes parents surtout ma chère maman qui n'a jamais cessé de ménager ses efforts pour que j'atteigne ce niveau. Ses sacrifices et privations ne l'ont pas empêché d'accomplir son devoir de mère soucieuse de l'avenir de ses enfants.

A mon frère HOSSIN , et le petit RAFIK et mes sœurs qui étaient toujours à mes côtés et qui n'ont jamais cessé de me soutenir et de m'encourager: Jamais de simples mots ne me permettront de vous exprimer mes remerciements.

A ma grande famille

A mes chères copines mostapha *et Ahcen, Aissa , Adel, Lyes, abde elhak,*

A mon cousin abde elhafid.

À tous mes amies et mes collègues, pour les sympathiques moments qu'on a passé ensemble.

À tous ceux qui me connaissent, et surtout qui m'aiment.

Merci.

souhil

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

A ma chère maman qui n'a jamais cessé de ménager ses efforts pour que j'atteigne ce niveau. Ses sacrifices et privations ne l'ont pas empêché d'accomplir son devoir de mère soucieuse de l'avenir de ses enfants.

A mon cher papa qui a su se montrer patiente, compréhensif et encourageant, sa chaleur paternelle a été et sera toujours pour moi d'un grand réconfort.

A mes frères Lakhder, Boudjema, Said, Youcef

Les petits Saif eddin, Fares,

A ma famille, grande et petite

A mes chères copines
Mustapha, Houssam,
Kamel, Rafik, Abd
elhak, Lyes,
Adel,Aissa

À tous mes amies et mes collègues, pour les sympathiques moments qu'on a passé ensemble.

À tous ceux qui me connaissent, et surtout qui m'aiment.

Hassene

REMERCIEMENTS

***E**n Premier lieu, Je remercie **ALLAH,** le Tout Puissant pour m'avoir donné la volonté, la santé et le courage pour réaliser ce travail.*

***J**e remercie infiniment Docteur : BOULKHRACHEF Salah et BOUDANA Djamel qui avoir assuré la co-direction de ce mémoire, pour ces conseils précieux le long de mon travail de mémoire. Je ne saurais trop le remercier pour l'intérêt qu'il a accordé à ce travail et pour les longues heures de discussion qu'il m'a réservé avec une patience inégale. Et tous les enseignants du département Electrique.*

***J**e remercie également tous les membres de jury qui ont bien voulu examiner ce modeste travail. Je suis certaine de pouvoir compter sur leurs vastes connaissances et leur esprit critique constructif pour m'aider, par leurs commentaires et leurs discussions, à mieux comprendre certains problèmes rencontrés au cours de ce travail de recherche.*

***I**l est difficile, dans un petit espace, de remercier toutes les personnes qui ont eu une influence sur ma vie de tous les jours pendant la durée de réalisation de mon mémoire de fin d'études. Ces personnes se reconnaitront facilement et sauront combien ma tendresse et mon amitié sont grandes pour eux.*

***C**e travail n'aurait jamais pu se réaliser sans le soutien continu de ma famille et sans leur éducation basée sur des valeurs morales fondées sur le respect des autres et du travail.*

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENS

Fig.I.1: Evolution des puissance éoliennes installées dans le monde en MW 05

Fig.I.2: *Conversion de l'énergie cinétique du vent.* 06

Fig.I.3:Type de montage de la voilure 09

Fig.I.4:Eolienne à axe vertical 09

Fig.I.5: Aérogénérateur à axe horizontal 10

Fig.I.6:Tube de courant autour d'une éolienne. 11

Fig.I.7:Coefficient de puissance 12

Fig.I.8: Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes. 13

Fig.I.9: Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné. 14

Fig.I.10: Caractéristique puissance/vitesse du vent d'une éolienne classique 15

Fig.I.11:Variation de l'angle de calage d'une pale. 16

Fig.I.12: Caractéristique d'une éolienne en fonction de λ pour différentes valeurs de β 16

Fig I.13: Flux d'air sur un profil de pale " stall " 17

Fig I.14: Puissance fournie d'une éolienne en fonction de sa vitesse. 17

Fig.I.15: Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable. 18

Fig I.16: bouclage de la génératrice au réseau. 18

Fig.I.17: Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles 19

Fig.I.18: Connexion directe d'un machine asynchrone sur le réseau. 20

Fig.I.19: Machine asynchrone à double stator. 21

Fig.I.20:Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur 23

Fig.I.21: Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau 23

Fig.I.22: Machine asynchrone à rotor bobiné (document "Joliet Equipement") 24

Fig.I.23: MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée 25

Fig.I.24: Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique 25

Fig.I.25: structure générale d'une générateur asynchrone à collecteur et à énergie rotorique récupérée (structure de kramere) 26

Fig.I.26: Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur. 26

Fig.I.27: Principe de fonctionnement du cycloconvertisseur 27

Fig.I.28: *structure de Scherbius avec convertisseurs MLI* 28

Fig.I.29: Machine synchrone reliée au réseau par un dispositif redresseur – hacheur – 29

CHAPITRE II:MODELISATION DE LA MADA

Fig.II .1 :structure de statore et des cotacts rotoriques de lamada 32

Fig.II.2 **:***Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone(g>0).* 33

Fig.II.3 : *Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone(g<0)* 34

Fig.II.4 **:***Fonctionnement en mode génératrice hyposynchrone(g>0).* 34

Fig.II.5 : *Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone* 35

Fig.II.6: *Enroulements et les flux dans une machine synchrone et dans une MADA* 36

Fig.II.7: *Comparaison de zone de fonctionnement en survitesse entre la machine à cage et la MADA* 37

Fig.II.8**:**Représentation schématique du modèle d'une MADA-à rotor bobiné 38

Fig.II.9: Représentation de la MADA dans le repère de Park 42

Fig.II.10 : Caractéristiques du couple à vdr = 0 et vqr variable 47

Fig.II.11 : Caractéristiques du couple à vqr = 0 et vdr variable 47

Fig.II.12**:**Caractéristiques de la GADA pourv_{qs}= -380, v_{dr} = 0, v_{qr} = -30V et g=0.05 48

Fig.II.13 **:**Caractéristiques de la GADA pour v_{qs}= -380, v_{dr} = 0, v_{qr} = -30V et g=-0.05 48

Fig.II.14 : Schéma du convertisseur statique 49

Fig.II.15 : Schéma du redresseur triphasé à diodes 49

Fig.II.16 : Représentation d'un filtre 50

Fig.II.17: Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux. 51

Fig.II.18 : signal de porteuse et signaux de référence 53

Fig.II.19 : Tension aux bornes de l'onduleur de la MADA 53

Fig II.20 : Caractéristiques de la GADA pour $v$qs = -380, vdr = 0, vqr = -30V et g=+0.05 dans la présence du 55

Fig.II.21 : Caractéristiques de la GADA pour $v$qs = -380, vdr = 0, vqr = -30V et g=-0.05 dans la présence du convertisseur AC-DC-AC 55

Chapitre III :Réglage classique de puissances statoriques de la MADA

Fig.**III**.1: commande d'une machine à courant continue et commande vectorielle d'une mada 57

fig.**III**.2. modèle de la mada pour le contrôle des puissances 62

fig.**III**.3 : schéma de principe de la commande indirecte des puissances statoriques de la gada 63

Fig.III.4: schéma bloc de régulation du courant i_{dr} 64

Fig.III.5: position des pôles dans le plan de phase 65

fig.III.6*: puissances active statoriques en commande indirect* 67

Fig. III.7*: Puissances réactive statoriques en commande indirect* 67

fig.III.8: schéma de principe de la commande directe des puissances statoriques de la gada 69

Fig.III.9*:* schéma bloc de régulation de la puissance réactive Q_s 69

Fig.III.10: puissances active statoriques en commande direct 71

Fig.III.11 : puissances réactive statoriques en commande directe. 72

CHAPITRE IV :Commande par la logique floue type-1 de la MADA

fig. IV.1:classification des personnes en trois ensembles la logiqueclassique 74

fig. IV.2:classification des personnes en trois ensembles selon la logique classque 74

fig. IV. 3 : schéma synoptique général d'un contrôleur flou. 75

fig. IV.4: les fonction d'appartenance des différentes variables linguistique 80

fig . IV.5 : réglage puissance active statorique par la logique floue 83

fig . IV.6 : réglage puissance reactive statorique par la logique floue. 83

fig . IV.7*: schéma d'une turbine éolienne* 84

fig. IV.8*: schéma bloc du modèle de la turbine* 86

fig .IV.9: *caractéristique puissance vitesse d'une éolienne de grande puissance* 87

fig.iv.10: *schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse* 89

fig. IV.11 : *vitesse de vent (m/s)* 90

fig. IV.12 :*la vitesse mécanique* 90

fig. IV.13 : *la coefficient de puissance* 90

fig. IV.14 : la puissance active et réactive statorique 91

fig. IV.15: les courants rotoriques idr et iqr et couple 91

NOTATIONS ET SYMBOLE

V_{vent}: Vitesse du vent (m/s)

P_{vent} : Puissance du vent (w)

R : Rayon de la surface balayée par la turbine. (m)

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

C_p: Coefficient de puissance

λ : La vitesse relative de l'éolienne.(tr/min)

$\Omega_{turbine}$:Vitesse de rotation de la turbine. (tr/min)

Ω_{mec}:Vitesse de rotation de l'arbre du générateur. (tr/min)

β : Angle de calage (degré)

$C_T(\lambda)$: coefficient de couple (N.m).

sa , sb , sc: Phases du enroulement statorique.(v)

ar ,br , cr: Phases rotoriques.(v)

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

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

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

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

g: Glissement de la machine

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

V_{dqs}: Tensions de l'enroulement statorique dans l'axe d,q (v).

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

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

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

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

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

i_{dqr} : Courants de l'enroulement statorique dans l'axe d,q (A).

Lss, Lrr : Inductances propres statorique et rotorique.(H)

Ms, Mr : Inductances mutuelles phases statoriques et rotoriques (H).

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

Rs ,Rr : Résistances statorique et rotorique par phase(Ω).

ls ,lr : Inductances de fuites statoriques et rotoriques (H).

σ: le coefficient de dispersion entre les enroulements.

C_{em}: Couple électromagnétique (N.m).

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

Cr : Couple résistant (N.m)

f_r: Coefficient de frottements visqueux (N.m/rad).

Ω : Vitesse de rotation de la machine (tr/min)

J: Moment d'inertie de la machine (Kg.m^2.)

p : Nombre de paire de pôles.

P : Operateur de LAPLAS.

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

P_S :Puissance active transitant par le stator (w).

P_r: Puissance active transitant par le rotor (w).

Q_S : Puissance réactive transitant par le stator (VAR).

Q_r : Puissance réactive transitant par le rotor(VAR)

R : Règle d'inférence.

e :L'erreur

Δe : Variation de l'erreur.

ABREVIATIONS

MADA : Machine asynchrone à double alimentation.

MLI : Modulation de largeurs d'impulsions

MAS : Machine Asynchrone

MPPT : poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale

MCC : machine a courant contenue

MFS : système flou-mamdani

SIF : système d'inférence flou

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Introduction générale..... 01

Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliennes

I.1. introduction..... 04

I.2. historique..... 04

I.3. description de l'énergie éolienne..... 05

I.3.1 Définition de l'énergie éolienne 05

I 3.2 Origine du vent..... 06

I .3.3 Caractéristique horizontale de vent..... 06

I 3.3.1 Distribution de Weibull : 06

I .3.3.2 Distribution hybride de Weibull 07

I .3.3.3Distribution deRayleigh 08

I.4. les differents types d'eoliennes 08

I .4.1 Eoliennes à axe horizontal..... 08

I .4.2 Eoliennes à axe vertical (VAWT)..... 09

I .5. principaux composants d'une eolienne a' axe horizontal..... 10

I .6. puissance aerodynamique 11

I .6.1 Loi de Betz 11

I .7. regulation mecanique de la puissance d'une eolienne..... 14

I .7.1 Le système « pitch »..... 15

I .7.2 Le système « stall » 16

I .7.3 Production optimale d'énergie..... 18

I.8. générateur électrique..... 19

I .8.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone..... 19

I .8.1.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil..... 19

I .8.1.2 Machine asynchrone à cage..... 21

I.8.1.3 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance..... 22

I .8.1.4 Machine asynchrone à cage double stator type "brushless"..... 23

I .8.1.5 Machine asynchrone à collecteur..... 24
I .8.1.5.1 Machine asynchrone à collecteur à énergie rotorique dissipée..... 24
I .8.1.5.2 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer 25
I .8.1.5.3 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertis..... 26
I .8.1.5.4 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec convertisseurs MLI..... 27
I .8.2 Systèmes utilisant la machine synchrone..... 28
I .8.2.1 Alternateur synchrone à rotor bobiné ou à aimants..... 28
I.9. Conclusion..... 30

Chapitre II Modélisation de la MADA

II.1.introduction 31
II. 2. structure de la machine..... 31
II.3 principe de fonctionnement de la MADA..... 32
II.4. mode de fonctionnement..... 33
II.4.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone..... 33
II.4.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone..... 33
II.4.3 Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone..... 34
II.4.4 Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone..... 35
II.5. avantages et inconvénients de la mada..... 35
II.5.1 Avantages de la MADA..... 36
II.5.2 Inconvénients de la MADA..... 37
II.6.Modélisation de la machine double alimentation..... 38
II.6.1 Hypothèses simplificatrices 38
II.6.2 Modèle de la MADA dans le repère abc 38
II.6.3 Changement de repère 41
II.6.3.1 La transformation de Park..... 41
II.6.3.2 Equations électriques et magnétiques dans le système d'axes *(d, q)* 43
II.6.4 Choix du référentiel 44

II.6.5 Modèle biphasé de la MADA lié au champ tournant…… 44
II.6.6 Equation du couple électromagnétique…… 45
II. 6.7 Mise sous forme d'équation d'état…… 45
II. 6.8 Mise sous forme d'équation d'état…… 45
II.7.caracteristique de couple……... 46
II.8.simulation de la machine asynchrone a double alimentation……. 47
II.9. modelisation de l'alimentation de la mada……... 48
II.9.1 .modélisation du redresseur …… 49
II.9.2 modélisation du filtre…….. 49
II.10. modelisation de l'onduleur de tension…… 50
II.11. commande mli de l'onduleur……. 52
II.12. simulation de l'association convertisseur-mada…… 53
II.13. conclusion…… 55

Chapitre III : Réglage classique de puissances statoriques de la MADA

III.1. introduction ……. 57
III.2 principe de la commande vectorielle de la mada…….. 57
III.2.1 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique…… 58
III.2.2 Expressions des puissances active et réactive statoriques……. 60
III.2.3 Expressions des tensions rotoriques…….. 61
III.3.contrôle indépendant des puissances active et reactive…… 62
III.3.1 Contrôle indirect des puissances de la GADA…….. 62
III.3.1.1. Dimensionnement du correcteur…… 63
III.3.1.2. Résultats de simulations…….. 66
III.3.2. Contrôle directe des puissances de la GADA……... 67
III.3.2.1. Dimensionnement du correcteur…….. 68
III.3.2.2.Résultats de simulations…….. 71
III.4.conclusion…….. 72

CHAPITRE IV : Commande par la logique floue type-1 de la MADA

IV.1 introduction ……. 7 3
IV.2.principe fondamental de la logique floue……. 73
IV. 3. contrôleur flou……... 75
IV. 4. stratégie de fuzzification …….. 76
IV. 4. 1 . base de données…… 77
IV. 4. 2 . base de données…… 78
IV. 4. 3 . base de règle…… 78
IV. 5. defuzzification……. 78
IV. 5. 1. méthode du maximum…… 78
IV. 5. 2. méthode de la moyenne des maxima……. 78
IV. 5. 3. méthode du centre de gravité……. 79
IV. 5. 4. méthode des hauteurs pondérés…… 79
IV.5.5. résultat de simulation……... 82
IV.6. modélisation de la turbine éolienne…… 84
IV.6.1 Modélisation de la turbine ……... 84
IV.6.2 Modèle du multiplicateur……..... 85
IV.6.3 Equation dynamique de l'arbre……..... 85
IV.6.4 Schéma bloc du modèle de la turbine…… 86
IV.7. les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne a vitesse variable 87
IV.8. maximisation de la puissance extraite …… 88
IV.9.conclusion……..... 92

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

L'agence d'Énergie Internationale (IEA) prévoit qu'avant 2030, les besoins d'énergie dans le monde seront presque soixante pour cent plus élevés que maintenant. Les deux-tiers de cette augmentation concerne la Chine, l'Inde et dans d'autres économies en voie de développement; ces pays représenteront presque la moitié de consommation d'énergie globale avant 2030. Face à cette demande, et loin de l'utilisation des énergies fossiles polluantes (pétrole et gaz), et de façon à limiter l'emploi de centrales nucléaires, plusieurs pays sont tournés vers une nouvelle forme d'énergie dite "renouvelable". En effet, un véritable challenge mondial est pris au sérieux aujourd'hui, aussi bien sur la politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre, en les ramenant à leur niveau de 1990, que sur celui de l'exploitation des ressources d'énergie renouvelable. Ceci a été recommandé à la 3ème Conférence des parties de la convention – cadre des nations unies sur les changements climatiques qui s'est tenue à Kyoto en décembre 1997 [13]

Cette évolution a engendré une accélération d'insertion de production dé centralisée d'électricité dans les réseaux de distribution. Parmi ces productions, le marché mondial de l'énergie éolienne progresse plus rapidement que celui de toute autre source d'énergie renouvelable. Le total mondial, qui ne dépassait pas 4800 MW en 1995, a atteint 282 482MW en 2013, après 158 505MW en 2009, 74 052MW en 2006, 93 835MW en 2007 et 120297MW en 2008, D'après les prévisions 2011 du GWEC, la capacité mondiale devrait s'élever à 493 330 MW fin 2016. En 2020, leur scénario prévoit environ 832000 MW de puissance installée. De nos jours, la forme la plus connue et utilisée de technologie éolienne est l'aérogénérateur, une machine qui obtient de l'énergie à partir du vent pour générer un courant électrique. La taille de ces turbines éoliennes modernes va de quelques watts jusqu'à plusieurs mégawatts. La majorité des systèmes commerciaux actuels sont des turbines éoliennes à axe horizontal (HAWT) avec des rotors à trois pales (tripales) . Les turbines peuvent transférer de l'énergie électrique à un réseau de puissance à travers des transformateurs, lignes de transport et sous-stations associés. L'utilisation de ces aérogénérateurs présente des avantages importants. En effet, ils sont pour l'instant l'un des moyens les plus écologiques d'obtenir de l'électricité et cette source est inépuisable. Cependant le coût de l'énergie éolienne est encore trop élevé pour concurrencer les sources traditionnelles[08].

De nombreux travaux de recherche sur la modélisation et la commande d'éoliennes ont été menés[08].Grâce à ces travaux, et grâce au progrès de l'électronique de puissance les dernières générations d'éoliennes fonctionnent avec une vitesse variable et disposent d'une régulation pitch. Il est ainsi possible de modifier la vitesse de rotation et l'angle de calage de chacune des pales, permettant alors d'améliorer la production de l'aérogénérateur. Néanmoins, il reste encore à introduire plus d'intelligence dans le fonctionnement des aérogénérateurs.

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est un type d'aérogénérateur qui a fait l'objet de nombreuses études ces dernières années. La réduction des efforts sur les parties mécaniques, la réduction du bruit et la possibilité du contrôle des puissances active et réactive offre à la machine asynchrone à double alimentation (MADA) plus d'avantage pour l'utiliser en éolienne à vitesse variable [10]. Le système éolien utilisant une MADA et un convertisseur « back-to-back » qui relie le rotor de la génératrice et le réseau, présente de nombreux atouts. L'un des avantages de cette structure est que les convertisseurs de puissance utilisés, sont dimensionnés pour faire transiter une fraction de la puissance totale du système. Ce qui permet la réduction des pertes dans les composants d'électronique de puissance.

Dans ce contexte, l'apport envisagé avec ce travail de thèse est de collaborer à la conception optimale d'un système de conversion de l'énergie éolienne utilisant une génératrice asynchrone à double alimentation, ainsi qu' à l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique en compensant la puissance réactive et les courants harmoniques présents sur le réseau.

Dans le premier chapitre des notions générales sur l'énergie éolienne sous une forme assez des criptive sont présentées. Nous exposerons quelques statistiques sur le développement de l'énergie éolienne au cours des dernières années. Ensuite, à travers une revue de la littérature disponible nous dresserons un état de l'art des différentes technologies éoliennes ainsi que les différents composants constituant l'aérogénérateur seront brièvement présentés.

La deuxième partie est consacrée à la modélisation de la machine asynchrone à double Alimentation, Celle-ci sera clôturée par une simulation des caractéristiques de la MADA et la modélisation de l'onduleur alimentant la machine à travers le Bobinage de Commande. La commande MLI de ce dernier sera étudiée.

Le troisième chapitre sera réservé à la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation qui est entraînée par la turbine éolienne. Dans le chapitre quatre un régulateur à base de logique floue est utilisé pour le contrôle de la puissance active et réactive de l'aérogénérateur.

CHAPITRE.I

Généralités sur les systèmes éoliens

I.1. INTRODUCTION

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pâles profilées ont été utilisés avec succès pour générer l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes [19] .

Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones.

Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes [08].

I.2. HISTORIQUE

Il y'a plus de 3000 ans déjà, l énergie du vent était transformée en énergie mécanique, d'une part sur terre par les moulins et des systèmes de pompage de 1'eau, d'autre part en mer, par les bateaux. La génération d'énergie électrique par le vent a débute à la fin du 19eme siècle. Parmi les pionniers on peut citer Paul La Cour au Danemark qui a associé une dynamo à une éolienne en 1891[07].

Dans les années 1950. Johannes Juul (élève de Paul La Cour) devient aussi un pionnier dans l'utilisation de 1'énergie éolienne en construisant les premières éoliennes produisant du courant alternatif. La première crise pétrolière en 1973 contribua à éveiller 1'intérêt pour 1'énergie éolienne dans plusieurs pays[07].

Les USA ont notamment lancé en Californie une opération a grande échelle au début des années 1980 en passant de 7MW ,en 1981 a 386 MW en 1985.

Aujourd'hui, les études portent sur l'amélioration de l'aérogénérateur ainsi que sur la chaine de conversion de 1'énergie du vent en énergie électrique exploitable par le réseau. Les premières éoliennes mettent en œuvre une génératrice asynchrone liée aux pâles par 1'intermédiaire d'une boite de vitesse, fonctionnant à vitesse fixe et directement reliée au

réseau (pas d'interface électronique). Cette technologie est surtout employée au Danemark dans les années 1970[07].

Les systèmes les plus récents se dirigent d'une part vers la vitesse variable pour maximiser la puissance captée du vent avec 1'insertion d'électronique entre la génératrice et le réseau, et d'autre part vers l'utilisation de génératrices spéciales tournant a basse vitesse afin de s'affranchir du réducteur de vitesse[07].

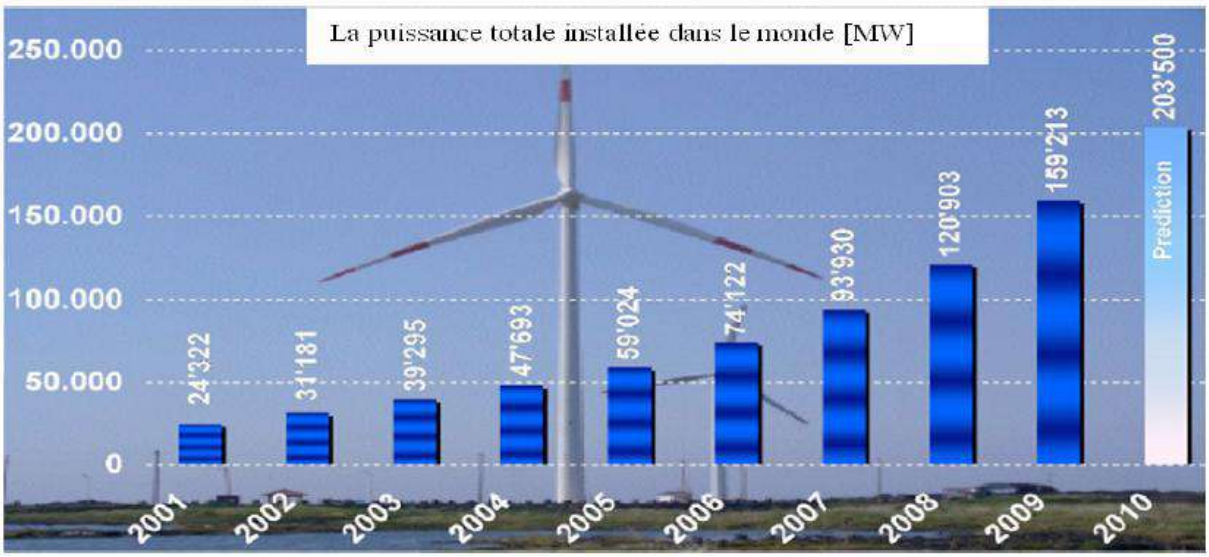


Fig .I.1: Evolution des puissance éoliennes installées dans le monde en MW

I.3. DESCRIPTION DE L'ENERGIE EOLIENNE :

I.3.1 Définition de l'énergie éolienne :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure I.2) [15].

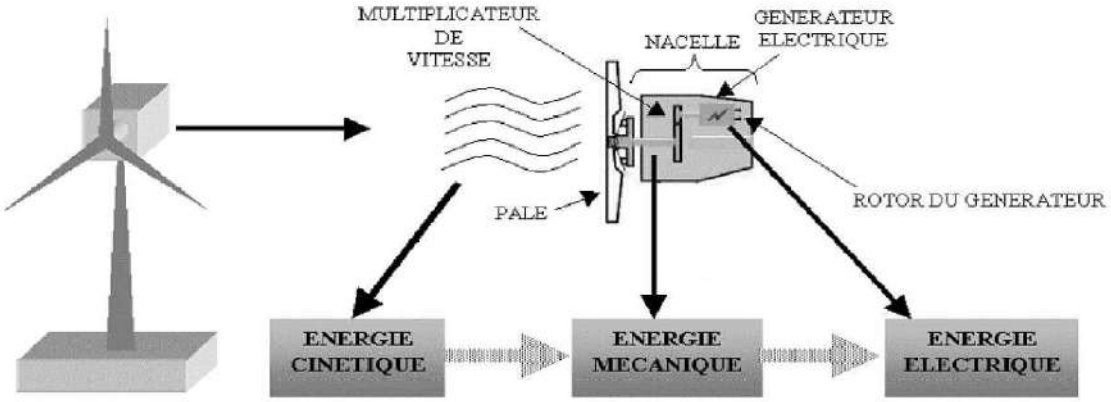


Fig.I.2:. *Conversion de l'énergie cinétique du vent.*

I 3.2 Origine du vent :

Du fait que la terre est ronde, le rayonnement solaire absorbé diffère aux pôles et à L'équateur. En effet, l'énergie absorbée à l'équateur est supérieure à celle absorbée aux pôles. Cette variation entraîne une différence de température en deux points qui induit des différences de densité de masse d'air provoquant leur déplacement d'une altitude à une autre. Ces déplacements sont influencés par la force de **Coriolis** qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement vers l'est dans l'hémisphère nord et vers l'ouest dans l'hémisphère sud.

On pourrait aisément prévoir la direction des vents dominants si elles n'étaient pas perturbées par les orages, les obstacles naturels ou les dépressions cycloniques [01].

I .3.3 Caractéristique horizontale de vent :

Les études de modélisation de la distribution des vitesses du vent ont été orientées vers des modèles associant puissance et exponentielle. Les modèles usuels étant [11]:

- la distribution de **Weibull**.
- la distribution **hybride de Weibull.**
- et la distribution de **Rayleigh**.

I 3.3.1 Distribution de Weibull :

Comme c'est difficile de manipuler l'ensemble des données relatives à une distribution de la fréquence du vent, il est plus convenable pour des considérations théoriques,

de modéliser l'histogramme des fréquences des vitesses du vent par une fonction mathématique continue que par une table de valeurs discrètes [13].

On peut donc opter pour le modèle de Weibull. En effet, pour des périodes allant de quelques semaines jusqu'à une année, la fonction de Weibull représente raisonnablement les vitesses observées. Il s'agit d'une fonction de densité de probabilité, s'exprimant sous la forme[19]:

$$P(V) = \left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^{k}} \quad \text{(I.1)}$$

Avec $P(V)$: est la densité de probabilité de la vitesse V ; k le facteur de forme de la courbe (sans dimension) et C le facteur d'échelle de la courbe en m/s .

La vitesse moyenne du vent peut être trouvée en intégrant la fonction densité de probabilité, soit donc la formule (I.2):

$$v_{moy} = \int (V)\, f(V) dv \quad \text{(I.2)}$$

Ainsi, la distribution de Weibull peut faciliter beaucoup de calculs rendus nécessaires par l'analyse des données du vent.

I .3.3.2 Distribution hybride de Weibull :

La distribution hybride de Weibull, est utilisée lorsque la fréquence des vents calmes enregistrée, sur un site donné, est supérieure ou égale à 15%.

En effet, cette proportion ne peut pas être négligée et doit être prise en compte lors de la caractérisation d'un site du point de vue éolien. Cette distribution s'écrit [09]:

$$\begin{cases} f(V) = (1 - ff_0)\left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^{k}} & (v \geq 0) \\ f(V) = ff_0 \end{cases} \quad \text{(I.3)}$$

Où ff_0 représente la fréquence des vents calmes.

Il existe de nombreuses méthodes pour déterminer k et C à partir d'une distribution de vent donnée.

$$\begin{cases} c = \frac{1.125 \times v_{moy}}{(1-\beta)} \\ k = 1 + 0.483 \times \left(v_{moy} - 2\right)^{0.51} \\ \beta = 1 - 0.81 \times \left(v_{moy} - 1\right)^{0.089} \end{cases} \quad \text{(I.4)}$$

I .3.3.3Distribution de Rayleigh :

La distribution de Rayleigh est un cas particulier de la distribution de Weibull pour le cas où le facteur de forme k est égal à 2. Sa densité de probabilité est donnée par :

$$f(V) = 2\frac{v}{c^2}e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad \text{(I.5)}$$

Toutefois la distribution de Weibull classique (fonction de deux paramètres) est la plus indiquée. L'utilisation de ces deux paramètres permet l'évaluation d'un nombre important de propriétés de la distribution, d'où une meilleure caractérisation des sites [09].

I .4. LES DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNES :

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

I .4.1 Eoliennes à axe horizontal :

Les voilures à axe horizontal sont de loin les plus utilisées actuellement. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales (les plus courantes) et les multipales.

La voilure peut être placée avant la nacelle (upwind) et alors un système mécanique D'orientation de la surface active de l'éolienne « face au vent » est nécessaire. Une autre solution qui permet d'alléger la construction par la suppression de toute mécanique d'orientation est l'emplacement de la turbine derrière la nacelle (downwind) [05].

Dans ce cas la turbine se place automatiquement face au vent. La figure (I.3) montre les deux procédés.

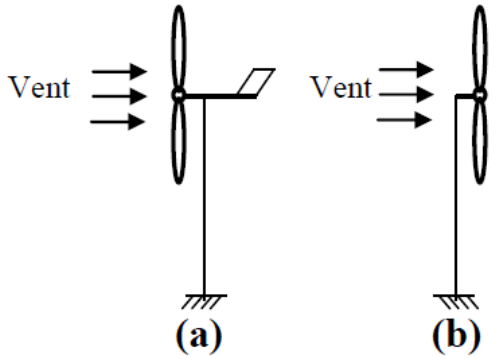


Fig .I.3: Type de montage de la voilure

a) upwind

b) downwind.

I .4.2. Eoliennes à axe vertical (VAWT):

Une autre famille d'éoliennes est basée sur les voilures à axe vertical. Ce type d'éoliennes est très peu répandu et assez mal connue. Il existe principalement trois technologies [12]:

Les turbines Darrieus classiques à pales droites (H-type) et la turbine de type Savonius, Toutes ces voilures sont à deux ou plusieurs pales.

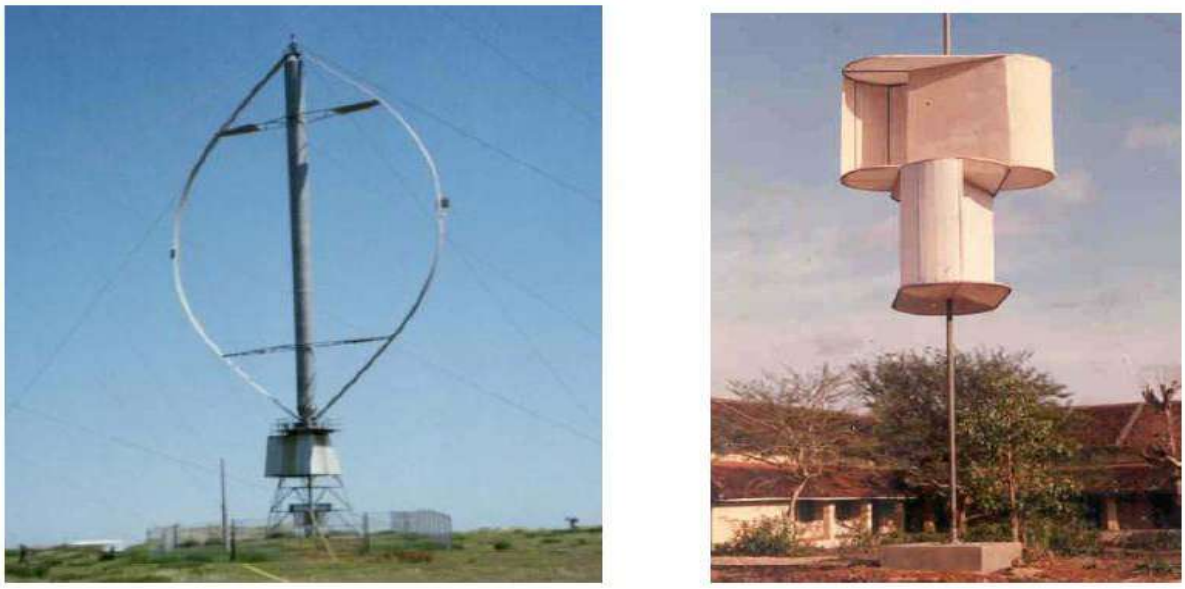


Fig.I.4: Eolienne à axe vertical

I .5. PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UNE EOLIENNE A' AXE HORIZONTAL :

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux:

- **Le mât**, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le

plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol

- La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.
- Le rotor, formé par les pales assemblées dans leur moyeu.
- Le système électromécanique (intégré dans la nacelle), qui transforme l'énergie mécanique transmise par la turbine en énergie électrique et qui regroupe une génératrice électrique avec son environnement.
- Le système d'interconnexion, qui relie le système électromécanique (producteur d'électricité) au consommateur d'électricité
- Le système de contrôle (utilisé généralement pour les systèmes éoliens de grande puissance), comportant un dispositif qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation et essaye aussi de la mettre fonctionner à ces puissances maximales. En cas de défaillance (par exemple surchauffe du multiplicateur ou de la génératrice, …etc.), le système arrête automatiquement l'éolienne[17].



Fig .I.5: Aérogénérateur à axe horizontal.

I .6. PUISSANCE AERODYNAMIQUE

I .6.1 Loi de Betz :

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la (Fig I.6) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2en aval.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2, la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface *S* des pales en une seconde est [14]:

$$m = \rho . s \frac{V_1 + V_2}{2} \tag{I.6}$$

La puissance P_m alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_m = \frac{1}{2} m . V^2 \tag{I.7}$$

Soit en remplaçant *m* par son expression dans :

$$P_m = \frac{\rho . S . (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \tag{I.8}$$

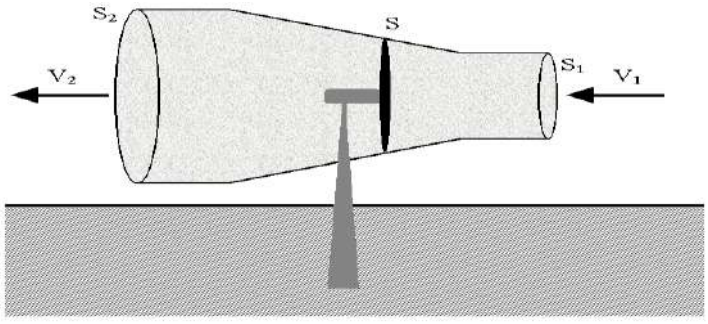


Fig.I.6: Tube de courant autour d'une éolienne.

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface *S* sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1, la puissance P_{mt} correspondante serait alors[06] :

$$P_{mt} = \frac{\rho . S . V_1^3}{2} \tag{I.9}$$

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

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1+\left(\frac{V_2}{V_1}\right)\right)\left(1-\left(\frac{V_2}{V_1}\right)\right)^2}{2} \qquad \text{(I.10)}$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (figure I.7), on s'aperçoit que le ratio (P_m/P_{mt}) appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maximum de 16 /27 soit 0.59. C'est cette limite théorique appelée limite de **Betz** qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.

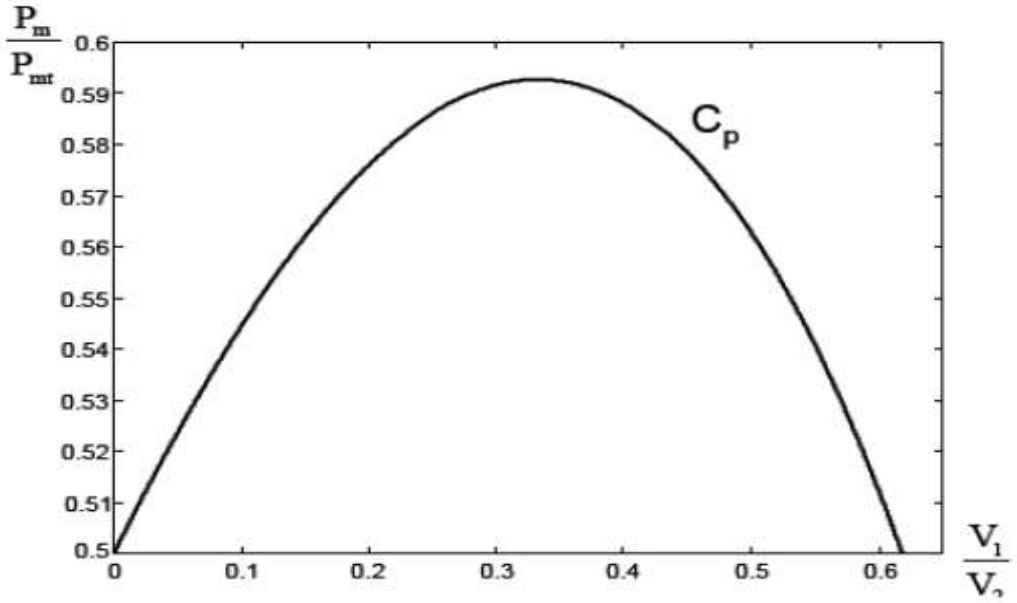


Fig .I.7: Coefficient de puissance.

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance (Figure I.8) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite [04].

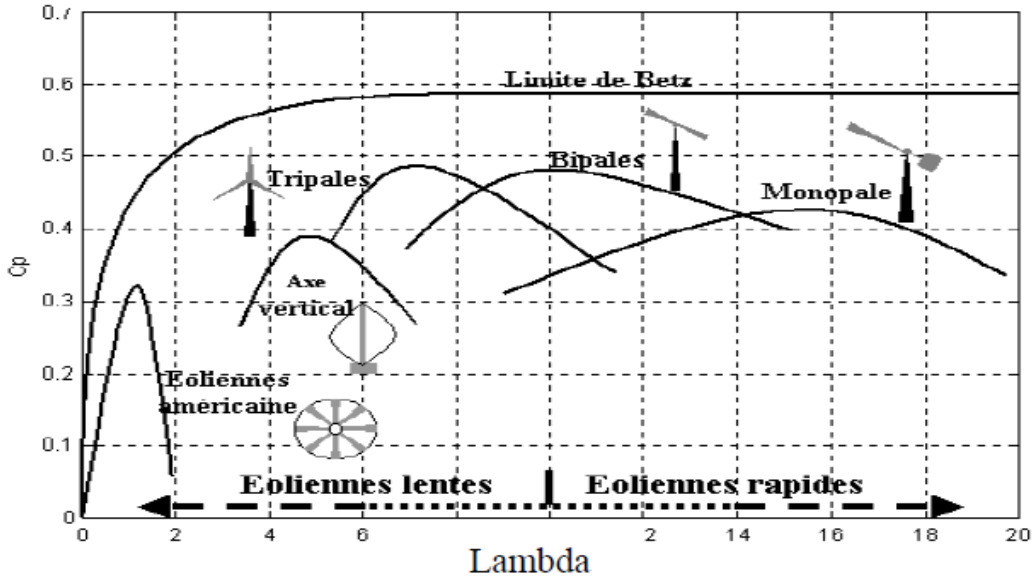


Fig .I.8: Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.

Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts [04].

En combinant les équations (I 1.9), (I.11) et (I.12), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} P_{mt} = C_p . P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) . \rho . \pi . R^2 . V_1^3 \quad \text{(I.11)}$$

Avec : $$\lambda = \frac{\Omega_1 . R}{V_1} \quad \text{(I.12)}$$

Ω_1 : vitesse de rotation avant multiplicateur.

R: rayon de l'aérogénérateur.

G :Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse.

P_{mt} :la puissance mécanique disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_{mt} = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_2 R}{K V_1}\right) P . \pi . R^2 V_1^3 \quad \text{(I.13)}$$

Ω_2 : vitesse de rotation après multiplicateur.

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation de générateur pour différentes vitesses du vent (Figure I.9) [19] .

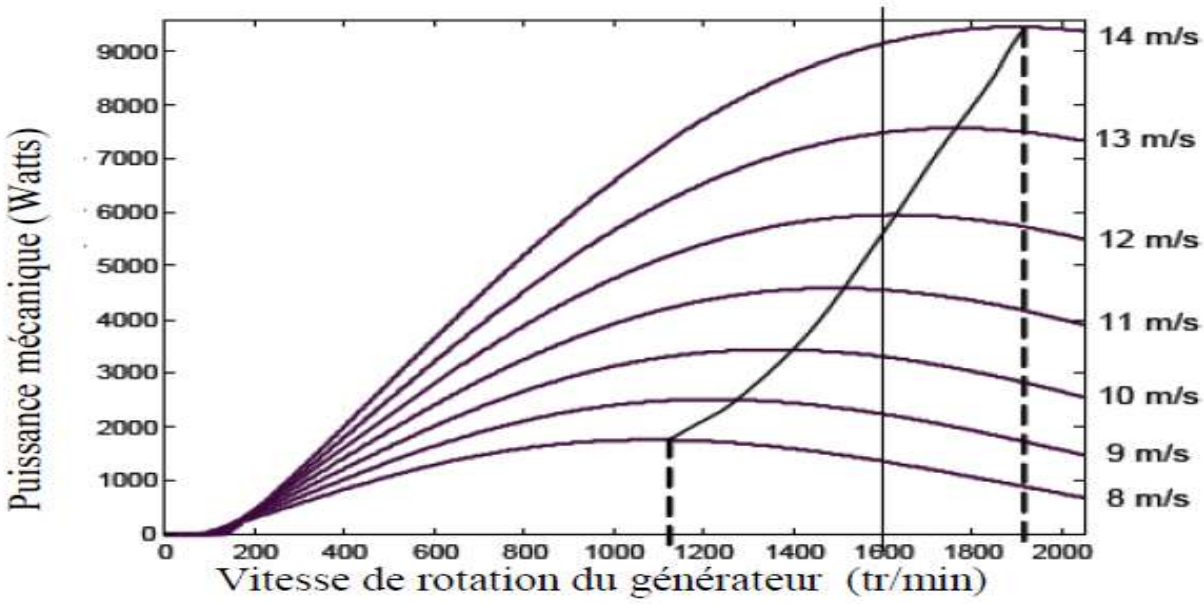


Fig .I.9: Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné.

Selon ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min sur la (Figure I.9) les maximum théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple[20].

I .7. REGULATION MECANIQUE DE LA PUISSANCE D'UNE EOLIENNE :

L'objectif de cette régulation est double, d'une part de protéger l'éolienne contre le vent fort et d'autre part de délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale P_n à une vitesse de vent nominale V_n , au delà de cette vitesse, les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au delà d'une vitesse maximale V_{max}, qui pourrait endommager la turbine. On peut définir quatre zones de fonctionnement (Figure.I.10)

- La zone *I*: le vent n'est pas suffisant pour faire fonctionner la turbine
- La zone *II*: la puissance fournie par l'arbre va dépendre de la vitesse du vent

• La zone *III*: la vitesse de rotation est maintenue constante par régulation de la vitesse et la puissance *P* fournie reste égale à P_n,

• La zone *IV*: la vitesse du vent est trop importante, pour ne pas détériorer le générateur éolien, les pales de la turbine sont mises en drapeaux ($\beta = 90^{\circ}$) [07]

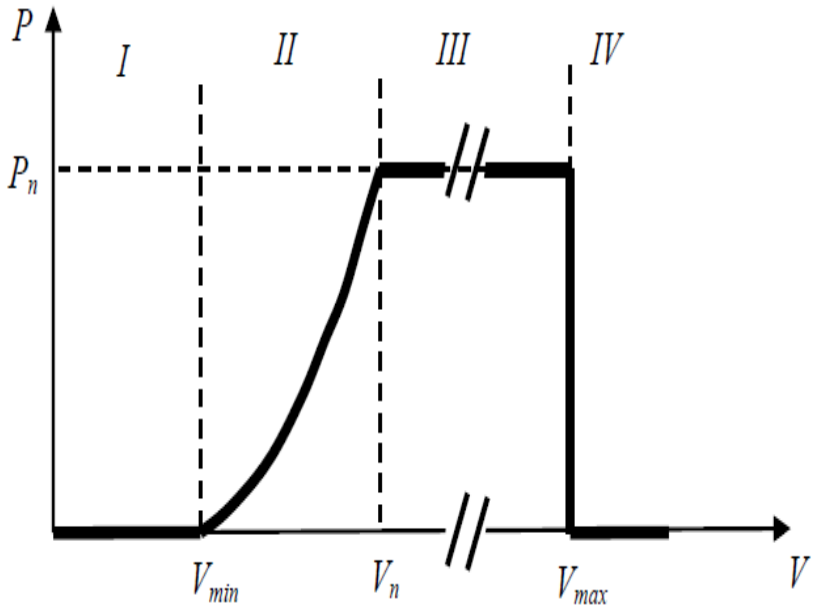


Fig .I.10: Caractéristique puissance/vitesse du vent d'une éolienne classique

Ils existent plusieurs systèmes de régulation de vitesse pour la turbine, on va s'intéresser pour notre part aux systèmes les plus couramment utilisés à savoir :

• Le système « pitch » ou « pas de calage variable »

• Le système « stall » ou « à décrochage aérodynamique »

I .7.1 Le système « pitch » :

La (figure I.12) nous montre l'évolution de la caractéristique d'une éolienne en fonction de β. Plus l'angle de calage sera important, moins la turbine captera l'énergie cinétique du vent.

Les pales sont face au vent pour des vents faibles afin d'en extraire le maximum de puissance puis lorsque le vent nominal V_n, est atteint, elles s'inclinent pour atteindre la position « drapeau » à la vitesse du vent maximale[19].

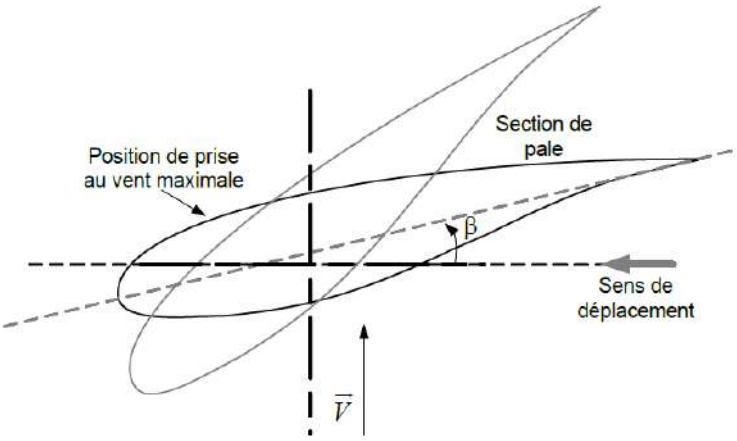


Fig I.11:Variation de l'angle de calage d'une pale.

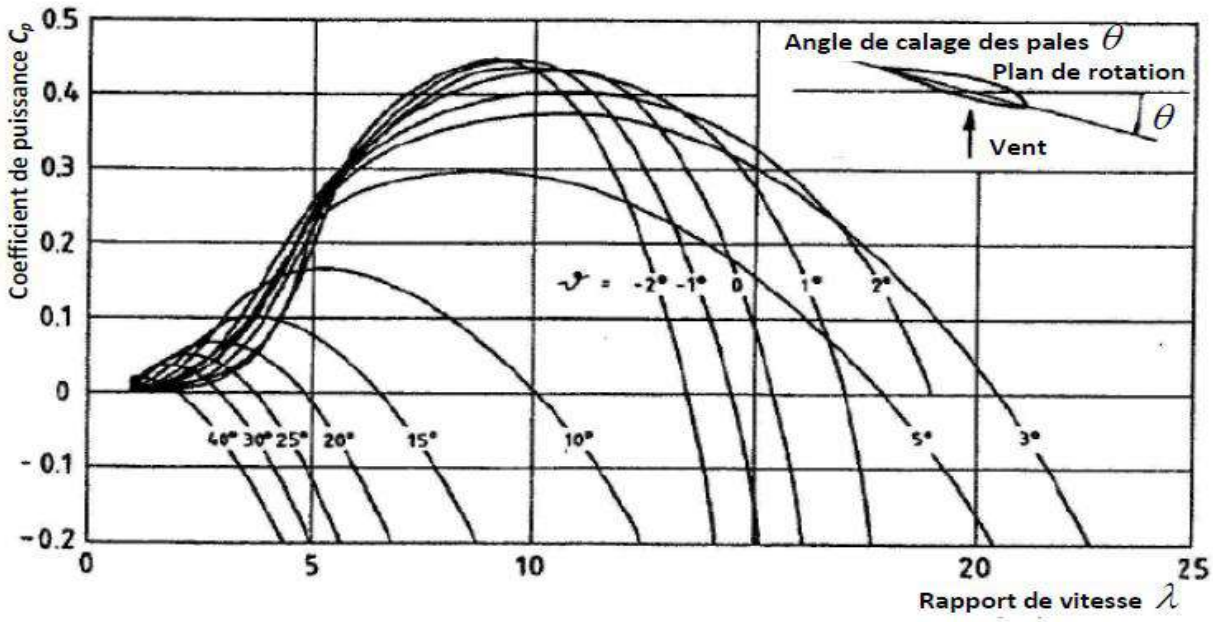


Fig I.12: Caractéristique d'une éolienne en fonction deλ pour différentes valeurs de β.

Le système « pitch » a pour avantage de permettre un contrôle actif de la puissance sous une large plage de vitesse du vent. L'angle de calage des pales peut être déterminé afin d'optimiser la conversion d'énergie quand le vent évolue entre V_{min} et V_n, le contrôle de l'angle de calage permet également de réguler la vitesse lorsque $V > V_n$ et le démarrage à vitesse du vent faible est facilité par le changement de l'angle de calage[18].

I .7.2 Le système « stall » :

Le système « stall » est beaucoup moins lourd et moins coûteux que le système décrit

Précédemment. En effet, c'est le profil des pales établi lors de la construction qui fixe les caractéristiques aérodynamiques. Les pales sont conçues avec un profil, qui permet d'obtenir une décroissance brusque de la portance à partir d'une vitesse donnée pour laquelle la puissance doit être diminuée.

Les éoliennes munies du système stall génèrent une puissance électrique variable dont la valeur maximale correspond à la puissance nominale de la machine. En dessous de cette valeur, la puissance fournie croît avec la vitesse du vent. Au-delà, la puissance fournie décroît avec la vitesse du vent figure (I.14) [18].

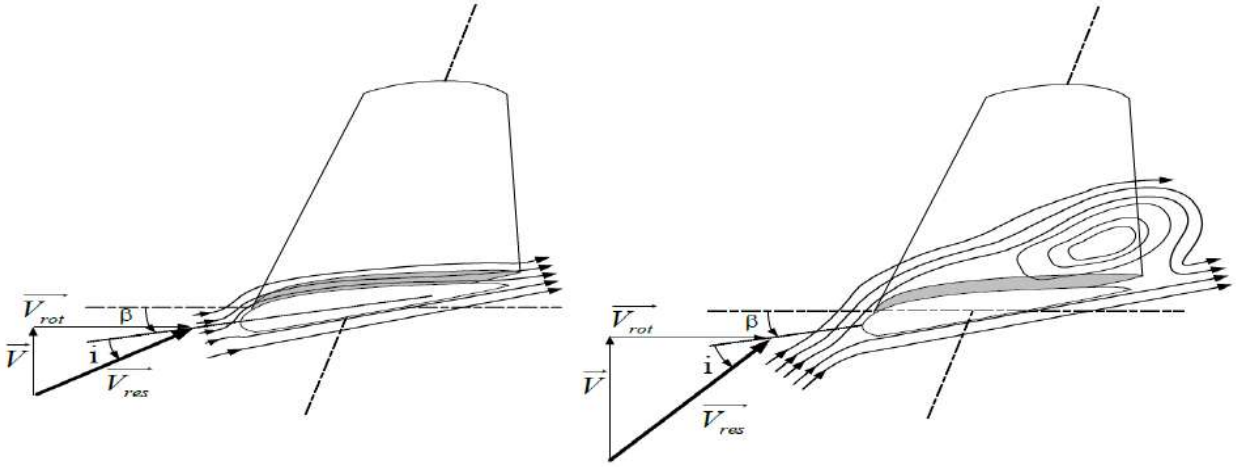


Fig I.13: Flux d'air sur un profil de pale " stall "

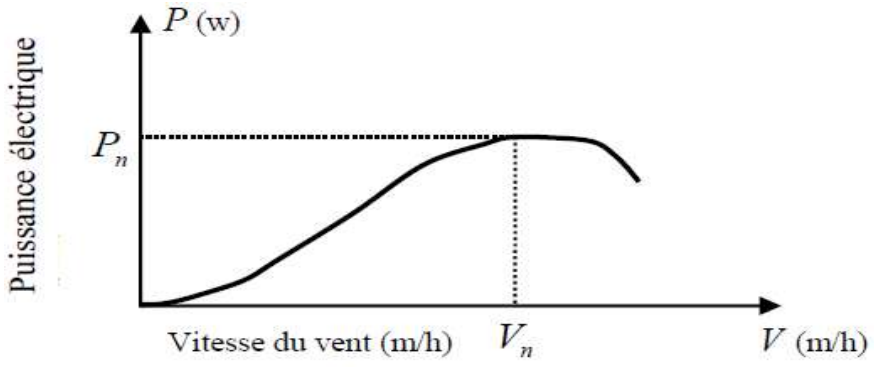


Fig I.14: Puissance fournie d'une éolienne en fonction de sa vitesse.

En comparaison avec le pitch, le « stall » a pour avantage l'absence de système de contrôle d'angle de calage. La construction est donc plus simple et moins coûteuse. Par contre la puissance active n'est pas contrôlable [18].

I .7.3 Production optimale d'énergie :

Dans un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal en exploitant les maximums du réseau de courbes de la figure (I.14). Ce qui signifie que pour un régime de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe), on souhaite que la puissance fournie soit maximale ce qui correspond à une valeur de λ donnée appelée λ_{opt} . La vitesse de rotation optimale Ω_{opt} résultante est alors donnée par :

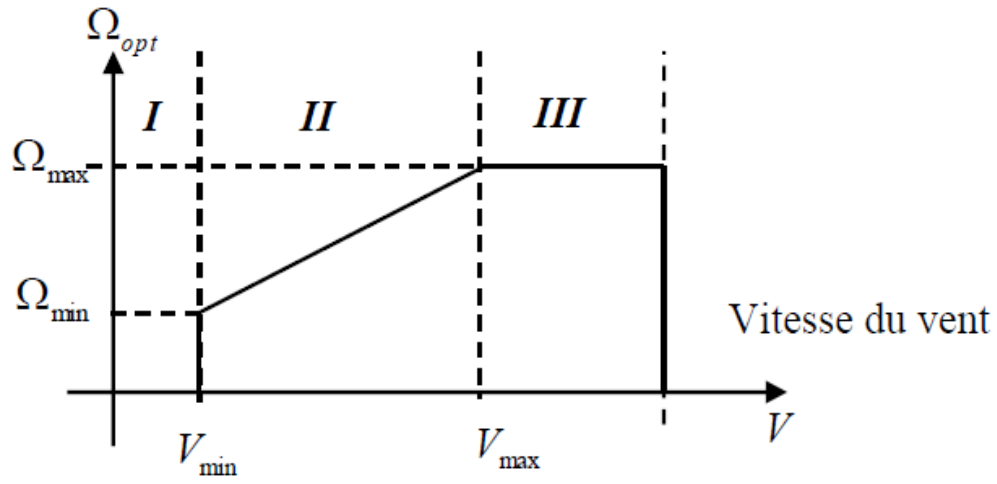


Fig I.15: Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable.

La génératrice fournit alors de l'énergie électrique à fréquence variable et il est nécessaire d'ajouter une interface d'électronique de puissance entre celle-ci et le réseau (Figure **I.16**) [13].

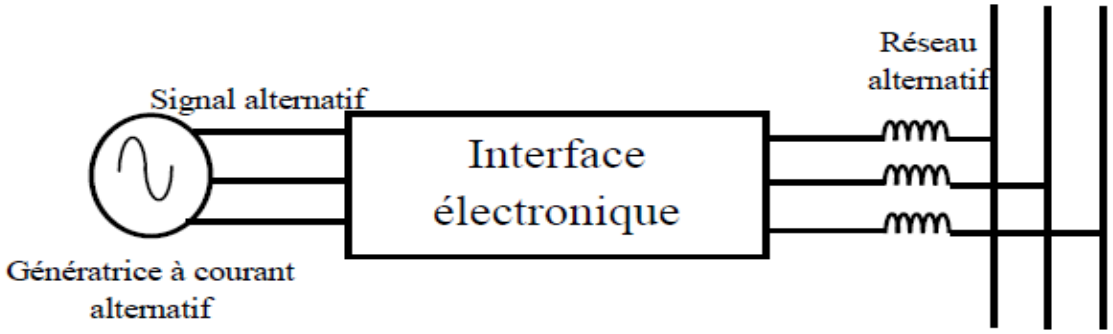


Fig I.16: bouclage de la génératrice au réseau.

I.8. GENERATEUR ELECTRIQUE

I .8.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone

I .8.1.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil

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

La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne[19].

La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la(Figure I.17).

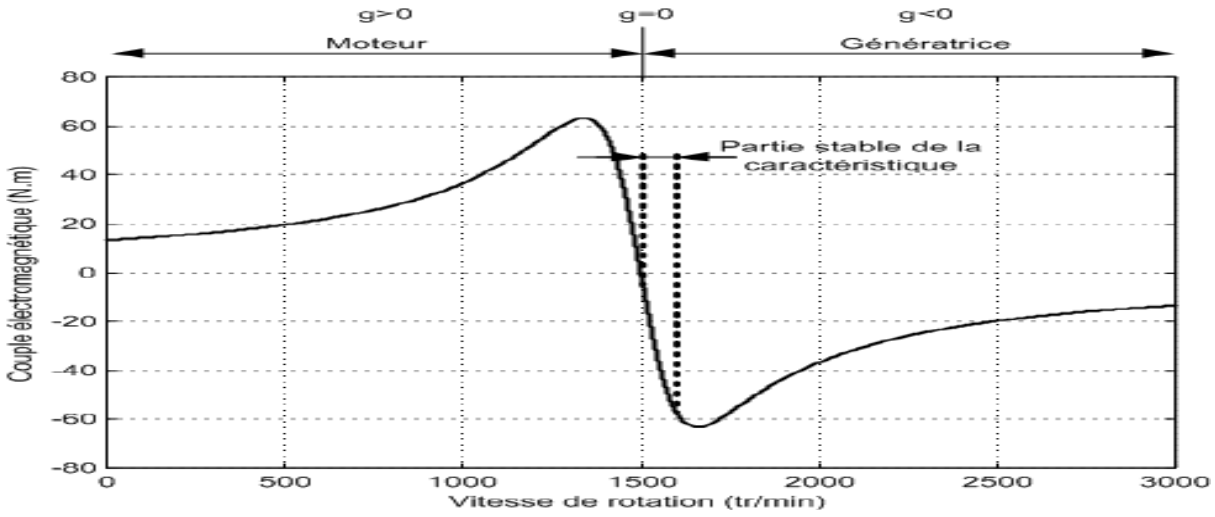


Fig .I.17: Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles.

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point g=0), dans le cas de la caractéristique ci dessus , la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 trs/min[10].

Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de

l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau (Figure I.18). La machine a un nombre de paire de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%).

La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs. La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine [13].

Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau. Celui-ci peut-être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la (Figure I.18).qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

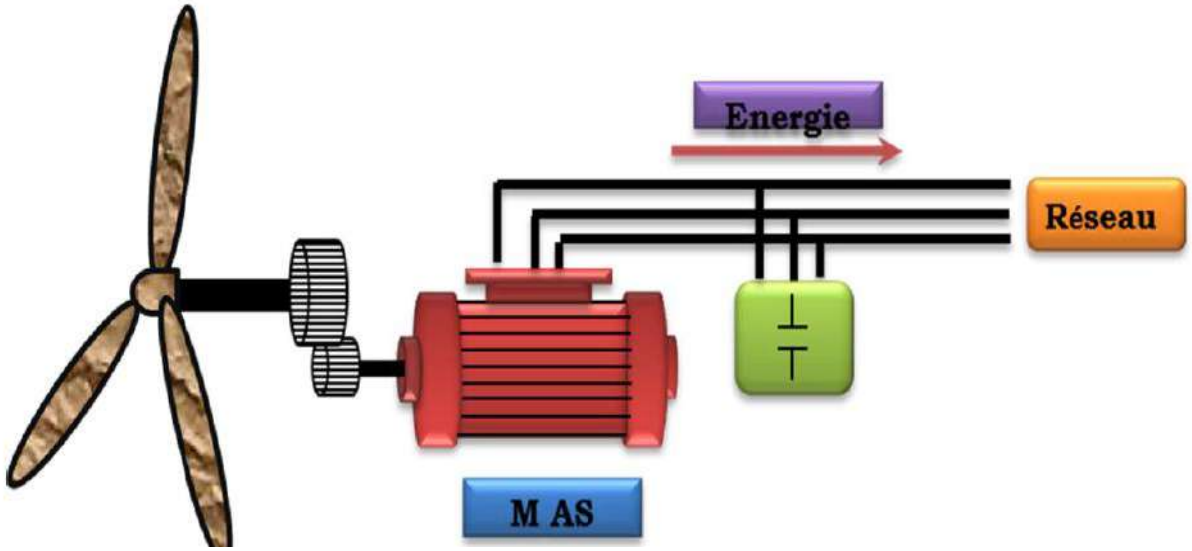


Fig .I.18: Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.

Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales, etil n'exploite pas la totalité de la puissance théoriquement disponible pour les vitesses de vent élevées. En effet le système est conçu pour fonctionner sur la partie gauche du réseau de là où celles-ci sont le plus rapprochées les unes des autres [15].

La machine est alors naturellement protégée contre les surcharges mais l'efficacité de l'éolienne est fortement réduite.

De plus les variations du couple mécanique sont fréquentes puisque le système d'orientation des pales est souvent en action pour pallier les variations de vitesse de vent. Ces variations de couple produisent de brusques variations du courant débité sur le réseau entraînant ainsi des perturbations [11].

I .8.1.2 Machine asynchrone à cage

Pour améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator (Figure I.19).

Un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent. Un stator de forte puissance à faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner aux vitesses de vent élevées.

Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents. Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les petites vitesses de vent car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées. La présence d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble [19].

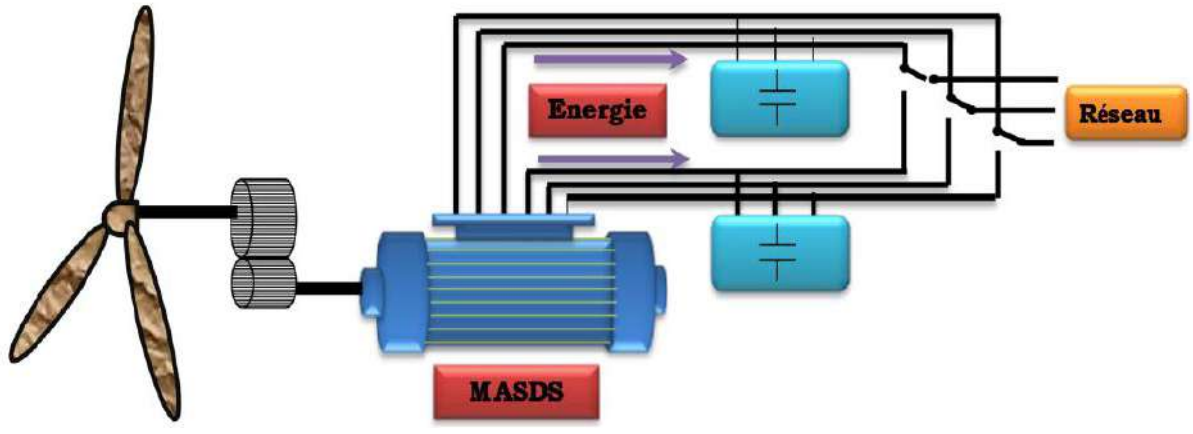


Fig .I.19: Machine asynchrone à double stator.

I.8.1.3 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance :

Le dispositif de base est représenté sur la (Figure I.20). Cette configuration autorise un fonctionnement à vitesse variable. En effet, quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension produite est redressée et transformée en tension continue.

Le fonctionnement de l'onduleur est alors classique et une commande adéquate permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire. La puissance nominale de la génératrice détermine alors la puissance maximale que peut fournir l'éolienne.

Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés pour la totalité de cette puissance échangée entre la machine et le réseau. Ils représentent donc un coût important, des pertes non négligeables (jusqu'à 3% de la puissance nominale de la machine) et entraînent des perturbations qui nuisent au rendement et à la qualité de l'énergie délivrée. De plus, la présence des capacités est indispensable pour fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine. Cette énergie ne peut pas être fournie par le réseau car le redresseur est unidirectionnel.

Il peut être éventuellement remplacé par un redresseur MLI à base d' IGBT dont la structure est semblable à celle de l'onduleur.

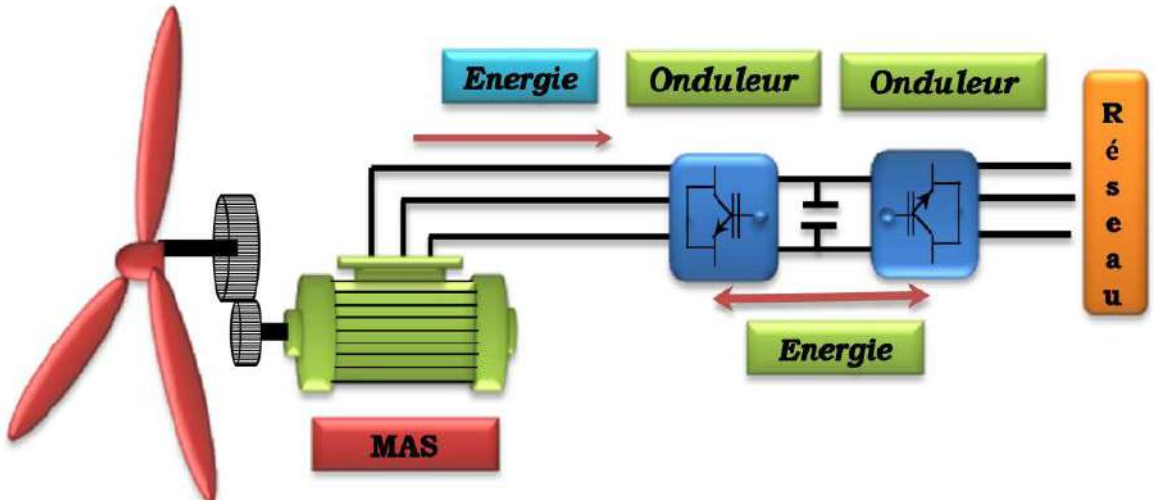


Fig .I.20:Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur

Dans ce cas, le transfert de puissance réactive est contrôlable et se fait du bus continu vers la machine et le transfert de puissance active est identique au cas du redresseur simple. Cette solution alourdit toutefois le dispositif en termes de coût et de complexité de mise en œuvre, de plus, les enroulements statoriques du moteur sont alors soumis à des dv/dt importants qui peuvent réduire leur durée de vie. L'ensemble de ces inconvénients n'ont pas permis un développement industriel important de ce dispositif [16].

I .8.1.4 Machine asynchrone à cage double stator type "brushless"

Cette machine a la particularité de posséder deux bobinages triphasés au stator. Un des bobinages est directement connecté au réseau et est destiné au transfert de puissance. Le second bobinage, dont la section des conducteurs est moins élevée, permet de faire varier les courants d'excitation de la machine [19].

Le rotor possède une structure spéciale différente de la cage d'écureuil classique mais tout aussi robuste :

Cette machine présente l'intérêt d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable à en revanche, le stator de forte puissance est connecté directement sur le réseau et le convertisseur est placé entre le stator de faible puissance et le réseau (Figure I.21) [03].

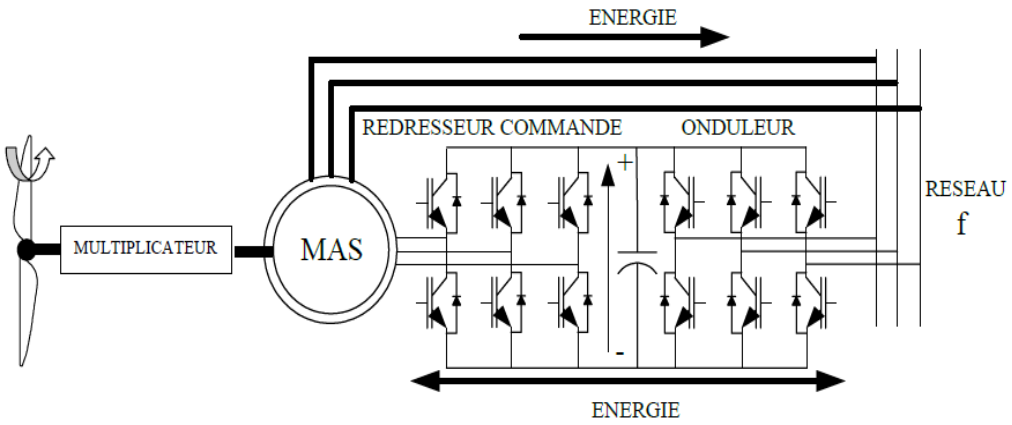


Fig I.21: Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau.

Dans ce cas, le convertisseur est dimensionné uniquement pour faire transiter la puissance destinée à la magnétisation de la machine et est donc moins coûteux que dans le cas.

La machine n'a pas de contacts glissants mais possède deux stators à nombre de paire de pôles différent ce qui augmente son diamètre et sa complexité de fabrication. En faisant

varier la puissance réactive absorbée, le convertisseur permet de contrôler le facteur de puissance et d'augmenter ou diminuer les courants rotoriques [08].

Le flux et le glissement de la machine sont alors modifiés. La machine peut ainsi délivrer une tension à fréquence fixe tout en ayant une vitesse de rotation variable. La taille du convertisseur est proportionnelle au glissement maximum, les études montrent que si le glissement dépasse 30%, le coût du convertisseur et la diminution du rendement due aux pertes dans le rotor qui rendent le système peu attractif. Ce systèmes n'est pas exploité industriellement mais existe à l'état de prototype [20].

I .8.1.5 Machine asynchrone à collecteur

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants dans un système éolien ,le stator de la MADA est généralement connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes décrits ci-dessous [09].

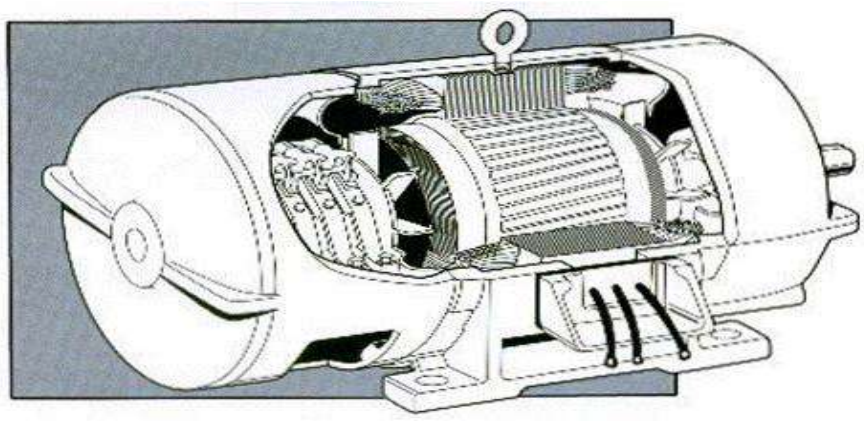


Fig .I.22: Machine asynchrone à rotor bobiné (document "Joliet Equipement")

I .8.1.5.1 Machine asynchrone à collecteur à énergie rotorique dissipée

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la (Figure I.23), le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO.

Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la

caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur [19].

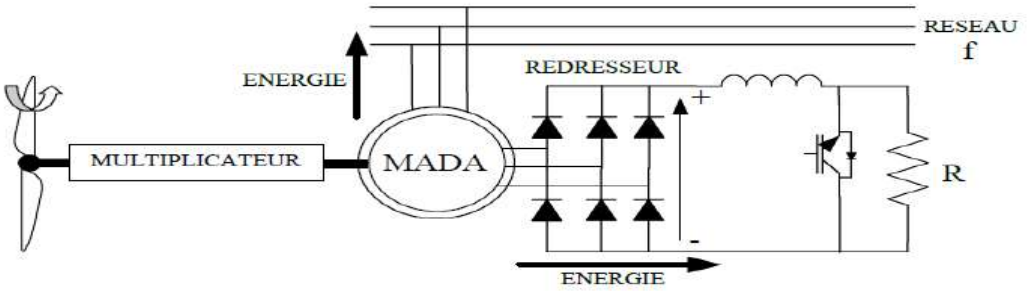


Fig .I.23: MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R, ce qui nuit au rendement du système. De plus cela augmente la puissance transitant dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance.

Le fabriquant "VESTAS" dans son dispositif "OPTI-SLIP" a mis en œuvre ce système en utilisant des composants qui tournent avec le rotor et une transmission optique des signaux de commande. Les contacts glissants sont ainsi évités. La variation maximale du glissement obtenue dans ce procédé est de 10% [07].

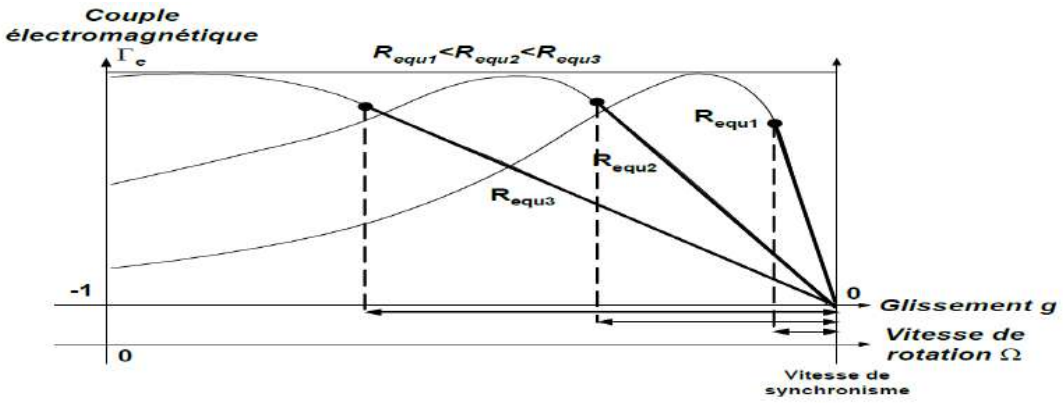


Fig .I.24: Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique

I .8.1.5.2 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau (structure de Kramer, Figure I.25) [19].

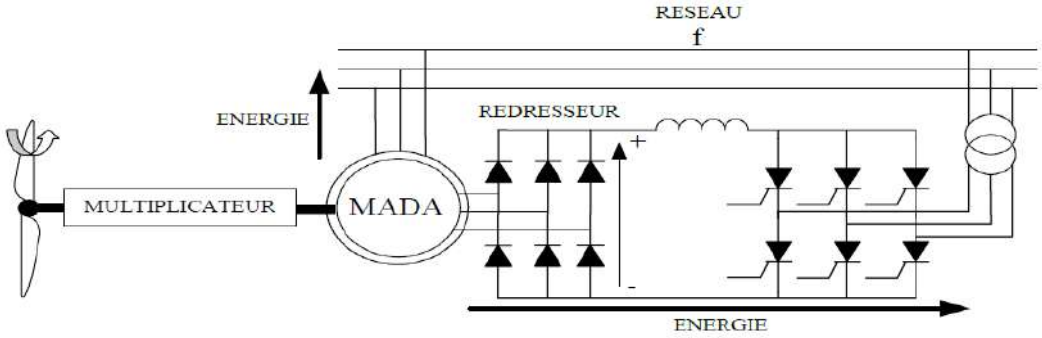


Fig .I.25: structure générale d'une générateur asynchrone à collecteur et à énergie rotorique récupérée (structure de kramere)

L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Comme dans le cas de la machine brushless présentée au paragraphe 8.1.4, ce système est avantageux s'il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%. L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau) donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de Scherbius avec convertisseurs à IGBT [08].

I .8.1.5.3 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur-onduleur peut être remplacée par un cyclo convertisseur (Figure I.26), l'ensemble est alors appelé structure de Scherbius [09].

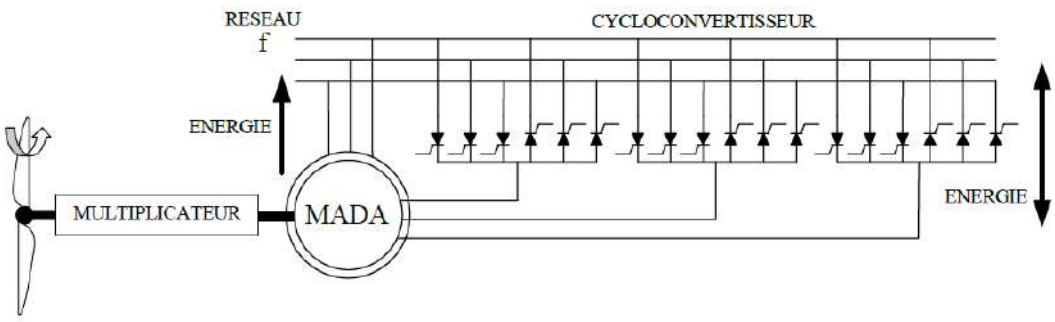


Fig .I.26: Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.

La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la Figure (I.25).En effet si la variation du glissement doit rester inférieure à 30% pour maintenir l'efficacité du système, cette variation peut être positive (fonctionnement hypo synchrone) ou négative (fonctionnement hyper synchrone) [08].

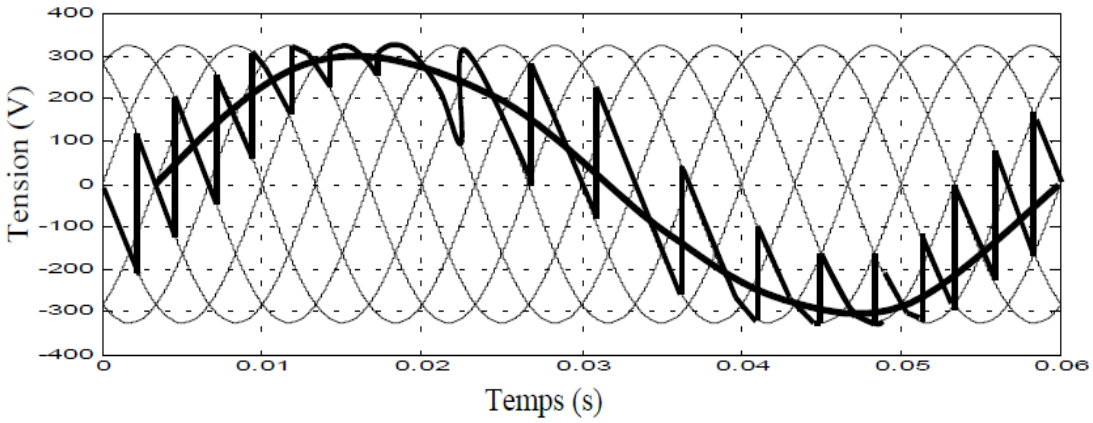


Fig .I.27: Principe de fonctionnement du cycloconvertisseur

Le principe du cycloconvertisseur est de prendre des fractions des tensions sinusoïdales du réseau afin de reproduire une onde de fréquence inférieure (Figure I.27). Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif. Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cyclonconvertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés en MLI [07].

I .8.1.5.4 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.

Cette configuration (Figure I.28) a les mêmes caractéristiques que la structure de Scherbius avec cycloconvertisseur. Toutefois les interrupteurs utilisés ici (transistors IGBT) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO.

L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsions dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées) [15].

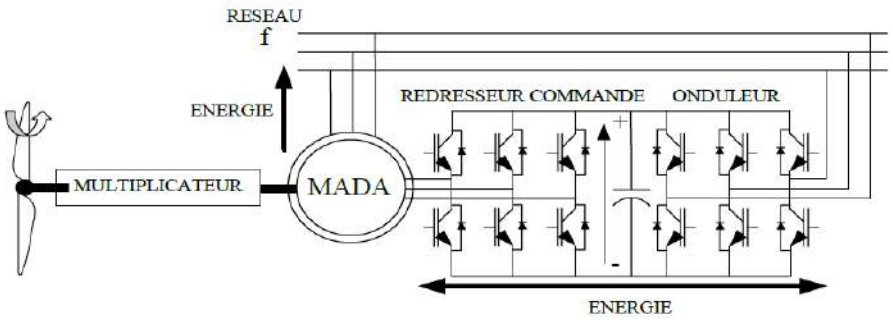


Fig .I.28: ***structure de Scherbius avec convertisseurs MLI***

La structure du dispositif et la philosophie de fonctionnement sont semblables à celle de la MADA de type "brushless". Toutefois, malgré la présence de contacts glissants qui doivent être entretenus et remplacés périodiquement, la conception de cette machine est plus conventionnelle et plus simple que la machine brushless (un seul bobinage au stator, un autre au rotor).

Plusieurs études récentes, confirmées par des réalisations industrielles, montrent la viabilité de ce dispositif dans un système éolien à vitesse variable.

La bi-direction alité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et Hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau.

Si le glissement reste inférieur à ± 30 % autour du synchronisme, le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représentent moins de 1% de cette puissance. De plus, le fonctionnement hype rsynchrone permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau.

La puissance totale ainsi produite peut alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire. La présence d'un convertisseur à MLI peut toutefois entraîner des dv/dt importants dans les enroulements rotoriques et faire circuler des courants de fréquences élevés dans ces mêmes enroulements[08].

I .8.2 SYSTEMES UTILISANT LA MACHINE SYNCHRONE

I .8.2.1 Alternateur synchrone à rotor bobiné ou à aimants

Dans une machine synchrone classique utilisée en alternateur, le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Ainsi, si l'alternateur est connecté au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous-multiple de la pulsation des courants statoriques [08].

L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion. Pour ces raisons, on place systématiquement une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau (Figure I.29) ce qui permet d'autoriser un fonctionnement a vitesse variable dans une large plage de variation [06].

Dans la plupart des cas, le champ tournant rotorique est créé par un bobinage alimenté en courant continu (roue polaire) par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau. Ce mode d'excitation entraîne la présence de contacts glissants au rotor, c'est pourquoi on remplace souvent ce bobinage par des aimants permanents. Toutefois certains d'entre eux sont réalisés à l'aide de terres rares et sont par conséquent très coûteux. De plus, les variations importantes de couples électromagnétiques qui peuvent avoir lieu dans un système éolien risquent d'entraîner une démagnétisation des aimants lorsqu'ils sont constitués de matériaux classiques. Ceci contribue largement à la diminution de leur durée de vie [13].

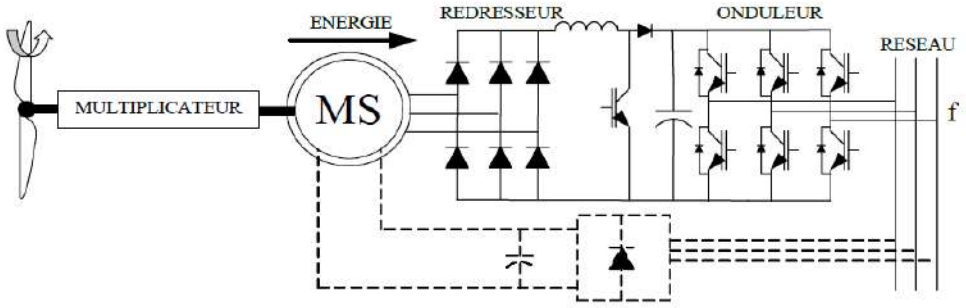


Fig .I.29: Machine synchrone reliée au réseau par un dispositif redresseur – hacheur – onduleur MLI

L'exemple de la (Figure I.29) présente une configuration classique d'interface de connexion d'une machine synchrone au réseau. Le convertisseur connecté au stator de la machine est un simple redresseur puisqu'elle n'absorbe pas de puissance réactive, ce qui permet d'éviter les dv/dt importants sur les enroulements statoriques. Ce redresseur est classiquement suivi d'un hacheur élévateur permettant de délivrer une tension suffisante à l'onduleur MLI pour les faibles vitesses de rotation. La présence de l'onduleur MLI permet de contrôler le facteur de puissance coté réseau [12].

Ces convertisseurs sont toutefois dimensionnés pour la totalité de la puissance nominale de la machine et entraînent jusqu'à 3% de cette puissance de pertes. Notons que l'utilisation de machines synchrones à faible vitesse (grand nombre de paire de pôles) permet de supprimer le multiplicateur de vitesse, pièce mécanique complexe entraînant des pertes et des pannes fréquentes mais l'augmentation du nombre de pôles implique une machine de très grand diamètre représentant un barrage important pour l'écoulement du vent[12].

I. 9. CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis de dresser un panel des solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. a' travers ce chapitre, Nous avons montré comment la puissance disponible dans le vent peut être transformée en énergie mécanique utile. Puis, dans un second temps.

Le principe d'extraction de la puissance maximale il est présenté a' vitesse variable qui prend tout son intérêt dans le cadre d'une éolienne fonctionnant a' vitesse variable. Ensuit, il est établi la structure générale d'un aérogénérateur moderne est établi [08].

Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, les différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement (calage variable ou décrochage aérodynamique) ont été décrits. La seconde partie du chapitre présente les machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien. Deux grandes familles de machines sont présentées : machines asynchrones et machine synchrones.

CHAPITRE. II

Modélisation de la MADA

II.1.**INTRODUCTION**

Grace à sa réversibilité de fonctionnement, la machine asynchrone constitue un outil très précieux dans le domaine de conversion d'énergie. Puis long temps, cette machine destine principalement moteur.

Alors qu'elle présente des performances très intéressantes lorsque elle opère en génératrice. Ces performances ont permis à la machine asynchrone et sortant à sa version dite machine asynchrone à double alimentation, d'être meilleur candidat pour travailler dans les installation de production des énergies renouvelables, que l'homme essaye à tout prix de les faire exploiter.

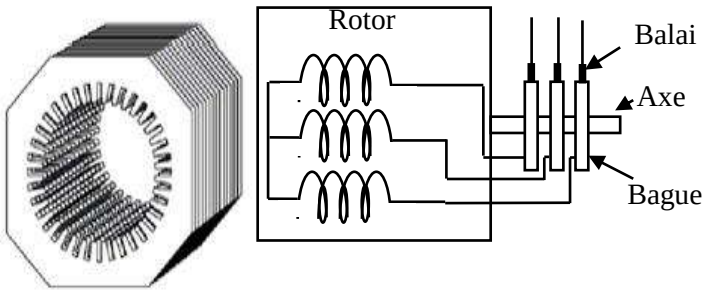
L'objectif de ce chapitre, est de traiter la modélisation et le principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) concernant son principe de fonctionnement, les différentes stratégies de commande et évaluer les performances apportées par cette machine. On présentera aussi sa modélisation dans le repère de Park avec ses deux alimentations, l'une alimente le stator avec un couplage direct au réseau et l'autre alimente le rotor à fréquences variables [08].

Nous présentons un modèle mathématique de la machine dos un le repère de PARK. Nous montrons l'influence des composantes de la tentions rotorique sur les puissances du réseau et le couple électromagnétique.

Enfin nous présentons le convertisseur qui assure la liaison du rotor avec le réseau.

II.2.STRUCTURE DE LA MACHINE

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



FigII.1 **:**Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

II.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA MADA

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Et du moment que le vecteur résultant de *fmms* des enroulements statoriques tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire,$w_s = 2.\pi.f_s$ et le rotor tourne avec la vitessew_r, on peut définir la vitesse du glissement w_{gl}telle que[08] :

$$g = \frac{\omega_{s-\omega_r}}{\omega_s} \qquad \text{(II.1)}$$

Où : g est le glissement.

Si la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme, les sens de rotation des deux vecteurs sont identiques, dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à la vitesse de synchronisme les sens seront opposés[05].

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

$$f_{\mathrm{r}} = g.f_s \qquad \text{(II.2)}$$

II.4 MODE DE FONCTIONNEMENT

Contrairement à la machine asynchrone classique, qui ne peut fonctionner en moteur qu'en dessous de sa vitesse de synchronisme et ne peut être en générateur qu'au dessus de cette vitesse.

Dans la MADA c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hypersynchronisme ou en hyposynchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. On a donc quatre modes opérationnels caractérisant de la machine[14].

II.4.1 Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone

Dans ce mode de fonctionnement le stator est connecté au réseau et la puissance de glissement transite par le rotor pour la réinjecter au réseau (Figure II-2). Est dissipée en pertes Joule dans le cas des machines asynchrones à cage. Le champ tournant crée par les enroulements rotoriques est dans le même sens que le champ statorique[15].

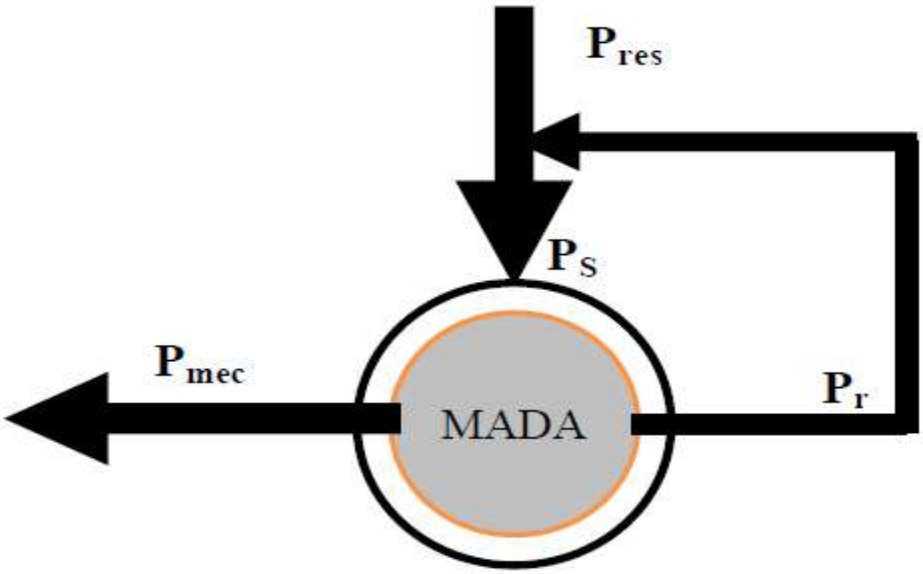


Fig.II.2 **:***Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone(g>0).*

II.4.2 Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone

Dans ce mode de fonctionnement le stator est alimenté par le réseau et la puissance de glissement est fournie par le réseau au rotor via le convertisseur statique afin de la convertir en puissance mécanique (FigureII.3). Le champ tournant induit par les enroulements

rotoriques est en opposition de phase avec celui du stator car la vitesse de vient plus grande que la vitesse de synchronisme[17].

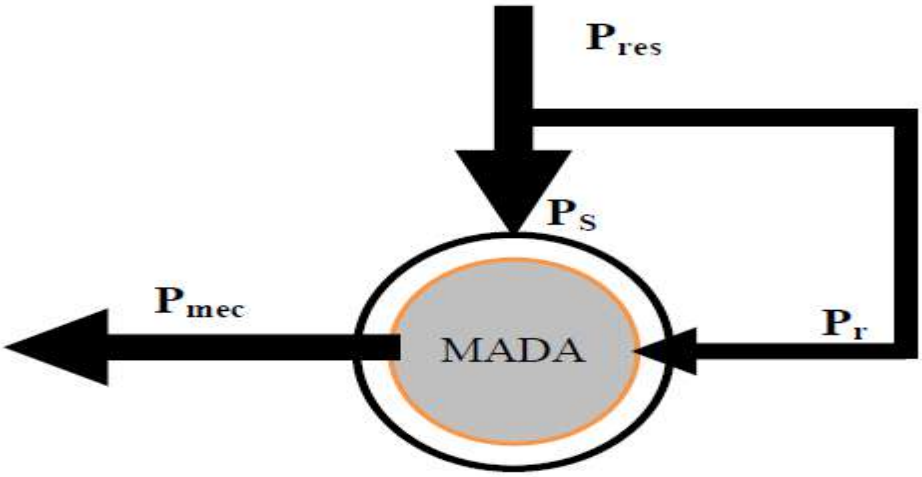


Fig.II.3 **:***Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone(g<0)*

II.4.3 Fonctionnement en mode génératrice hyposynchrone

Dans ce mode de fonctionnement, la machine reçoit une puissance rotorique en plus de la puissance mécanique, afin de fournir une puissance statorique aux réseaux (Figure II.4) comme et la puissance de glissement est aussi fournie par le stator (Figure II.4). La machine asynchrone classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement[09].

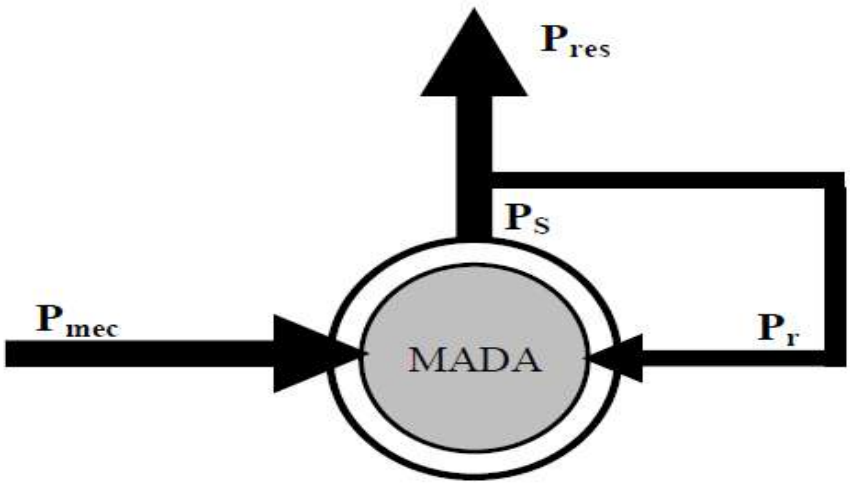


Fig.II.4 **:***Fonctionnement en mode génératrice hyposynchrone(g>0).*

II.4.4 Fonctionnement en mode génératrice hypersynchrone

Dans ce mode de fonctionnement la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près, comme le montre la Figure(II.5) la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est réinjectée par le rotor[14].

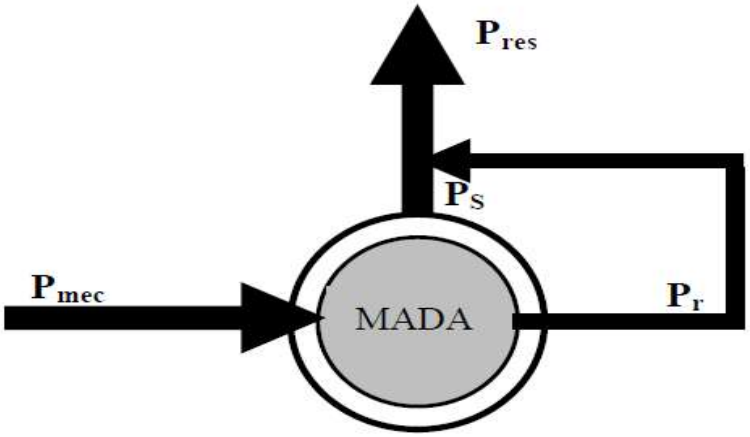


Fig.II.5 **:***Fonctionnement en mode génératrice hypersynchrone.*

II.5 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA MADA

La machine asynchrone à double alimentation est couramment appelée machine généralisée. Sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue soit à une machine asynchrone classique en court-circuitant les enroulements rotoriques, soit à une machine synchrone à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de :"machine synchrone à excitation alternative"[19].

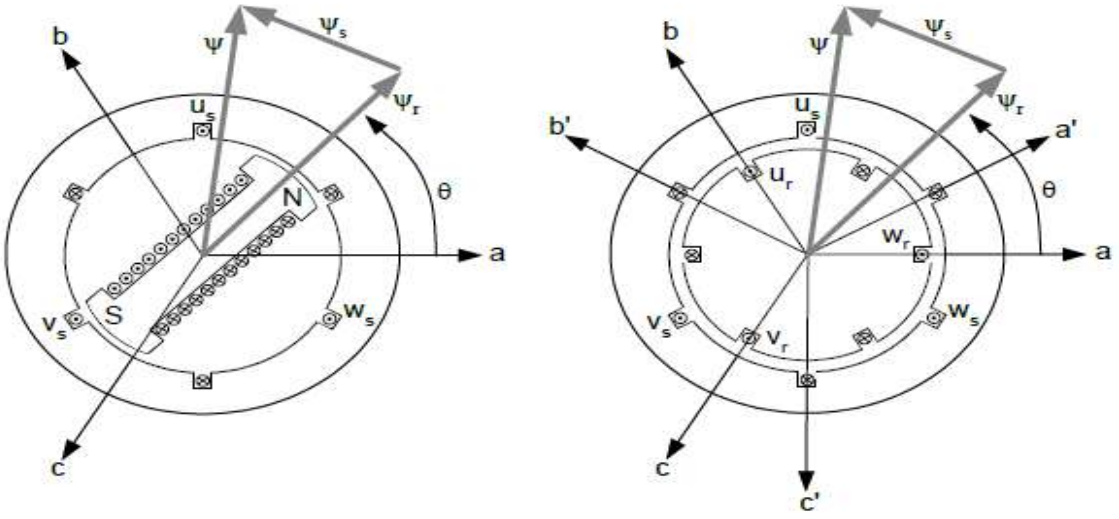


Fig.II.6:*Enroulements et les flux dans une machine synchrone et dans une MADA.*

Le vecteur flux (Figure II.6) présent dans l'entrefer de la machine représente la résultante des flux créés par les bobines statoriques et du flux rotorique soit par la rotation de la roue polaire alimentée en continu (MS). Le remplacement de la roue polaire par le circuit triphasé alimenté en alternatif permet d'avoir un vecteur du flux rotorique quia une amplitude et une phase totalement contrôlable par l'alimentation du circuit. Ainsi, la dynamique du flux dépend uniquement de la constante du temps électrique du système.

Dans ce contexte, il est clair que la machine asynchrone à double alimentation réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone en plus les avantages envisagés grâce à sa double alimentation. D'autre part, comme toutes les autres machines électriques, la MADA a des inconvénients qu'on va les citer ci-dessous[14].

II.5.1 Avantages de la MADA

L'accès au rotor offre la possibilité de contrôler les grandeurs électriques du rotor(courant et tension), ce qui donne une grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.

La possibilité de fonctionner à couple constant au delà de la vitesse de synchronisme(Figure II.7).

La configuration dont les deux convertisseurs alimentant la machine permettent de fonctionner en régime dégradé (l'un des deux onduleurs tombe en panne).

En fonctionnement moteur, la solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge.

La double alimentation permet de réduire les dimensions des convertisseurs statiques, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement. Transfert bidirectionnel de la puissance rotorique.

Le fonctionnement en hypo ou hypersynchone offre une large plage de variation de la vitesse[13].

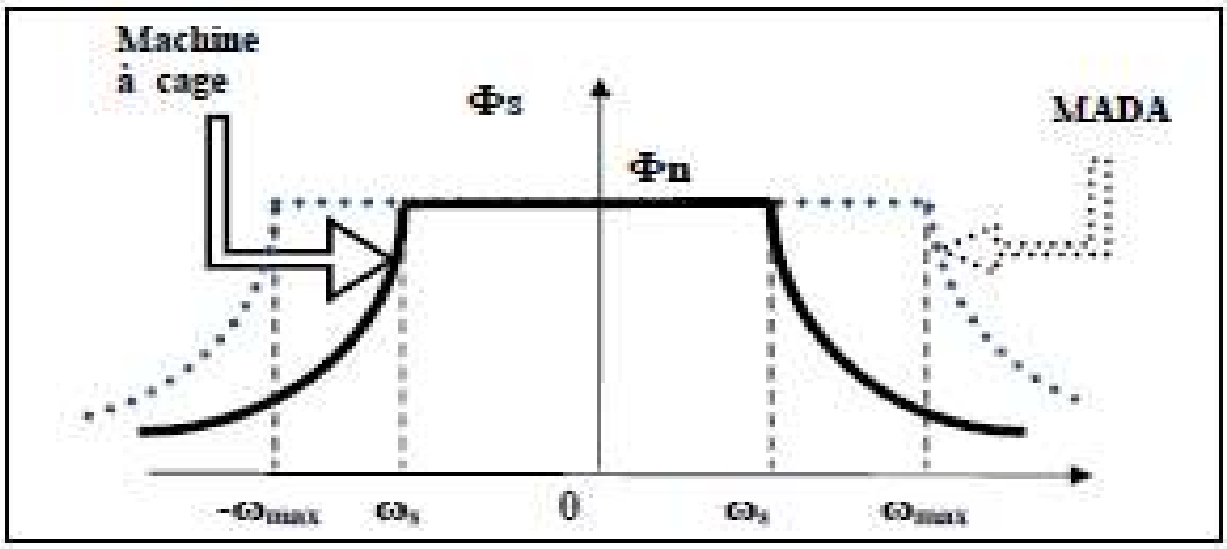


Fig.II.7:*Comparaison de zone de fonctionnement en survitesse entre la machine à cage et la MADA .*

II.5.2 Inconvénients de la MADA

Machine plus volumineuse que celle de la machine asynchrone classique, généralement elle est plus longue à cause du collecteur.

Utilisation d'un nombre de convertisseurs statiques plus que celle de la machine classique ;

Le coût total de la machine est plus important par rapport aux autres machines électriques[06].

II.6 MODELISATION DE LA MACHINE A DOUBLE ALIMENTATION

La machine asynchrone est représentée sur la figure (II.8) par ces six enroulements dans l'espace électrique. L'angle θ repère le décalage de l'axe de la phase rotorique (*OAR*) par rapport à l'axe fixe de la phase statorique (*OAS*)[07].

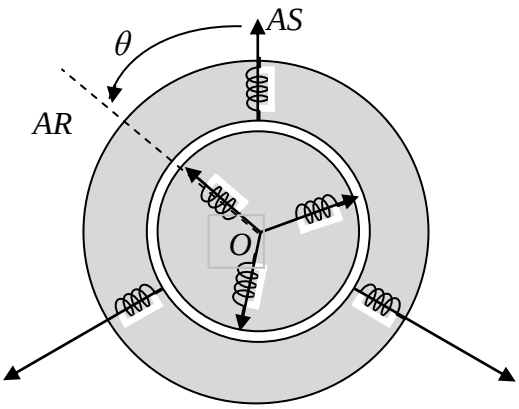


Fig.II.8**:**Représentation schématique du modèle d'une MADA-à rotor bobiné

II.6.1 Hypothèses simplificatrices :

Pour cette mise en équation, nous supposons que le bobinage est reparti de manière à donner une fmm. sinusoïdale s'il est alimenté par des courants sinusoïdaux. Nous supposerons également que nous travaillons en régime non saturé. Nous négligeons le phénomène d'hystérésis, les courants de Foucault et effet de peau. Enfin, le régime homopolaire est nul puisque le neutre n'est pas relié[07].

II.6.2 Modèle de la MADA dans le repère abc

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

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \dfrac{d}{dt}[\phi_s] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \dfrac{d}{dt}[\Phi_r] \end{cases} \quad \text{(II.3)}$$

Avec :

$$\text{Grandeurs statoriques : } \begin{cases} [V_S] = [V_{as} \quad V_{bs} \quad V_{cs}]^T \\ [I_S] = [I_{as} \quad I_{bs} \quad I_{cs}]^T \\ [\Phi_S] = [\Phi_{as} \quad \Phi_{bs} \quad \Phi_{cs}]^T \end{cases}, \tag{II.4}$$

$$\text{Grandeurs rotoriques : } \begin{cases} [V_r] = [V_{ar} \quad V_{br} \quad V_{cr}]^T \\ [I_r] = [I_{ar} \quad I_{br} \quad I_{cr}]^T \\ [\Phi_r] = [\Phi_{ar} \quad \Phi_{br} \quad \Phi_{cr}]^T \end{cases}, \tag{II.5}$$

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

$$\begin{cases} [\Phi_S] = [L_S].[I_S] + [M_{ss}].[I_S] + [M_{sr}].[I_r] \\ [\Phi_r] = [L_r].[I_r] + [M_{rr}].[I_r] + [M_{rs}].[I_S] \end{cases} \tag{II.6}$$

Où :

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

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

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

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

Avec :

$$\begin{cases} [R_s] = R_s.[I]_{3\times3} \\ [R_r] = R_r.[I]_{3\times3} \end{cases} \tag{II.7}$$

$$\begin{cases} [L_s] = L_s.[I]_{3\times3} \\ [L_r] = L_r.[I]_{3\times3} \end{cases} \tag{II.8}$$

I: matrice de dentier

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

(II.9)

(II.10)

$$[M_{rr}] = M_{rr}..\begin{bmatrix} 0 & \cos(2.\pi/3) & \cos(2.\pi/3) \\ \cos(2.\pi/3) & 0 & \cos(2.\pi/3) \\ \cos(2.\pi/3) & \cos(2.\pi/3) & 0 \end{bmatrix} \quad \text{(II.10)}$$

$$[M_{sr}] = M.\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2.\pi/3) & \cos(\theta - 4.\pi/3) \\ \cos(\theta - 4.\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta - 2.\pi/3) \\ \cos(\theta - 2.\pi/3) & \cos(\theta - 4.\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad \text{(II.11)}$$

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^T \quad \text{(II.12)}$$

Avec :

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

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

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

$$W_{mag} = \frac{1}{2}\left([I_s]^T[\phi_s] + [I_r]^T[\phi_r]\right) \quad \text{(II.13)}$$

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

$$C_e = \frac{\partial W_{mag}}{\partial \theta_{geom}} = n_p \cdot \frac{\partial W_{mag}}{\partial \theta_{elect}} \quad \text{(II.14)}$$

On peut déduire :

$$C_e = \frac{P}{2}[I_s]^T\left(\frac{d[M_{sr}]}{d\theta_{elect}}\right)[I_r] \quad \text{(II.15)}$$

L'équation mécanique est donnée par :

$$J_m \frac{d\Omega r}{dt} + f_m \cdot \Omega_r = C_{em} - C_r \quad \text{(II.16)}$$

Où :

$$\Omega_r = \frac{\omega_r}{P} \quad \text{(II.17)}$$

Avec :

J_m moment d'inertie de la machine.

C_{em} couple électromagnétique.

C_r couple résistant.

f_m coefficient de frottement de la machine.

Nous constatons la complexité des équations électriques et l'équation mécanique de la machine asynchrone qui ne peuvent être facilement exploitées à cause des dimensions des matrices entrant dans les calculs et de la dépendance de la matrice inductance vis à vis de la position de l'axe rotorique par rapport à l'axe statorique, qui est variable dans le temps[07].

II.6.3 Changement de repère :

Le but d'un changement de repère est de rendre l'écriture des équations de la machine plus simple à exploiter. Dans notre étude nous avons utilisé la transformation de Park[14].

II.6.3.1 La transformation de Park :

Afin de rechercher les lois de contrôle d'une machine à courant alternatif, nous pouvons la modéliser dans un repère (d, q) tournant dont l'orientation est à priori arbitraire. Ce modèle est obtenu après transformation virtuelle de la machine triphasée en une machine diphasée équivalente. Cette transformation qui permet le passage du système triphasé au

système biphasé s'effectue en faisant correspondre aux variables réelles leurs composantes homopolaires, directes et en quadrature, figure (II.9)[12].

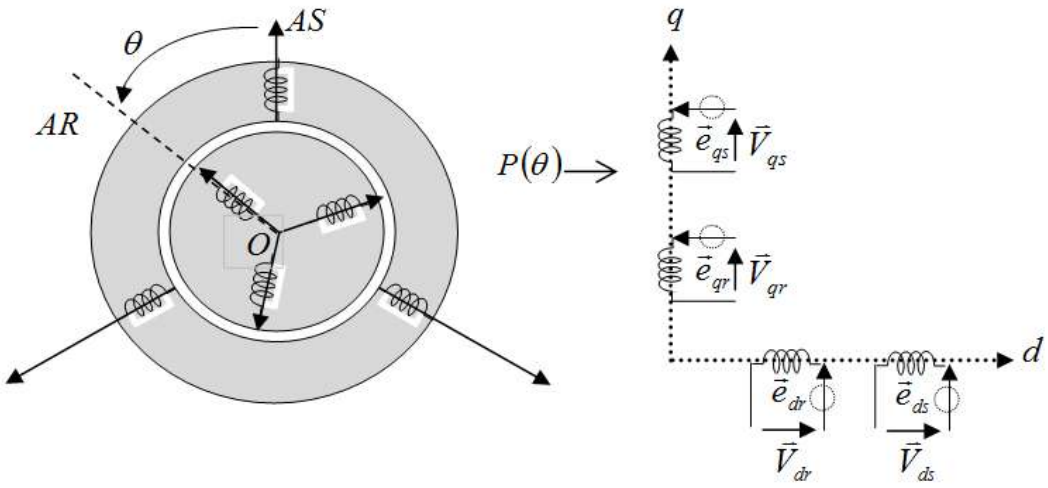


Fig.II.9**:**Représentation de la MADA dans le repère de Park

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

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

Le changement de variables relatifs aux courants, tensions et flux est défini par la transformation (II.16) :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} = [P(\theta)] \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad \text{(II.19)}$$

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

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

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

$$[P(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad \text{(II.20)}$$

Alors les variables réelles sont obtenues à partir des variables biphasées

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} \quad \text{(II.21)}$$

II.6.3.2 Equations électriques et magnétiques dans le système d'axes *(d, q)*

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

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \dfrac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_{coor}\Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \dfrac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_{coor}\Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \dfrac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_{coor} - \omega_r)\Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \dfrac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_{coor} - \omega_r)\Phi_{dr} \end{cases} \quad \text{(II.22)}$$

Avec :

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

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

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad \text{(II.23)}$$

II.6.4 Choix du référentiel

Pour étudier les régimes transitoires des machines électriques, il est recommandé de choisir un système d'axes de référence qui permet d'aboutir au système différentiel le plus simple possible, car le résultat final est indépendant du choix du système de coordonnées. On trouve que le calcul peut être plus ou moins complexe. A partir du système d'axe (*d, q*) on peut avoir d'autres axes qui sont des cas particuliers. Dans la suite, les composantes homopolaires sont supposées nulles [15]:

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

Cette dernière représentation qui fait correspondre des grandeurs continues aux grandeurs sinusoïdales en régime permanent, la conception du contrôle vectoriel par orientation du flux nécessite ce choix et les modèles d'action dépendent de la position du référentiel par rapport aux divers axes de flux[10].

II.6.5 Modèle biphasé de la MADA lié au champ tournant

On exprime les tensions par :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s.I_{ds} + \dfrac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s.\phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s.I_{qs} + \dfrac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s.\phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r.I_{dr} + \dfrac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \mathrm{P}\Omega)\phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r.I_{qr} + \dfrac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r)\phi_{dr} \end{cases} \quad \text{(II.24)}$$

II.6.6 Equation du couple électromagnétique

Pour étudier les phénomènes transitoires (démarrage, freinage, variation de la charge) avec une vitesse rotorique variable, il faut ajouter l'équation du mouvement (II. 14) au système d'équations différentielles modélisant la machine. La forme générale du couple électromagnétique d'une machine asynchrone triphasée modélisée dans le repère de Park est donnée par la relation suivante[09]:

$$C_{em} = P(\phi_{ds}\mathrm{i_{qs}} - \phi_{qs} i_{ds}) \quad \text{(II. 25)}$$

II. 6.7 Mise sous forme d'équation d'état

Les équations (II.20) peuvent être disposées sous la forme de représentation d'état. On choisit pour vecteur d'état $x = \lfloor \phi_{ds}, \phi_{qs}, I_{dr}, I_{qr} \rfloor$, on trouve les équations d'état sous forme matricielle

II. 6.8 Mise sous forme d'équation d'état

Les équations (II.20) peuvent être disposées sous la forme de représentation d'état. On choisit pour vecteur d'état $x = \lfloor \phi_{ds}, \phi_{qs}, I_{dr}, I_{qr} \rfloor$, on trouve les équations d'état sous forme matricielle.

Les équations (II.20) peuvent être disposées sous la forme de représentation d'état. On choisit pour vecteur d'état $x = \lfloor \phi_{ds}, \phi_{qs}, I_{dr}, I_{qr} \rfloor$, on trouve les équations d'état sous forme matricielle [07]:

$$\begin{cases} \dfrac{dx}{dt} = A.x + B.U \\ y = C.x \end{cases} \tag{II.26}$$

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

$$A = \begin{bmatrix} \dfrac{-R_s}{L_s} & \omega_s & \dfrac{R_s.M}{L_s} & 0 \\ -\omega_s & \dfrac{-R_s}{L_s} & 0 & \dfrac{R_s.M}{L_s} \\ 0 & \dfrac{M}{L_s}(\omega_s - \omega_r) & -R_r & \sigma.(\omega_s - \omega_r) \\ -\dfrac{M}{L_s}(\omega_s - \omega_r) & 0 & -\sigma(\omega_s - \omega_r) & -R_r \end{bmatrix} \text{ et } L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \dfrac{M}{L_s} & 0 & \sigma & 0 \\ 0 & \dfrac{M}{L_s} & 0 & \sigma \end{bmatrix} \tag{II.27}$$

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

II.7.CARACTERISTIQUE DE COUPLE

Nous remarquons que si la composante *vqr* augmente (en gardant *vdr* nulle), au sens positif, le couple augmente aussi mais au sens négatif et vis-vers-ça. Cette augmentation est plus importante pour des points de fonctionnement à glissement faible.

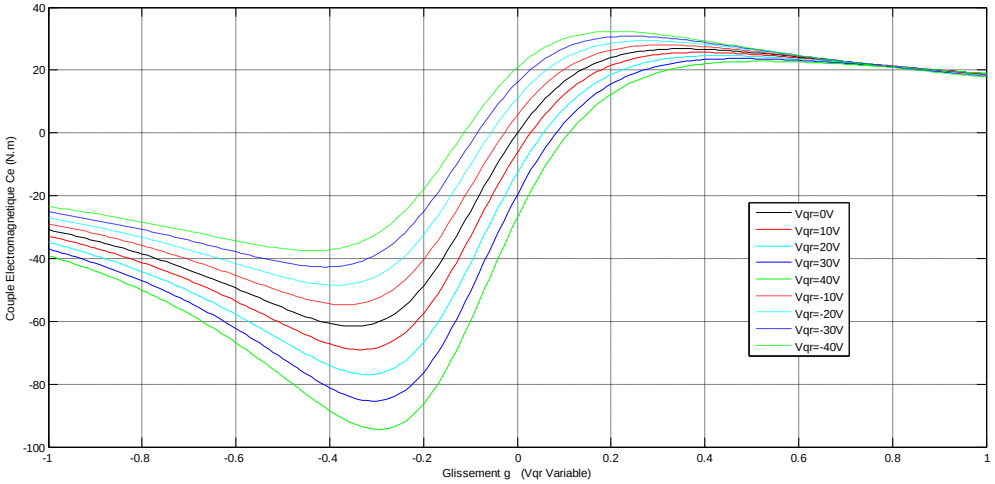


Fig.II.10 : Caractéristiques du couple à $v_{dr} = 0$ et v_{qr} variable

Au voisinage du fonctionnement nominal, l'augmentation de vdr dans les deux sens (en gardant vqr nulle), le couple augmente légèrement pour les deux modes de fonctionnement (figure II.11). Cette augmentation est plus faible pour des points de fonctionnement à glissement faible.

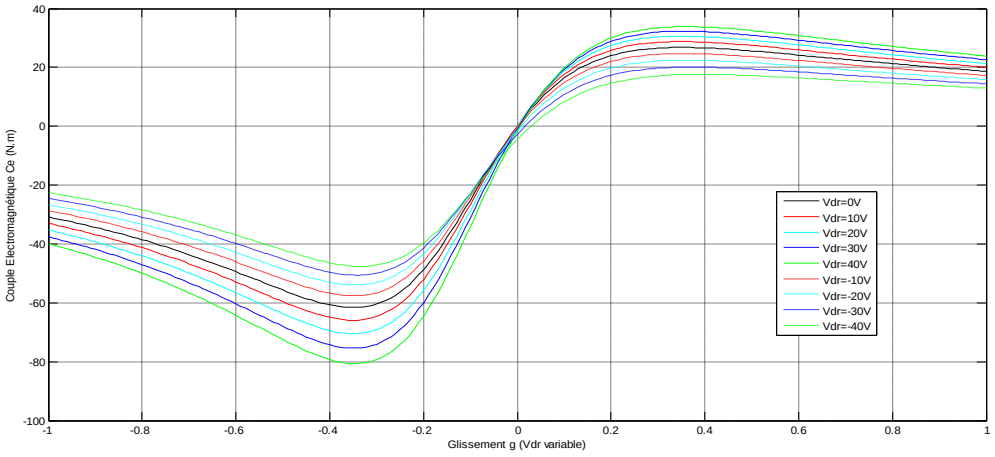


Fig.II.11 : Caractéristiques du couple à vqr = 0 et vdr variable

II.8.SIMULATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION

A l'aide du logiciel MATLAB/simulink, la simulation de la machine asynchrone à double alimentation pour les deux types de fonctionnement moteur et générateur a été faite.

Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park (repère (d, q)) lié au champ tournant. Les résultats montrés sur les figures ci-dessous.

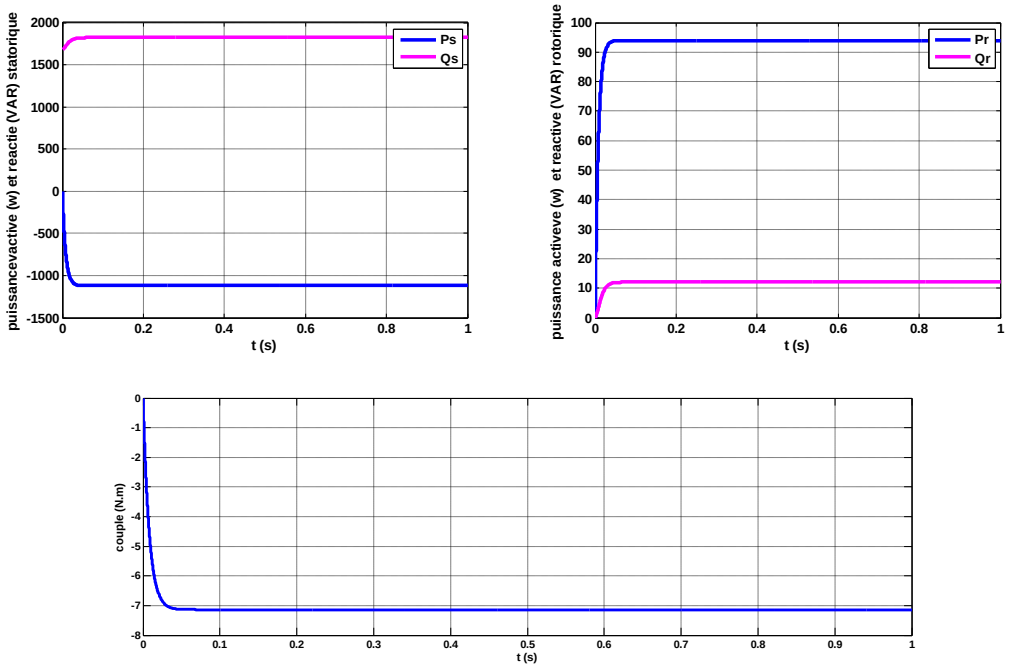


Fig.II.12:Caractéristiques de la GADA pourv_{qs}= -380, $v_{dr} = 0$, $v_{qr} = -30V$ et g=0.05

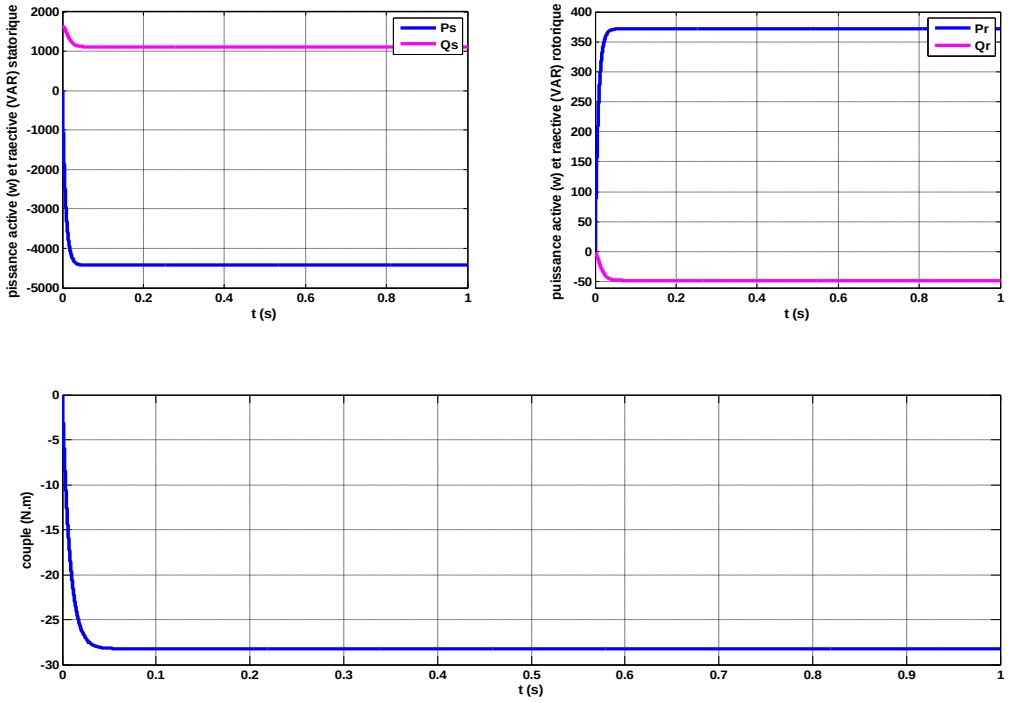


Fig.II.13 **:**Caractéristiques de la GADA pour v_{qs}= -380, $v_{dr} = 0$, $v_{qr} = -30V$ et g=-0.05

II.9. MODELISATION DE L'ALIMENTATION DE LA MADA

Le rotor de la MADA est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux équipé avec des dispositifs semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. Pour facilité la modélisation du convertisseur de puissance, on suppose que les interrupteurs semi conducteurs sont parfait[19].

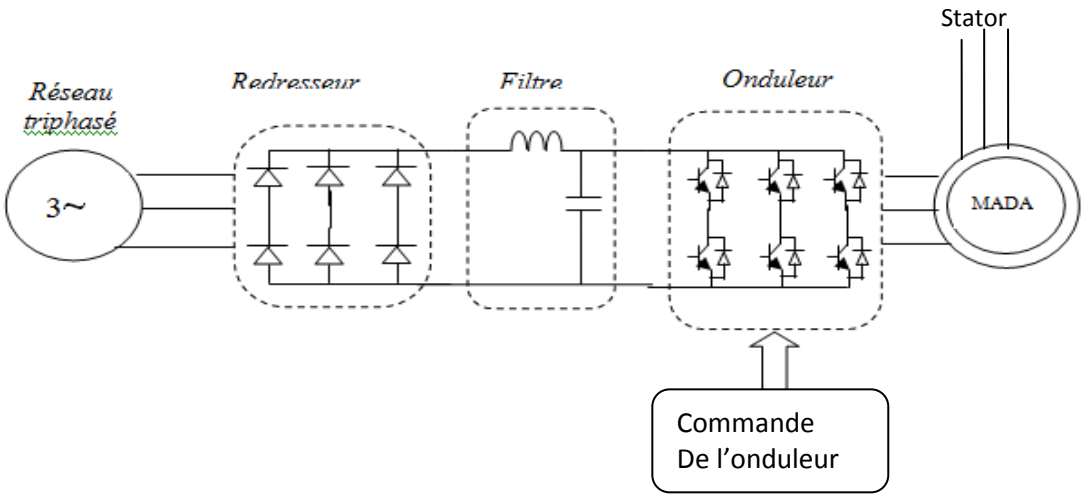


Fig.II.14 : Schéma du convertisseur statique

II.9.1 .Modélisation du redresseur

Le redresseur est un convertisseur « alternatif / continu ». Une conversion d'énergie électrique permet de disposer d'une source de courant continu à partir d'une source alternative[03].

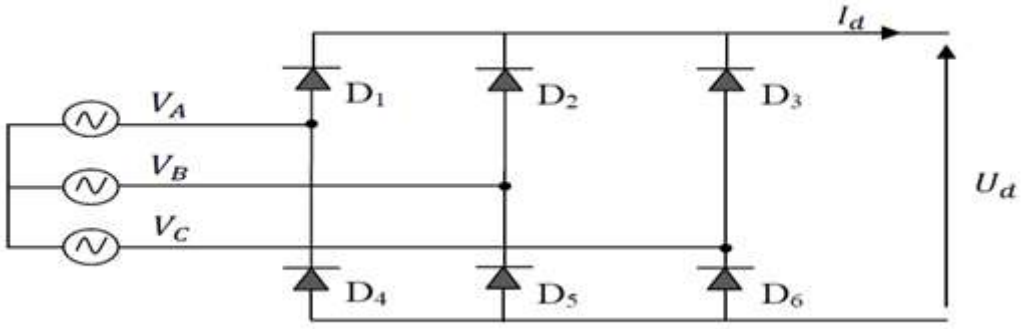


Fig.II.15 : Schéma du redresseur triphasé à diodes

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

$$\begin{cases} U_a(t) = V_{max}\, sin(2\pi ft) \\ U_b(t) = V_{max}\, sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) \\ U_c(t) = V_{max}\, sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad \text{(II-28)}$$

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

$$U_d(t) = Max[U_a(t), U_b(t), U_c(t)] - Min[U_a(t), U_b(t), U_c(t)] \quad \text{(II-29)}$$

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

II.9.2 Modélisation du filtre

Le filtre est constitué par une inductance L_{ft} et une capacité C_{ft} comme il est représenté à la figure (II.16).

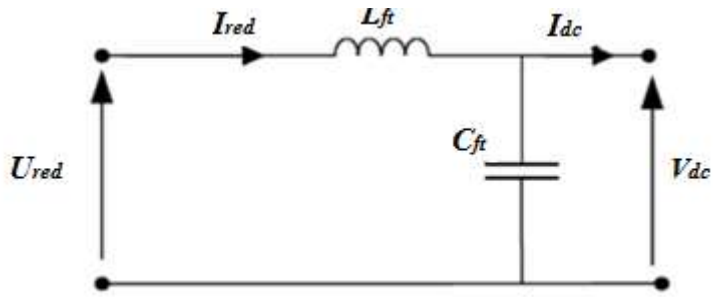


Fig.II.16 : Représentation d'un filtre

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

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_{red} = \frac{1}{L_{ft}} (U_{red} - V_{dc}) \\ \frac{d}{dt} V_{dc} = \frac{1}{C_{ft}} i_c = \frac{1}{C_{ft}} (i_{red} - i_{dc}) \end{cases} \quad \text{(II-30)}$$

La fonction de transfert du filtre est donnée par :

$$F(s) = \frac{V_{dc}(s)}{U_{red}(s)} = \frac{1}{1+\left(\sqrt{L_{ft}C_{ft}}s\right)^2} \quad \text{(II-31)}$$

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

$$f_c = \frac{1}{\sqrt{L_{ft}C_{ft}}} \quad \text{(II-32)}$$

II.10. MODELISATION DE L'ONDULEUR DE TENSION

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué de cellules de commutation généralement à transistor ou à thyristor GTO pour les grandes puissances. Le principe de fonctionnement s'exprime par la séquence imposé aux interrupteurs statique qui réalisent la modulation de largeur des impulsions des tensions appliquées aux enroulements statoriques de la machine[14].

Les trois cellules de commutation formant un onduleur triphasé sont bidirectionnelles en courant. Dans l'hypothèse de la conduction continue, on montre que chaque groupe transistor diode, assemblés en parallèle, forme un interrupteur (demi-bras) commandé à l'ouverture et à la fermeture. Pour modéliser l'onduleur de tension, on considère son alimentation comme une source parfaite.

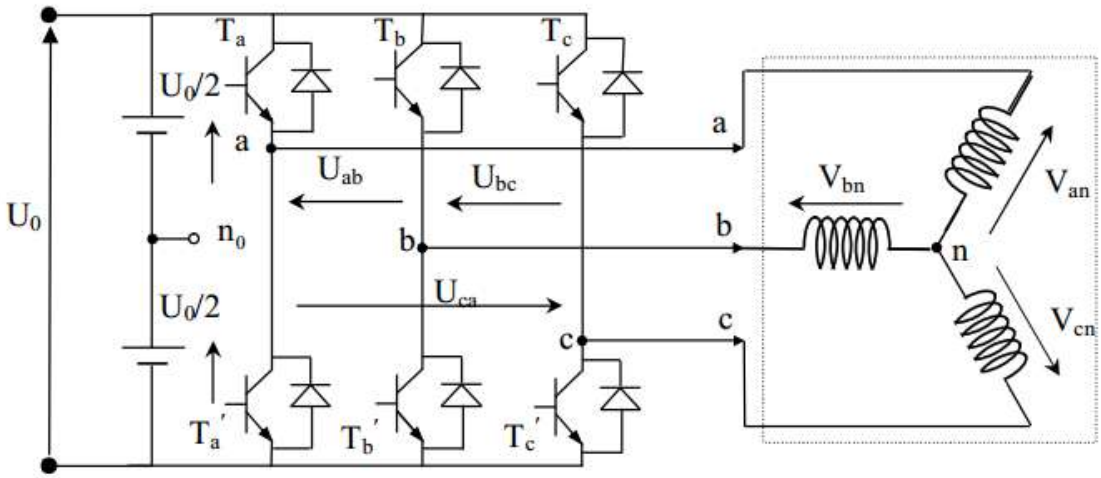


Fig.II.17:Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux.

L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiquesS_i.On appelle $T_i$et T_i' les transistors (supposés être des interrupteurs idéaux), on a :

- Si $S_i = 1$ alors$T_i$est passant etT_i'est ouvert
- Si $S_i = 0$ alorsT_i est ouvert etT_i' est passant

Les tensions composées sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an\,0} - V_{bn\,0} \\ U_{bc} = V_{bn\,0} - V_{cn\,0} \\ U_{ca} = V_{cn\,0} - V_{an\,0} \end{cases} \quad \text{(II. 33)}$$

Les tensions simples des phases de la charge issues des tensions composées ont une somme nulle,donc :

$$\begin{cases} V_{an} = \left(\frac{1}{3}\right)[U_{ab} - U_{ca}] \\ V_{bn} = \left(\frac{1}{3}\right)[U_{bc} - U_{ab}] \\ V_{cn} = \left(\frac{1}{3}\right)[U_{ca} - U_{bc}] \end{cases} \quad \text{(II. 34)}$$

Elles peuvent s'écrire à partir des tensions de sorties de l'onduleur en introduisant la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence n_0.

$$\begin{cases} V_{an} + V_{nn\,0} = V_{an\,0} \\ V_{bn} + V_{nn\,0} = V_{bn\,0} \\ V_{cn} + V_{nn\,0} = V_{cn\,0} \end{cases} \quad \text{(II. 35)}$$

Donc, on peut déduire que :

$$V_{nn\,0} = \frac{1}{3}[V_{an\,0} + V_{bn\,0} + V_{cn\,0}] \quad \text{(II. 36)}$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits↔si(i=a,b,c)on a :

$$V_{ino} = S_i U_i - \frac{U_0}{2} \quad \text{(II. 37)}$$

On a donc :

$$\begin{cases} V_{an\,0} = (S_a - 0.5)U_0 \\ V_{bn\,0} = (S_b - 0.5)U_0 \\ V_{cn\,0} = (S_c - 0.5)U_0 \end{cases} \quad \text{(II. 38)}$$

En remplaçant, on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = +\frac{2}{3}V_{an\,0} - \frac{1}{3}V_{bn\,0} + \frac{1}{3}V_{cn\,0} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{an\,0} + \frac{2}{3}V_{bn\,0} - \frac{1}{3}V_{cn\,0} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{an\,0} - \frac{1}{3}V_{bn\,0} + \frac{2}{3}V_{cn\,0} \end{cases} \quad \text{(II. 39)}$$

En remplaçant, on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}U_0 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad \text{(II. 40)}$$

II.11. COMMANDE MLI DE L'ONDULEUR

Dans la méthode de la MLI à porteuse triangulaire, montrée dans la figure (II.18), les instants de commutation des interrupteurs sont déterminés par la comparaison entre un signal de référence (dit référence) et une onde triangulaire (dite porteuse) à amplitude et une fréquence fixes.

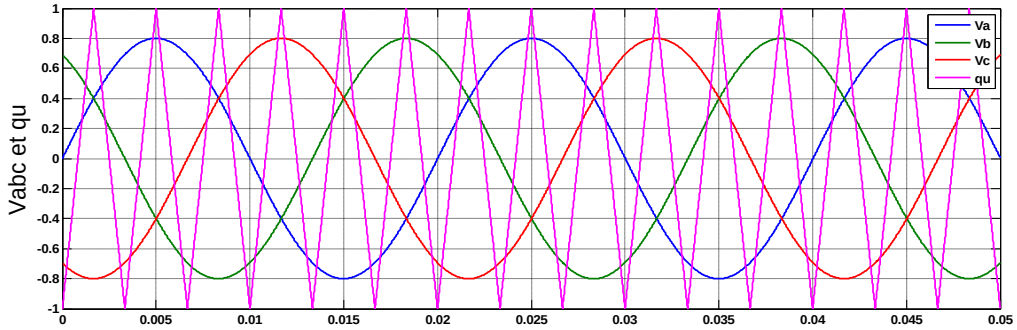


Fig.II.18 :signal porteuse et signaux de référence

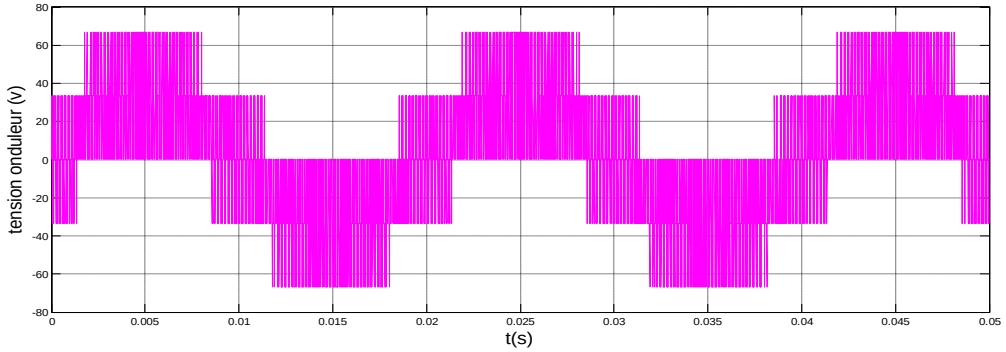


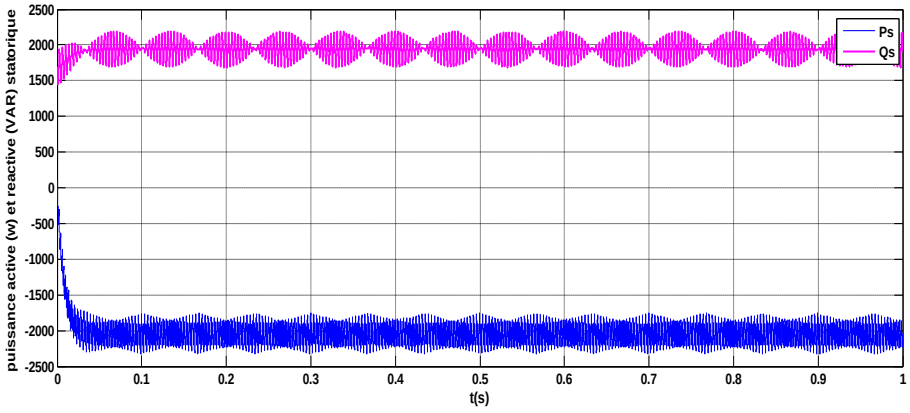
Fig.II.19 : Tension aux bornes de l'onduleur de la MADA

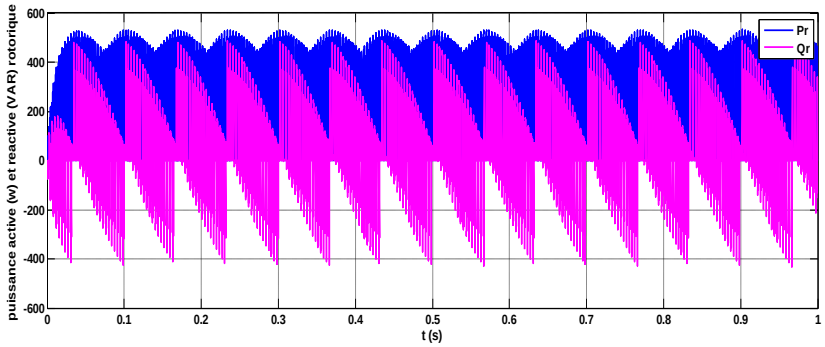
II.12. SIMULATION DE L'ASSOCIATION CONVERTISSEUR-MADA

Les caractéristiques de la MADA présentées à la section (II.8.3.2)sont à base d'un convertisseur parfait. Dans cette section et pour valider la conception de l'onduleur à MLI, nous simulons le comportement de la machine à base d'un convertisseur réel. Les simulations sont effectuées sur la machine dont les paramètres électriques et mécanique sont données dans l'annex1.

Les résultats suivant montrent le comportement de la MADA, lors d'un fonctionnement à glissement $g = +0.05$ avec application d'une tension statorique à valeur efficace de 220V, et une tension rotorique à $v_{dr} = 0$ et $v_{qr} =$ -30V. Le système passe par un régime transitoire puis s'établit à des valeurs de, ,P_r , Q_r et C_{em} .

La figure II.21 nous montrons le comportement de la MADA, lors d'un fonctionnement à glissement $g = -0.05$ avec application d'une tension statorique à valeur efficace de 220V, et une tension rotorique à $v_{dr} = 0$et $v_{qr} =$ -30. Le système passe par un régime transitoire puis s'établit à des valeurs de, Q_s, P_r, Q_r et C_{em}.





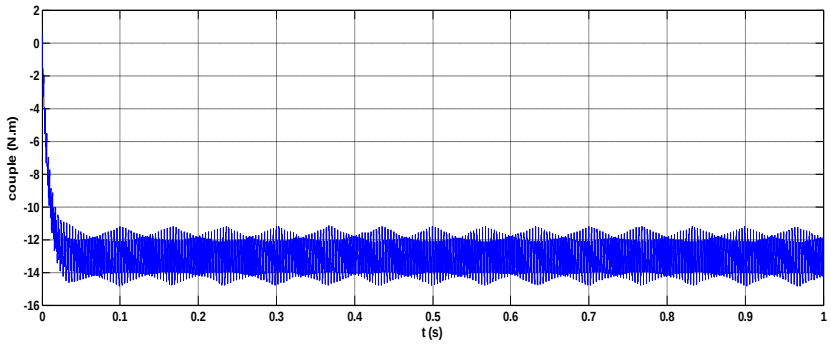


Fig.II.20 **:**Caractéristiques de la GADA pour v_{qs}= -380, v_{drr}= 0, v_{qrr}= -30V et g=+0.05dans la présence du convertisseur AC-DC-AC

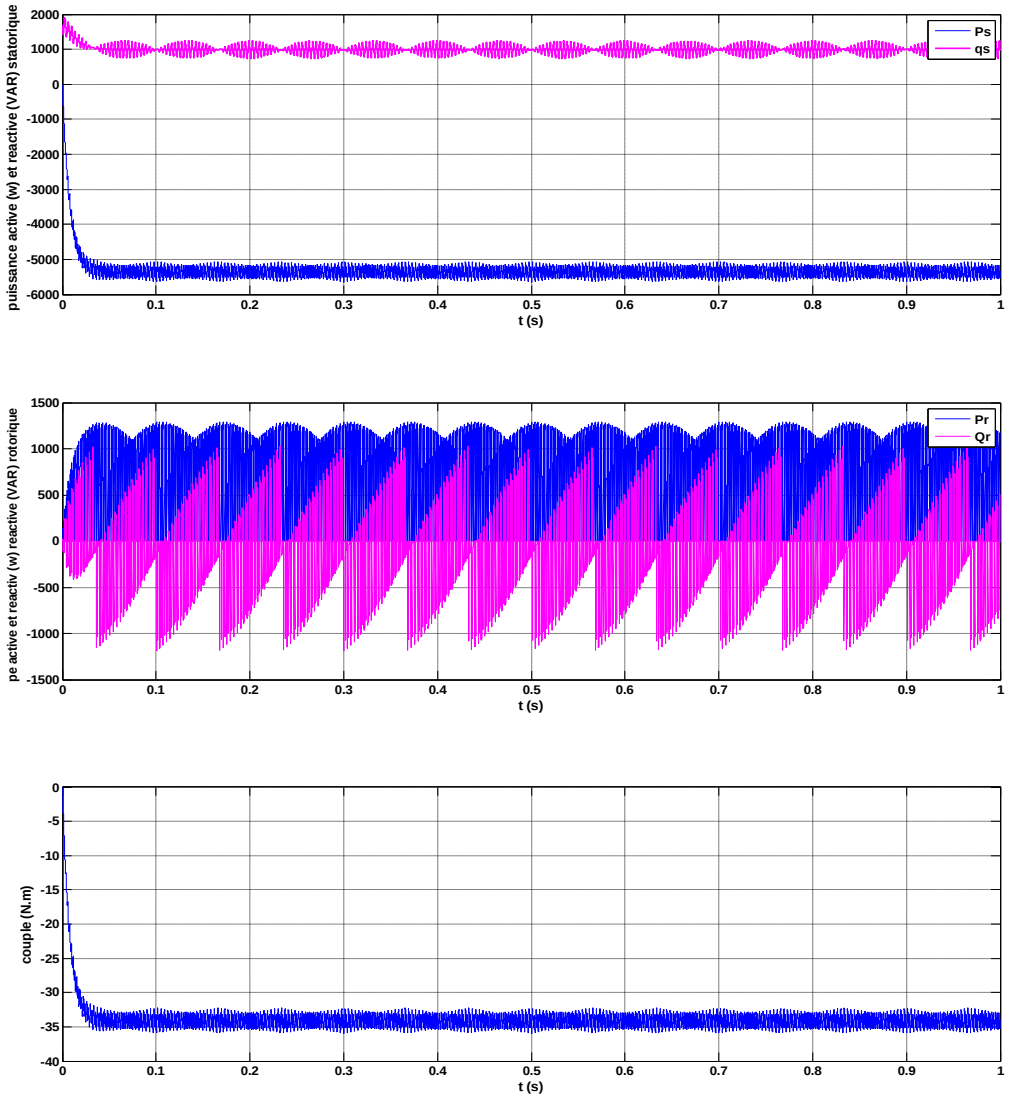


Fig.II.21 **:**Caractéristiques de la GADA pour v_{qs}= -380, v_{drr} = 0, v_{qrr} = -30V et g=-0.05dans la présence du convertisseur AC-DC-AC

II.13. CONCLUSION :

Dans ce chapitre, on a présenté une brève étude sur la machine asynchrone à double alimentation, sa structure, son principe de fonctionnement et les différentes stratégies de sa commande ainsi que ses domaines d'application. On a aussi présenté le modèle de la machine dans le repère (a,b,c) auquel on a appliqué la transformation de Park pour le rendre linéaire et plus adapté à la commande. Ensuite, on a modélisé le système d'alimentation qui comporte le redresseur, le filtre et l'onduleur. Pour ce dernier, on a appliqué la technique de la MLI pour le commander. La modélisation de la MADA et de son système d'alimentation a pour but de faciliter la mise en œuvre de la commande. La commande vectorielle sera le sujet du chapitre suivant.

CHAPITRE.III

Réglage classique de puissances statoriques de la MADA

III.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous traitons la commande vectorielle d'une MADA alimentée via l'enroulement rotorique par un onduleur à MLI. Nous étudions d'abords le principe d'orientation du flux statorique. Nous effectuerons par la suite, la régulation de la puissance active et la puissance réactive en utilisant deux techniques de commande, à savoir la commande vectorielle directe et la commande vectorielle indirecte. Enfin ces deux techniques sont utilisées pour la régulation de la puissance réactive et de la vitesse de rotation en vue que l'éolienne fonctionne de manière à suivre une consigne de puissance désignée par l'algorithme de supervision.

III.2 PRINCIPE DE LA COMMANDE VECTORIELLE DE LA MADA

Dans la commande vectorielle, la MADA est contrôlée d'une façon analogue à la machineà courant continu à excitation séparée. Cette analogie est représentée par la Figure (III.1)[13]:

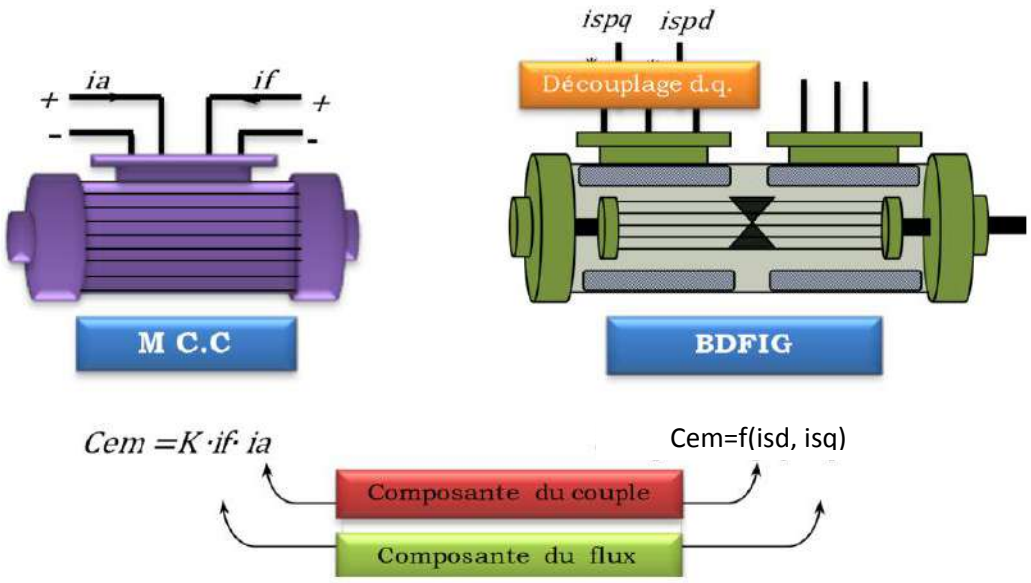


Fig. III.1: *Commande d'une Machine à courant continue et commande vectorielle d'une MADA*

La commande par flux orienté est une expression qui apparaît de nos jours dans la littérature traitant les techniques de contrôle des moteurs électriques, et dont l'étymologie nous ramène à une notion élémentaire, mais très importante de l'électromagnétisme. La force

exercée sur un conducteur parcouru par un courant et placé dans une région où règne un champ magnétique est égale au produit vectoriel du vecteur courant par le vecteur champ. Ilen résulté évidements que l'amplitude de cette force sera maximale pour des intensités du courant et du champ donnés quand le vecteur courant sera perpendiculaire au vecteur champ.

Pour les moteurs électriques, cette propriété est utilisée pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courant et les vecteurs flux résultants. Si le principe est naturellement appliqué pour les Machine à courant continue, ce n'est pas le cas pour les machines à courant alternatif; par conséquent, le contrôle par flux orienté des machines à courant alternatif est une commande par orientation de ces deux grandeurs[01].

De nombreuses variétés ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer, suivant la source d'énergie :

• Commande en tension.

• Commande en courant.

Suivant l'orientation du repère :

• Le flux rotorique.

• Le flux statorique.

• Le flux d'entrefer.

Suivant la détermination de la position du flux :

• Directe par mesure ou observation de vecteur flux (module, phase).

• Indirecte par contrôle de la fréquence du glissement[07].

III.2.1 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

On rappelle d'abord le système équations différentielles de la machine

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \dfrac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \dfrac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \dfrac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega\ )\Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \dfrac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega\ )\Phi_{dr} \end{cases} \quad \text{(III.1)}$$

v_{dr} ; v_{qr} : La tension rotorique directe et en quadrature.

$v_{ds}; v_{qs}$:La tension statorique directe et en quadrature.

Avec un flux statorique constant et orienté,$\varphi_s = \varphi_{ds}$et $\varphi_{qs} = 0$, ces équations peuvent se simplifier sous la forme suivante[01]:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s.I_{ds} \\ V_{qs} = R_s.I_{qs} + w_s\,\varphi_s \\ V_{dr} = R_r.I_{dr} + \dfrac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega)\varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r.I_{qr} + \dfrac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega)\varphi_{dr} \end{cases} \quad \text{(III.2)}$$

Si on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse souvent acceptée pour les machines de grande puissance utilisée pour la Production d'énergie éolienne, les équations des tensions de la machine se réduisent à la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = w_s\varphi_s \\ V_{dr} = R_r.I_{dr} + \dfrac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega)\varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r.I_{qr} + \dfrac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega)\varphi_{dr} \end{cases} \quad \text{(III.3)}$$

De la même manière que pour les tensions, les équations des flux deviennent :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \varphi_s = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ 0 = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad \text{(III.4)}$$

L'expression du couple électromagnétique devienne alors :

$$c_e = P\frac{v_s}{w_s}i_{qs} \tag{III.5}$$

c_e: Le couple électromagnétique

P: Le nombre de paires de pôles.

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'énergie par la MADA, il est pratique d'élaborer un modèle pour le contrôle indépendant des puissances active et réactive. Un tel modèle peut être élaboré en établissant les relations qui lient les puissances active et réactive aux courants et tension rotoriques imposés par l'onduleur[08].

III.2.2 Expressions des puissances active et réactive statoriques

Les puissances active et réactive statorique, dans le repère orthogonal, s'écrivent :

$$\begin{cases} P_S = v_{ds}i_{ds} + v_{qs}i_{qs} \\ Q_S = v_{qs}i_{ds} + v_{ds}i_{qs} \end{cases} \tag{III.6}$$

Les puissances activeP_S et réactive$Q_S$sont donc respectivement en fonction des courants statoriques I_{qs}etI_{ds}, sur les quels nous avons au qu'une action directe. Nous devons donc chercher une relation entre les courants rotoriques et les courants statoriques.

A partir des expressions des flux statoriques, nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{v_s}{w_s L_s} - \frac{M}{L_s}i_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s}i_{qr} \end{cases} \tag{III.7}$$

En remplaçant les courants statoriques direct et quadrature par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive, on trouve.

$$\begin{cases} P_s = -\frac{v_s M}{L_s}.i_{qr} \\ Q_s = \frac{{v^2}_s}{w_s L_s} - \frac{v_s M}{L_s}.i_{dr} \end{cases} \tag{III.8}$$

Il ressort de l'expression (III.8) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. En effet, avec une inductance magnétisante constante et un réseau électrique puissant, la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe *q*, etla puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe *d* à une constante Près $\frac{v^2{}_s}{w_s L_s}$imposée par le réseau[01].

III.2.3 Expressions des tensions rotoriques

A partir du système d'équation (III.8), les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = (L_r - \frac{M^2}{L_r}).\, i_{dr} + \frac{v_s M}{w_s L_s} \\ \varphi_{dr} = (L_r - \frac{M^2}{L_r}).\, i_{dr} \end{cases} \quad \text{(III.9)}$$

En introduisant ces expressions dans les équations des tensions rotoriques du système (III.9),on trouve :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)\frac{d i_{dr}}{d_t} - g w_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)\frac{d i_{qr}}{d_t} - g w_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{dr} \end{cases} \quad \text{(III.10)}$$

A partir des systèmes d'équations (III.10) et (III.09), nous pouvons élaborer le modèle pour le contrôle des puissances tel qu'il est présenté par le schéma bloc figure (III.2).

L'expression $g w_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)$représente le terme de couplage entre l'axe direct et l'axequadrature. Pour des faibles glissements, ce terme de couplage peut être négligé pour avoir un découplage parfait entre les deux axes. Cependant, pour certaines applications de la MADA, la variation de la vitesse de rotation peut être importante et le glissement ne peut être négligé.

Dans ce cas, il est nécessaire d'envisager des termes de compensation pour avoir le contrôle de chaque axe indépendamment de l'autre[08].

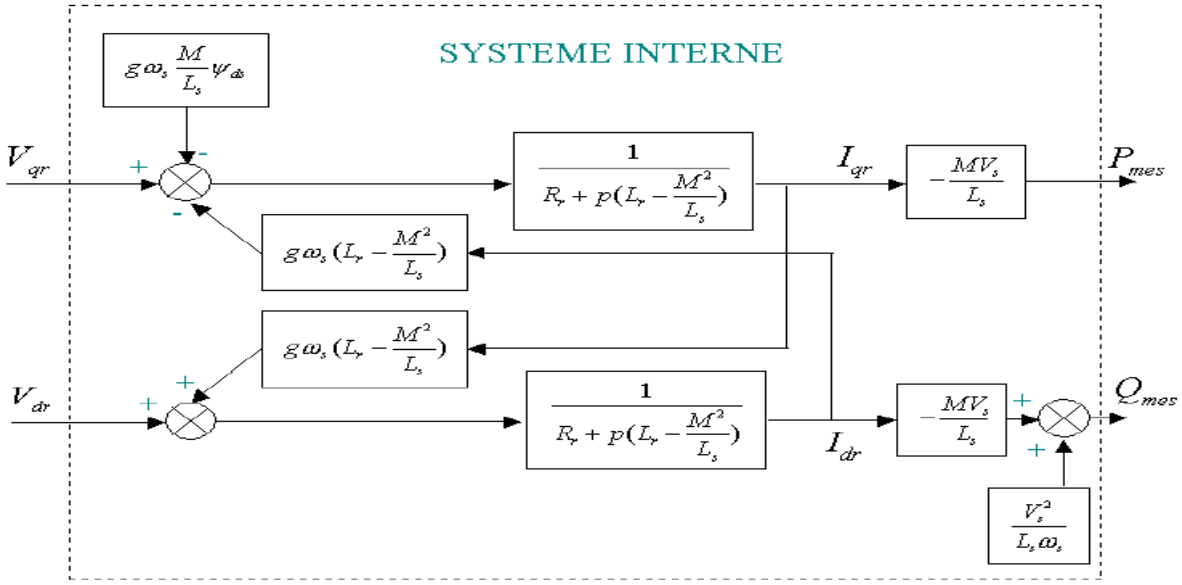


Fig. III.2. Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances

III.3.CONTROLE INDEPENDANT DES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE

Après avoir élaboré le modèle pour le contrôle indépendant des puissances de la MADA, il suffit maintenant d'inverser ses blocs pour déduire les tensions de référence de l'onduleur à partir des puissances active et réactive de références[01].

III.3.1 Contrôle indirect des puissances de la GADA

Pour pouvoir contrôler les puissances active et réactive échangées entre l'enroulement du stator de la GADA et le réseau, nous allons réaliser une commande à l'aide des régulateurs à action Proportionnel-Intégral. Nous nous basons sur les équations, établis précédemment, qui lient les tensions du rotor, générées par l'onduleur à MLI, avec les puissances actives et réactive statorique.

L'équation (III.10) nous montre que nous pouvons mettre en place un contrôle des courants rotoriques étant donné qu'à l'influence des couplages prés, chaque courant peut être commandé indépendamment avec pour chacun son propre régulateur[02].

$$\begin{cases} i^*_{qr} = -\frac{L_s}{MV_s} P^*_s \\ i^*_{dr} = -\frac{L_s}{MV_s} Q^*_s + \frac{V_s}{M\omega_S} \end{cases} \quad \text{(III.11)}$$

Avec :

i^*_{dr} et i^*_{qr} sont les grandeurs de référence des courants rotoriques.

P^*_s et Q^*_s sont les grandeurs de référence des puissances statoriques.

A partir des équations (III.10) et ((III.11) nous pouvons établir le schéma bloc des boucles de régulation des courants rotoriques d'axes 'dq' donnant ainsi les puissances statoriques désirées (FigureIII.3)

Avec e_{dr} et e_{qr} sont les termes de couplage et sont donnés par :

$$e_{dr} = -\delta L r g \omega_s i_{qr} \quad et \quad e_{dr} = \delta L r g \omega_s i_{dr} + g\frac{MV_s}{Ls} \qquad \text{(III.12)}$$

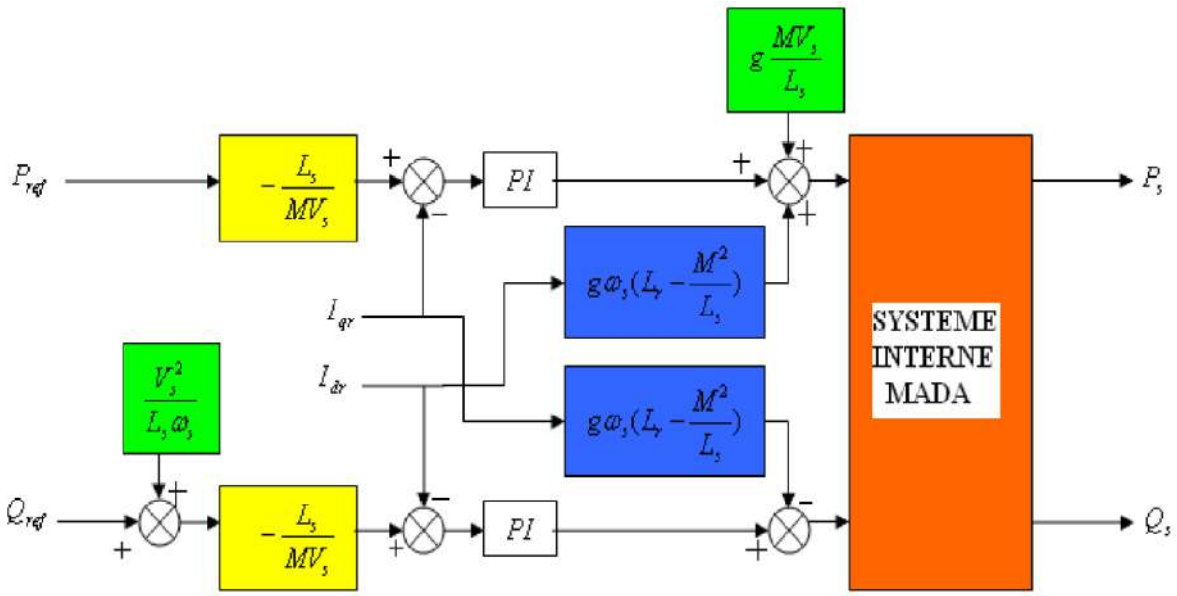


Fig. III.3: Schéma de principe de la commande indirecte des puissances statoriques de la GADA

III.3.1.1.Dimensionnement du correcteur

Les expressions des deux courants sans les termes de couplage sont déduites du système d'équation (III.10) comme suit :

$$\begin{cases} v^r{}_{dr} = R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{dr} \\ v^r{}_{qr} = R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{qr} \end{cases} \quad \text{(III.13)}$$

Avec

$$v_{dr} = v^r{}_{dr} + e_{dr} \; et \; v_{qr} = v^r{}_{qr} + e_{dr} \quad \text{(III.14)}$$

On remarque bien que les fonctions de transfert des deux courants sont identiques. Ce ci justifie l'utilisation des correcteurs de mêmes paramètres pour les deux boucles de régulations.

Le schéma bloc de la régulation du courant rotorique idr en boucle fermée est représenté par la figure suivante (Figure III.4). Celui du courant rotorique iqr est le même

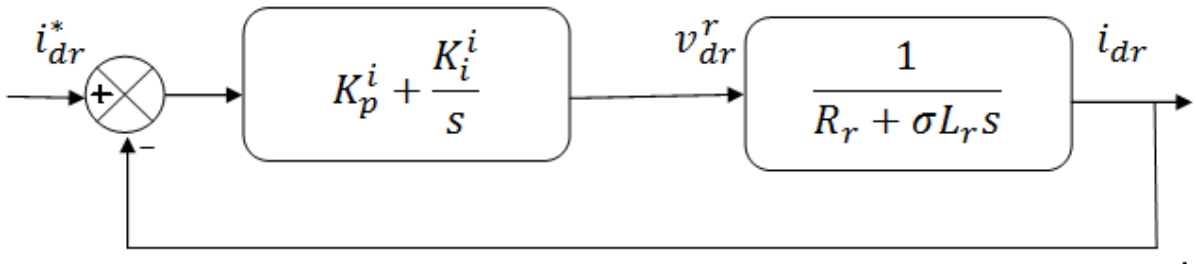


Fig.III.4: Schéma bloc de régulation du courant i_{dr}

Sachant que la fonction de transfert du courant rotorique par rapport à la tension est $\frac{1}{R_r + \sigma L_r s}$, donc la fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$\text{FTBO}=\left(K^i{}_p + \frac{K^i{}_i}{s}\right)\frac{1}{R_r \sigma L_r s} \quad \text{(III.15)}$$

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée comme suit :

$$\text{FTBO}=\frac{i_{dr}}{i_{qr}} = \frac{\frac{1}{R_r \sigma L_r s}\left(K^i{}_p + \frac{K^i{}_i}{s}\right)}{1\frac{1}{R_r \sigma L_r s}\left(K^i{}_p + \frac{K^i{}_i}{s}\right)} \quad \text{(III.16)}$$

Après simplification, il en résulte :

$$FTBO=\frac{\left(K^{i}{}_{p}\,s+K^{i}{}_{i}\right)/\sigma L_{r}}{s^{2}+\frac{R_{r}+K^{i}{}_{p}}{\sigma L_{r}}s+\frac{K^{i}{}_{i}}{\sigma L_{r}}} \qquad \text{(III.17)}$$

Le dimensionnement du correcteur est fait à l'aide du principe de placement des pôles. Comme le polynôme caractéristique est du deuxième ordre, nous imposons deux pôles complexes à partie réelle négative pour assurer la stabilité en boucle fermée. Afin d'avoir une réponse avec amortissement relatif optimale, les pôles sont choisis complexes conjuguées à partie réelle égale à la partie imaginaire[02].

.

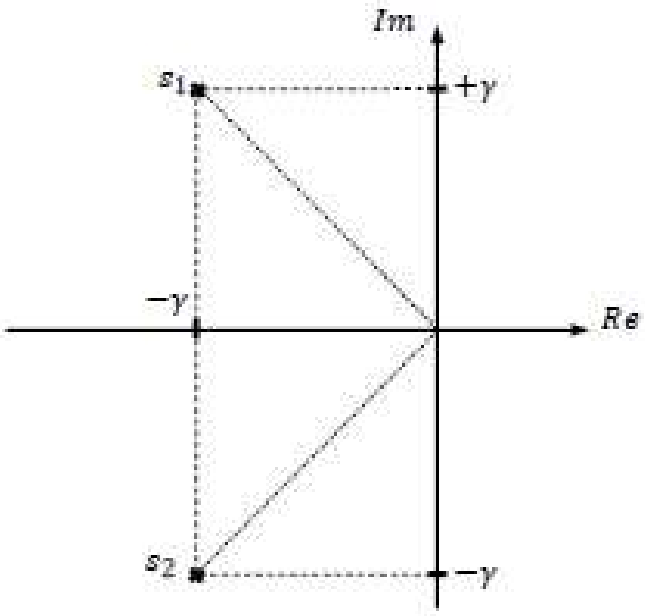


Fig.III.5: Position des pôles dans le plan de phase

En imposant les pôles $i_{1,2} = -\gamma \mp j\gamma (j^2 = -1)$, le polynôme caractéristique s'écrit comme suit :

$$s^2 + 2\,\gamma s - 2\gamma^2 \qquad \text{(III.18)}$$

Par identification, nous obtenons les paramètres du régulateur PI :

$$\begin{cases} K^{i}{}_{p} = 2\,\gamma\sigma L_r - R_r \\ K^{i}{}_{i} = 2\gamma^2\sigma L_r \end{cases} \qquad \text{(III.19)}$$

III.3.1.2. Résultats de simulations

Les simulations présentées dans ce travail sont effectuées sur une machine asynchrone à double alimentation dont les paramètres sont mentionnés dans l'annexe.

Les paramètres des régulateurs PI utilisés au schéma de principe (Figure III.5) son trésumés au tableau suivant :

Boucle de régulation	Pôle 1	Pôle 1	$K^{i}{}_{p}$	$K^{i}{}_{i}$
Courants$(i_{dr}\ et\ i_{qr})$	$s_1 = -800 - j800$	$s_2 = -800 - j800$	44.42	385.792

Tableau III.1 : Paramètres des régulateurs PI des courants rotoriques.

Les simulations présentées sur la figure III.6 montrent le comportement de la machine asynchrone à double alimentation, lors de variation des références des deux puissances active et réactive. Initialement, la machine est commandée pour fournir au réseau une puissance active de 15kW (puissance nominale)et une puissance réactive de 0.5kVAR.

Le premier essai consiste à appliquer aux entrées des régulateurs un échelon de puissance active et un échelon de puissance réactive,

☐Pour la puissance active:

☐De t=0s à t=0.3s: la machine est commandée pour fournir 1.5KW.

☐De t=0.3s à t=0.45s: la machine est commandée pour fournir 0.5KW.

☐De t=0.45s à t=0.65s: la machine est commandée pour fournir 1.5KW.

☐De t=0.65s à t=1s: la machine est commandée pour fournir 0.5KW.

Pour la puissance réactive :

☐De t=0s à t=0.3s: la machine est commandée pour fournir 0.5KVAR

☐De t=0.3s à t=0.45s: la machine est commandée pour absorber 0.5KVAR

☐De t=0.45s à t=0.65s: la machine est commandée pour fournir 0.5KVAR

☐De t=0.45s à t=1s: la machine est commandée pour absorber 0.5KVAR

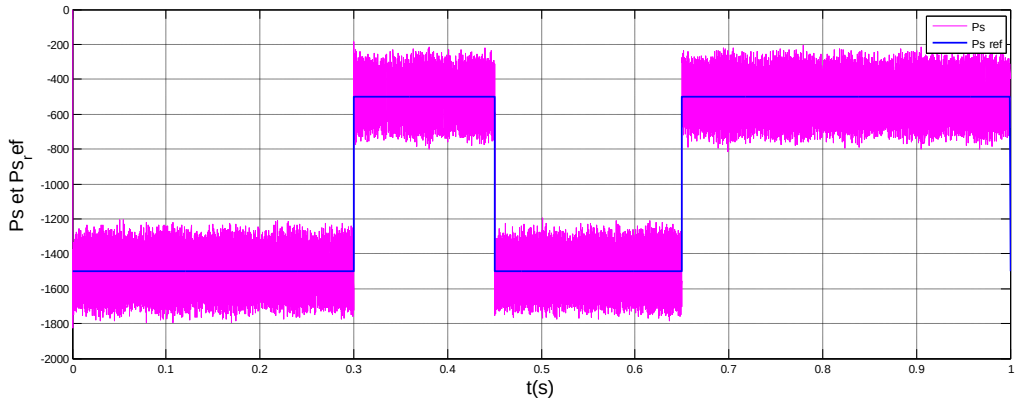


Fig.III.6*: Puissances active statoriques en commande indirect*

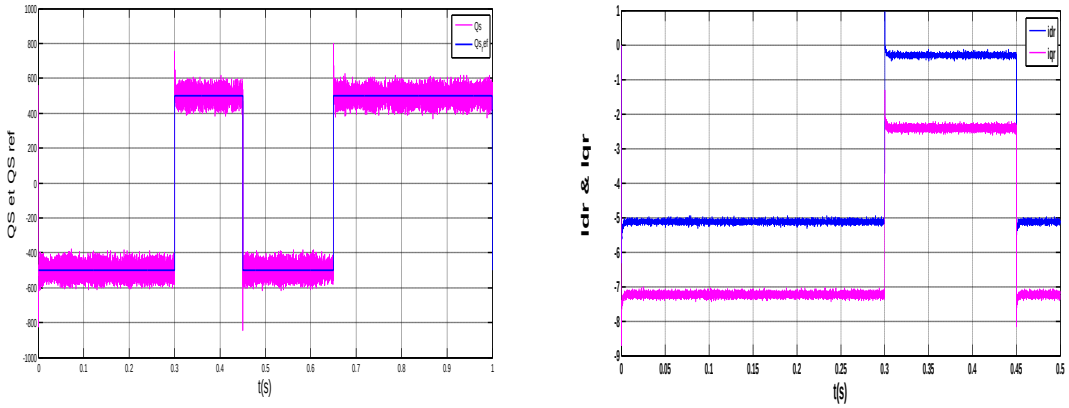


Fig. III.7*: Puissances réactive statoriques et les courant rotorique en commande indirect*

III.3.2. Contrôle directe des puissances de la GADA

Afin d'éviter le problème de l'erreur statique sur les grandeurs à régler, nous utilisons maintenant la régulation directe de ces grandeurs. En s'opposant sur les équations (III.8)et (III.10) établis précédemment. Nous élaborons d'autres équations qui lient directement les tensions du rotor, générées par l'onduleur à MLI avec les puissances active et réactive statoriques. Depuis l'équation (III.8), on peut déduire les courants rotoriques en fonction des puissances statoriques comme suit [02]:

$$\begin{cases} i_{qr} = -\frac{L_s}{MV_s} P_s \\ i_{dr} = -\frac{L_s}{MV_s} Q_s + \frac{V_s}{M\omega_S} \end{cases} \quad \text{(III.20)}$$

En remplaçant ces expressions dans l'équation (III.11), et en supposant que $\frac{V_s}{M\omega_S}$ est constante en fonction du temps, on obtient :

$$\begin{cases} V_{dr} = -R_r \frac{Vs}{M\omega_s} Q_s - \delta L_r \frac{Ls}{M\omega_s} \frac{d}{dt} Q_s - -\delta Lr \mathrm{g} \omega_s i_{qr} + R_r \frac{Vs}{M\omega_s} \\ V_{qr} = -R_r \frac{Ls}{MV_s} P_s - \delta L_r \frac{Ls}{M\omega_s} \frac{d}{dt} P_s + \delta Lr \mathrm{g} \omega_s i_{dr} + \mathrm{g} \frac{M\omega_s}{L_s} \end{cases} \quad \text{(III.21)}$$

L'équation (III.21) nous montre que nous pouvons mettre en place un contrôle des puissances active et réactive statoriques, chaque puissance peut être commandé indépendamment de l'autre. A partir de ces équations, nous pouvons établir le schéma de principe de sboucles de régulation directe des puissances active et réactive statoriques (Figure III.7).Avec e_{rQ} et e_{rp} sont les termes de couplage pour les deux boucles:

$$\begin{cases} e_{rQ} = -\delta Lr \mathrm{g} \omega_s i_{qr} + R_r \frac{Vs}{M\omega_s} \\ e_{rp} = \delta Lr \mathrm{g} \omega_s i_{dr} + \mathrm{g} \frac{M\omega_s}{L_s} \end{cases} \quad \text{(III.22)}$$

III.3.2.1. Dimensionnement du correcteur

Les expressions des deux puissances sans les termes de couplage sont déduites des équations (III.21) comme suit :

$$\begin{cases} v^r{}_{dr} = R_r \frac{Ls}{MV_s} Q_s + \sigma L_r \frac{L_s}{MV_s} \frac{d}{dt} Q_s \\ v^r{}_{qr} = R_r \frac{Ls}{MV_s} P_s + \sigma L_r \frac{L_s}{MV_s} \frac{d}{dt} p_s \end{cases} \quad \text{(III.23)}$$

Avec

$$v_{dr} = -v^r{}_{dr} + e_{rQ} \; et \; v_{dr} = -v^r{}_{qr} + e_{rp} \quad \text{(III.24)}$$

Comme pour le cas de la régulation indirecte. On remarque bien que les fonctions de transfert des deux puissances sont identiques. Ce ci justifie l'utilisation des correcteurs de mêmes paramètres pour les deux boucles. La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par [02]:

$$\text{FTBO}=\left(K_p^p+\frac{K_i^p}{s}\right)\frac{MV_s}{R_sL_s+L_r\sigma L_s s} \qquad \text{(III.25)}$$

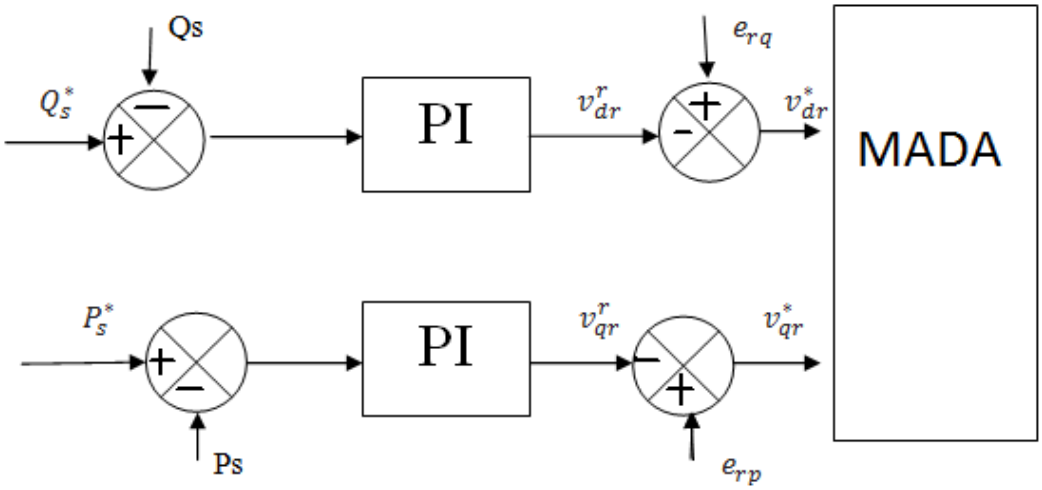


Fig. III.8: Schéma de principe de la commande directe des puissances statoriques de la GADA

Le schéma bloc de la régulation de la puissance réactive Q_s en boucle fermée estreprésenté par la figure suivante. Celui de la puissance active P_s reste le même.

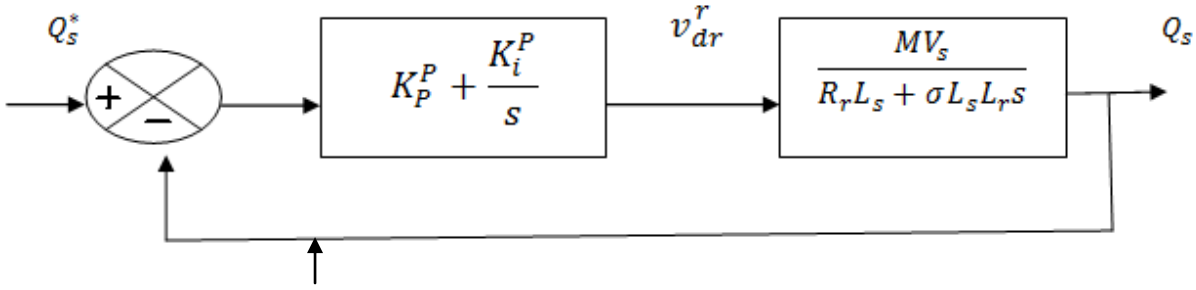


Fig.III.9: Schéma bloc de régulation de la puissance réactive Q_s

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée comme suit :

$$\text{FTBO}=\frac{Q_s}{Q_s^*}=\frac{\frac{MV_s}{R_rL_s+L_r\sigma L_s s}\left(K_p^p+\frac{K_i^p}{s}\right)}{1+\frac{MV_s}{R_rL_s+L_r\sigma L_s s}\left(K_p^i+\frac{K_i^i}{s}\right)} \qquad \text{(III.26)}$$

Après simplification, il en résulte :

$$FTBO=\frac{\frac{MV_s}{R_r L_s+L_r\sigma L_s s}\left(K_p^p+\frac{K_i^p}{s}\right)/\sigma L_s L_r}{s^2+\frac{L_s R_r+K_p^p MV_s}{\sigma L_r}s+\frac{MV_s K_P^i}{\sigma L_r L_s}} \quad \text{(III.27)}$$

Le dimensionnement du correcteur est fait aussi à l'aide du principe de placement des pôles. Comme le polynôme caractéristique est du deuxième ordre, nous imposons deux pôles à partie réelle négative pour assurer la stabilité en boucle fermée. Afin d'avoir une réponse avec amortissement relatif optimale, les pôles sont choisis complexes conjuguées à partie réelle égale à la partie imaginaire [08].

Par identification du dénominateur de l'équation (III.27) avec le polynôme de l'équation(III.18), nous obtenons les paramètres du régulateur PI :

$$\begin{cases} K_p^p = \frac{2\,\gamma\sigma L_s L_r - R_r L_s}{MV_s} - R_r \\ K_i^p = \frac{2\gamma^2\sigma L_s L_r}{MV_s} \end{cases} \quad \text{(III.28)}$$

Nous constatons que les paramètres du régulateur dans ce cas (Régulation directe) sont proportionnels aux ceux du cas de régulation indirecte. C'est tout à fait correct car la relation entre les fonctions de transfert des deux systèmes (équation III.17 et III.25) est proportionnelle comme suit :

$$\frac{Q_s}{v_{dr}^r} = \frac{L_s}{MV_s}\frac{i_{dr}}{v_{dr}^r} \quad \text{(III.29)}$$

Où

$$K_p^p = \frac{L_s}{MV_s}K_i^p \; et \; K_i^p = \frac{L_s}{MV_s}K_i^i \quad \text{(III.30)}$$

III.3.2.2.Résultats de simulations

Les simulations présentées dans cette partie sont effectuées sur la machine de l'annexe I avec les mêmes temps d'application des échelons.

Les paramètres des régulateurs PI utilisés au schéma de principe (Figure III.7) sont résumé sau tableau suivant :

Boucle de régulation	Pôle 1	Pôle 2	$K^i{}_p$	$K^i{}_i$
Puissance (P_s $et Q_s$)	$s_1 = -800 - j800$	$s_2 = -800 - j800$	2.59	980.18

Tableau III.2 Paramètres des régulateurs PI des puissances statoriques

D'après les résultats obtenus, nous constatons que les puissances active et réactive (les grandeurs à régler en rose) suivent leurs références (en bleu). Les réponses sont oscillatoires avec amortissement relatif optimale comme prévue (pôles imposés complexes conjugués à parties réelles négatives). Le temps de repense est le même avec la méthode indirecte car nous avons choisis les mêmes pôles. Nous constatons aussi que le flux statorique selon l'axe directe est presque constant (ne varie que très peu avec les fortes variations de la puissance active).

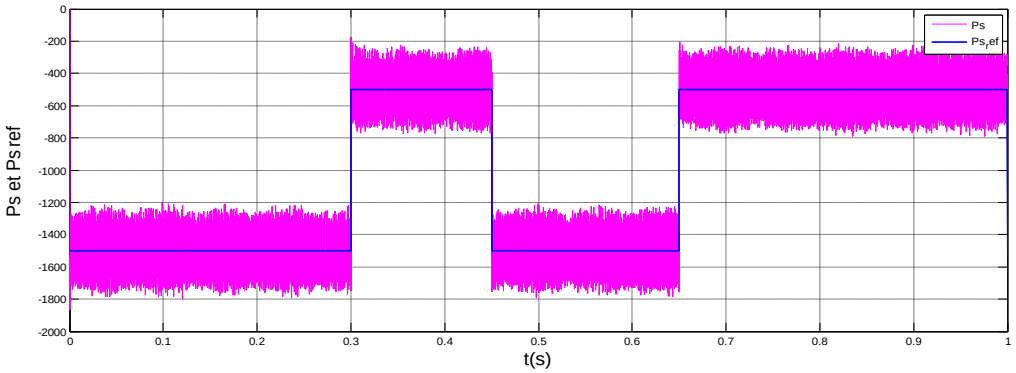


Fig.III.10: Puissances active statoriques en commande direct

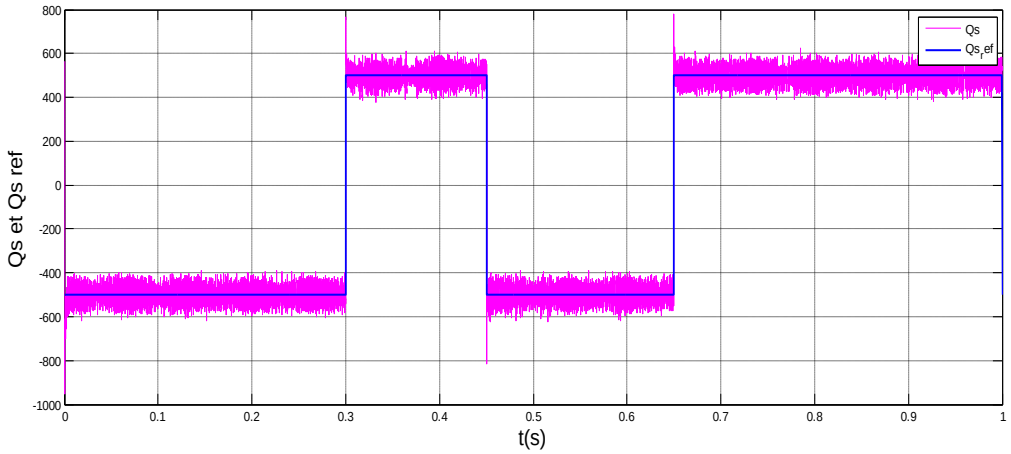


Fig. III.11: Puissances réactive statoriques en commande direct

III.4. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons aussi développé deux méthodes de commande vectorielle en puissance de la machine à savoir : la commande directe et la commande indirecte. Effectivement nous avons pu voir que la commande directe est la plus simple à mettre en œuvre, mais pas la plus performante. En revanche, la méthode indirecte nous permet, en association avec le bouclage des puissances, d'avoir un système performant et robuste. Elle est certes plus complexe à mettre en œuvre, mais permettra d'avoir un fonctionnement optimal du générateur électrique en minimisant les éventuels soucis liés aux variations des paramètres de la machine et du système éolien.

La synthèse du régulateur PI, utilisé pour stabiliser le système à cause de sa rapidité et de sa simplicité, nous a permis de déterminer les constantes de temps nécessaires au choix de ces composants.

CHAPITRE.IV

Commande par la logique floue type-1 de la MADA

IV.1 INTRODUCTION

La logique floue, ou plus généralement le traitement des incertitudes, est l'une des classes de l'intelligence artificielle. Elle a pour objet l'étude et la représentation des connaissances imprécises et le raisonnement approché. Elle a été connue en première fois comme une branche mathématique complémentaire à la théorie de la logique classique, puis elle a trouvé sa place parmi les techniques de commande basées sur l'intelligence artificielle. Elle est complémentaire et utilisée particulièrement lorsqu'on ne dispose pas de modèle mathématique précis du processus à commander, ou lorsque ce dernier présente de fortes non linéarités ou imprécisions. De plus, l'intérêt de la logique floue réside dans sa capacité de traiter l'imprécis, l'incertain et le vague.

Dans ce chapitre, on présentera un aperçu général sur la théorie de la logique floue et ses principes de base. Ensuite, on montrera comment construire un régulateur flou, et l'appliquera au réglage de puissance de la MADA.

On a étudié La turbine éolienne permet la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique transmise à l'ordre de la génératrice. Les différents éléments constituants une éolienne sont conçus pour maximiser la conversion énergétique. L'objectif est d'avoir un bon compromis entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice. Pour satisfaire cela, l'éolienne doit comporter deux systèmes qui permettent de la contrôler mécaniquement et électriquement. On s'intéresse dans ce chapitre à la modélisation de la turbine éolienne ainsi qu'à son contrôle. Puis, à l'asservissement de toute la chaîne de conversion éolienne.

IV.2.PRINCIPE FONDAMENTAL DE LA LOGIQUE FLOUE

Afin de mettre en évidence le principe fondamental de la logique floue, on présente un exemple simple. Celui de la classification des personnes en trois ensembles «jeune», «entre deux âges» et «âgé».

Selon la logique classique (logique de Boole) qui n'admet pour les variables que les deux valeurs 0 et 1. Une telle classification pourrait se faire comme le montre la figure IV.1. Toutes les personnes âgées de moins de 30 ans sont alors considérées comme appartenant à

l'ensemble «jeune» et toutes les personnes âgées de plus de 50 ans comme appartenant à l'ensemble «âgé».

Cependant, une telle logique de classification n'est même pas logique. Pourquoi une personne, lorsqu'elle a eu 50 ans, doit-elle être considérée comme appartenant à l'ensemble «âgé»? En réalité, un tel passage se fait progressivement et individuellement.

La logique floue, dont les variables peuvent prendre n'importe qu'elle valeur entre 0 et 1 (on parle alors de fonction d'appartenance μ), permet de tenir compte de cette réalité. La figure *IV.2* montre une classification possible pour l'exemple précédent, cette fois-ci, à laide de la logique floue. Ainsi, une personne de 25 ans appartient à l'ensemble «jeune» avec une valeur de 0,75 de la fonction d'appartenance et à l'ensemble «entre deux âges» avec μ=0,25. Par contre, une personne de 70 ans appartient avec une valeur μ=1 de la fonction d'appartenance à l'ensemble «âgé». Evidemment, la forme des fonctions d'appartenance n'est pas rigide et peut dépendre du contexte envisagé, à savoir professionnel, sportif ou autre.

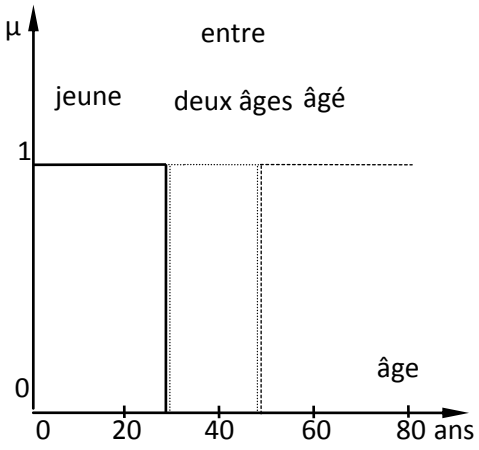


Fig. IV.1:Classification des personnes en trois ensembles selon la logique classique

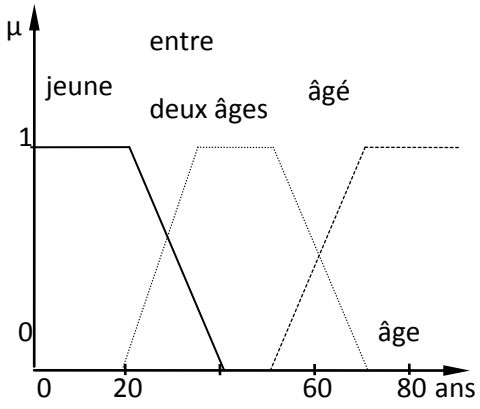


Fig. IV.2:Classification des personnes en trois ensembles selon la logique floue

IV. 3. CONTROLEUR FLOU

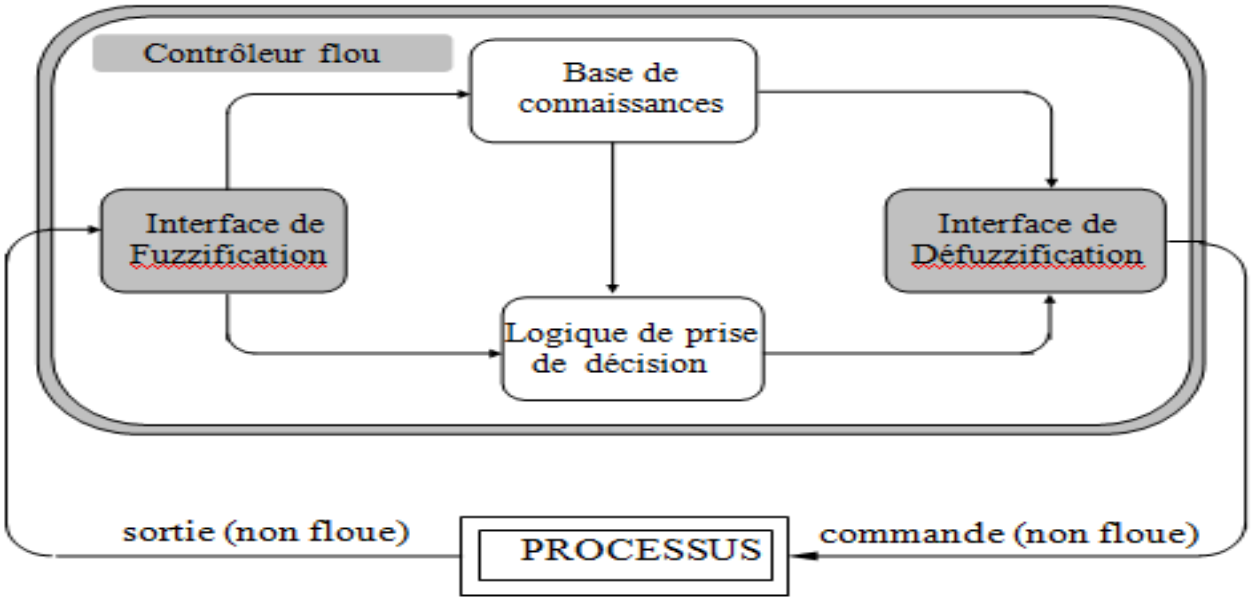


Fig. IV. 3 : Schéma synoptique général d'un contrôleur flou.

En général, un contrôleur flou est un système qui associe à tout vecteur d'entrée $X=[x_1,x_2, \ldots,x_n]$ un vecteur de sortie $Y=[y_1,y_2, \ldots,y_n]$ tel que:

$$Y = F(X) \qquad \text{(IV.1)}$$

Où: F est souvent une fonction non linéaire.

Muni des différents concepts de la théorie des ensembles flous, on peut développer les notions importantes des contrôleurs flous.

La figure (IV.3) montre le schéma synoptique général d'un contrôleur flou.
Ce schéma est composé:

- d'une interface de fuzzification à l'entrée;
- d'une base de connaissances;
- d'une logique de prise de décision;

- d'une interface de défuzzification à la sortie;
- du système à contrôler.

1- L'interface de fuzzification inclue les fonctions suivantes:

- Mesure des variables d'entrée.
- représentation d'une cartographie d'échelle transférant la plage des variables d'entrée aux univers de discours correspondants.
- représentation de la fonction de fuzzification convertissant les données d'entrée en valeurs linguistiques convenables pouvant être vues comme des étiquettes d'ensembles flous.

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

- d'une base de données fournissant les définitions utilisées pour définir les règles de contrôle linguistique et la manipulation des données floues dans le contrôleur;
- d'une base de règles caractérisant les buts et la politique de contrôle des experts du domaine au moyen d'un ensemble de règles de contrôle linguistique.

3- La logique de prise de décision est le noyau du contrôleur flou. Elle est capable de simuler la prise de décision de l'être humain en se basant sur les concepts flous et les règles d'inférences en logique floue.

4- L'interface de défuzzification réalise les fonctions suivantes:

- une cartographie d'échelle convertissant la plage des variables de sortie aux univers de discours appropriés;
- une défuzzification fournissant une action de contrôle (physique) à partir d'une action de contrôle floue.

IV. 4. STRATEGIE DE FUZZIFICATION :

Dans les problèmes de commande, les données observées sont habituellement physiques (réelles). Or, le traitement de ces données est basé ici sur la théorie des ensembles flous , ceci nécessite donc une procédure de fuzzification.

La fuzzification proprement dite consiste à définir les fonctions d'appartenance pour les différentes variables, en particulier pour les variables d'entrée. On réalise ainsi le passage des grandeurs physiques (grandeurs déterminées) en variables linguistiques (variables floues) qui peuvent alors être traitées par les inférences.

La fuzzification s'articule autour des axes suivants:

- Un opérateur de fuzzification convertit une valeur numérique en un singleton flou à l'intérieur d'un certain univers de discours. Cette stratégie est largement utilisée dans les contrôleurs flous car elle est naturelle et facile à implémenter. Elle interprète une entrée x_0 comme un ensemble flou A ayant une fonction d'appartenance $\mu_A(x_0)$ égale à zéro partout sauf au point x_0 (égale à 1).
- Les grandeurs physiques sont souvent normalisées entre -1 et 1 par un facteur d'échelle qui doit être choisi sur la base de l'étude du système de sorte que, lors des petits phénomènes transitoires, le domaine admissible pour les grandeurs normalisées ne doit pas dépasser.

Dans le cas du réglage flou, on utilise des fonctions d'appartenance trapézoïdales et triangulaires pour les variables linguistiques. On associe à chaque variable d'entrée x_i, un univers de discours décomposé en un nombre limité de fonctions d'appartenance.

Une subdivision plus fine, c'est-à-dire plus de sept ensembles flous associés aux variables d'entrée, n'apporte en général aucune amélioration du comportement dynamique du réglage par logique floue[21].

A partir de la fuzzification on détermine le degré avec lequel une mesure appartient à un ensemble flou donné.

IV. 4. 1 . Base de données

Les concepts associés à la base de données sont utilisés pour caractériser les règles de contrôle flou et la manipulation des données floues dans un contrôleur flou. Ces concepts sont subjectivement définis et basés sur l'expérience et le jugement de l'ingénieur. Dans cet ordre d'idée, il peut être noté que le choix correct des fonctions d'appartenance d'un ensemble de termes joue un rôle essentiel dans la réussite d'une application, on va donc chercher à déterminer les phases importantes de construction d'une base de données dans un contrôleur flou.

- Discrétisation d'un univers de discours;

- Normalisation d'un univers de discours;
- Partition des espaces d'entrée et de sortie.

IV. 4. 2. Base de régle

Un système flou est caractérisé par un ensemble d'expressions linguistiques (règles) basées sur une connaissance d'expert. Cette connaissance est d'habitude représentée sous forme de règles″**Si - alors**″ simples à implémenter. La collection de ces règles forme ce qu'on appelle la base de règles ou ensemble de règles d'un contrôleur flou [21].

IV. 5. DEFUZZIFICATION

Pour pouvoir définir la loi de commande, le contrôleur flou doit être accompagné d'une procédure de défuzzification jouant le rôle de convertisseur de la commande floue en valeur physique nécessaire pour un tel état du processus. Une stratégie de défuzzification est alors nécessaire.

Plusieurs stratégies de défuzzification existent. Les plus utilisées sont:

- méthode du maximum;
- méthode de la moyenne des maxima
- méthode du centre de gravité;
- méthode des hauteurs pondérés.

IV. 5. 1. Méthode du maximum

La commande est égale à la commande locale ayant la fonction d'appartenance maximale.

$$U = Max_{z \in s}(\mu_{Res}(z)) \qquad (IV.2)$$

Où : S est le support de Res

Par fois U conduit à une indétermination, lorsqu'il existe plusieurs points qui maximisent $\mu_{Res}(z)$. Pour cette raison, on fait appel à la méthode suivante.

IV. 5. 2. méthode de la moyenne des maxima

Cette stratégie génère une commande qui représente la valeur moyenne de toutes les actions de contrôle locales ayant des fonctions d'appartenance maximales.

Plus spécialement, dans le cas d'un univers de discours discret, l'action de commande peut être exprimée comme :

$$U = (1 / L) \sum_{i=1}^{m} Z_i \qquad \text{(IV.3)}$$

$\mathbf{Z}_i$: est la valeur de la commande locale avec laquelle la fonction d'appartenance associée atteint la valeur maximale $\mu_{Res}(z)$;

L est le nombre total des valeurs prises par la fonction d'appartenance.

IV. 5. 3. Méthode du centre de gravité:

Cette méthode génère le centre de gravité de l'espace flou d'une action de contrôle (commande).

Dans le cas d'un univers de discours discret, cette méthode produit

$$U = \frac{\sum_{i=1}^{n} \mu_{Rres}(z_i).z_i}{\sum_{i=1}^{n} \mu_{Rres}(z_i)} \qquad \text{(IV.4)}$$

Où: n est le nombre des niveaux de la sortie du contrôleur.

Par cette méthode, on arrive à une solution unique. Le calcul est simplifié lorsque $\mu_{Res}(z)$ est déterminé par la méthode d'inférence somme-prod.

IV. 5. 4. Méthode des hauteurs pondérés:

En anglais ″**Height méthode**″, elle consiste à calculer la sortie du contrôleur en utilisant les centres de gravité z_i^* de chacun des ensembles C_i:

$$U = \frac{\sum_{i=1}^{m} z_i^* . \mu_{ci}(z_i)}{\sum_{i=1}^{m} \mu_{ci}(z_i)} \qquad \text{(IV.5)}$$

m: le nombre d'ensembles flous associes à la variable de sortie U.

Dans le cas de notre travail l'erreur *e*, la variation de l'erreur *de* et la commande sont déterminés par les fonctions d'appartenances suivantes :

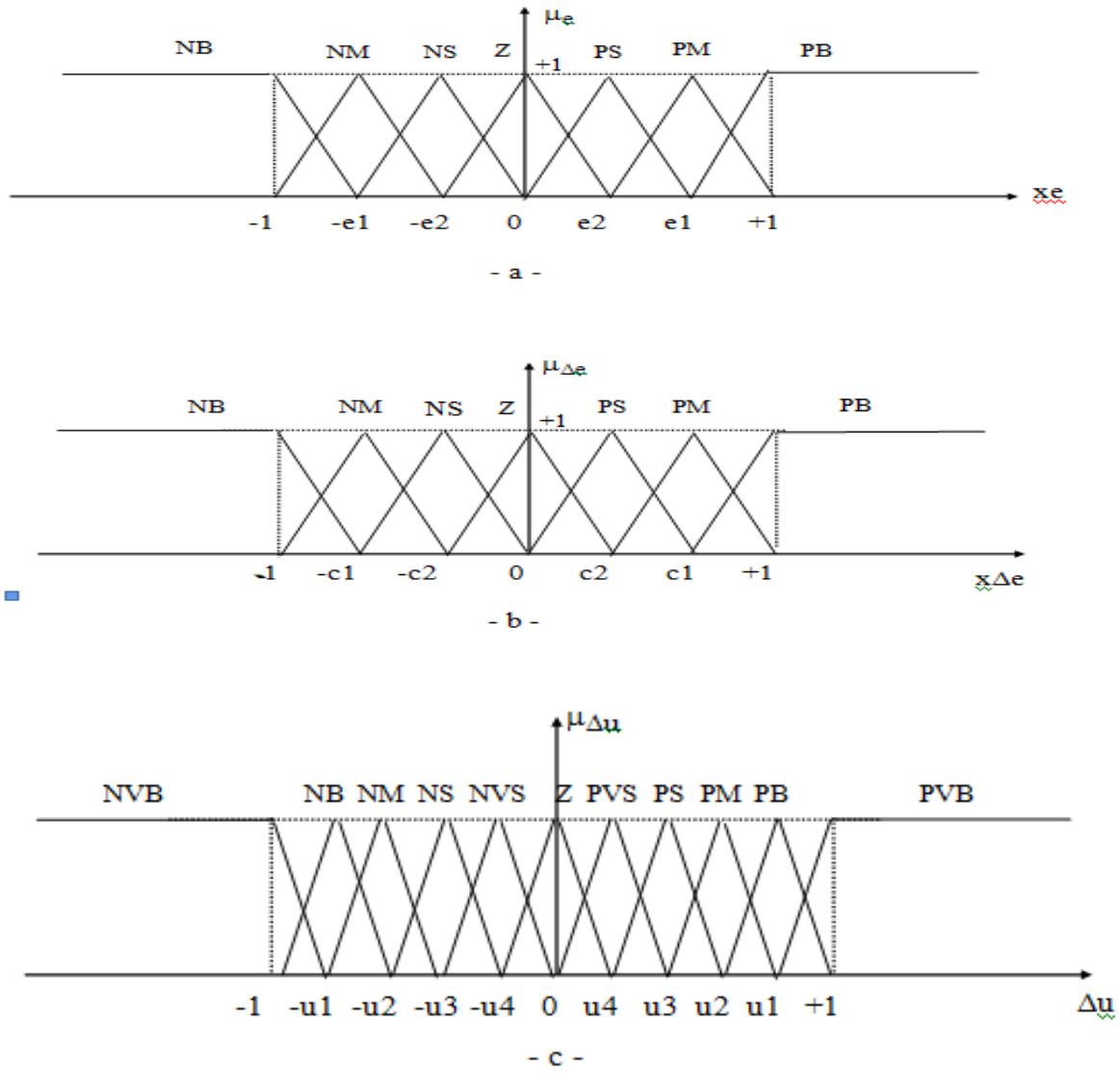


Fig.IV.4: Les fonctions d'appartenances des différentes variables linguistiques
-a-pour l'erreur-b-pour la variation de l'erreur-c-pour la variation de la commande

La loi de commande utilisée est la suivante :

$$U_{k+1} = U_k + G_{\Delta u}\, \Delta U_{k+1} \qquad \text{(IV.6)}$$

Où :

$G_{\Delta u}$: gain associé à la commande U_{k+1}

ΔU_{k+1} : variation de la commande.

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

$$Xe = \frac{e}{G_e} \qquad X\Delta e = \frac{\Delta e}{G_{\Delta e}} \tag{IV.7}$$

Où :

Ge, GΔe et GΔu représentent les gains d'adaptation et de normalisation. Ils jouent un rôle extrêmement important. En effet, ceux sont ces derniers qui fixeront les performances de la commande.

La base de règle est donnée par le tableau suivant :

Δe \ e	**NB**	**NM**	**NS**	**Z**	**PS**	**PM**	**PB**
NB	NVB	NVB	NB	NM	NS	NVS	Z
NM	NVB	NB	NM	NS	NVS	Z	PVS
NS	NB	NM	NS	NVS	Z	PVS	PS
Z	NM	NS	NVS	Z	PVS	PS	PM
PS	NS	NVS	Z	PVS	PS	PM	PB
PM	NVS	Z	PVS	PS	PM	PB	PVB
PB	Z	PVS	PS	PM	PB	PVB	PVB

Table. IV.1 Tableau des règles de décision floue (inférences).

Les classes sont notées comme suit :

(NVB) : Negative very big
(NB) : Negative big
(NM) : Negative médium
(NS) : Negative small
(NVS) : Negative very small
(Z) : Zero
(PVB) : Positive very big
(PB) : Positive big
(PM) : Positive médium
(PS) : Positive small
(PVS) : Positive very small

Les règles de commande s'écrivent comme suit :

Si (e est NB) et (Δe est NB) alors Δu est NVB

Ou

.

Si (e est Z) et (Δe est Z) alors Δu est Z

Ou

.

Ou

Si (e est PB) et (Δe est PB) alors Δu est PVB

Pour l'implication, on a utilisé la méthode de Mamdani.

La défuzzification se fait par la relation dite « des hauteurs pondérées». Donnée comme suit :

$$\Delta U = \frac{\sum_{i=1}^{n} Z_i^* . \mu_{\Delta u_i}}{\sum_{i=1}^{n} \mu_{\Delta u_i}} \qquad \text{(IV.8)}$$

Z^*_i : le centre de gravité de l'ensemble flou ΔU_i.

IV.5.5. Résultat de simulation

Les résultats de simulation reportés sur les figures suivantes concernent la commande de la chaine de conversion éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation à vitesse variable, avec l'application des échelons de référence des puissances actives et réactives. A travers les figures suivantes, nous observons que les grandeurs mesurées des

puissances actives et réactives suivent leurs valeurs de références, au vu de ces résultats, une meilleure poursuite des régulateurs flous à celle des régulateurs PI présentée au chapitre 03.

Le premier essai consiste à appliquer aux entrées des régulateurs un échelon de puissance active et un échelon de puissance réactive,

- Pour la puissance active :
  - De t=0s à t=0.3s : un échelon négatif de -1500W,
  - De t=0.3s à t=0.45s : un échelon négatif de -500W,
  - De t=0.45s à t=0.5s : un échelon négatif de -1500W,

  - Pour la puissance réactive :
  - De t=0s à t=0.3s : un échelon négatif de -500VAR
  - De t=0.3s à t=0.45s : un échelon positif de 500VAR
  - De t=0.45s à t=0.5s : un échelon négatif de -500VAR

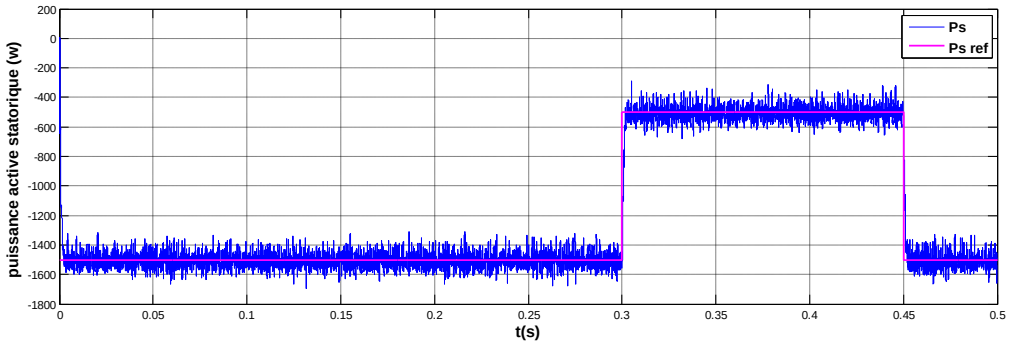


Fig .IV.5 : réglage puissance active statorique par **régulateur flou**

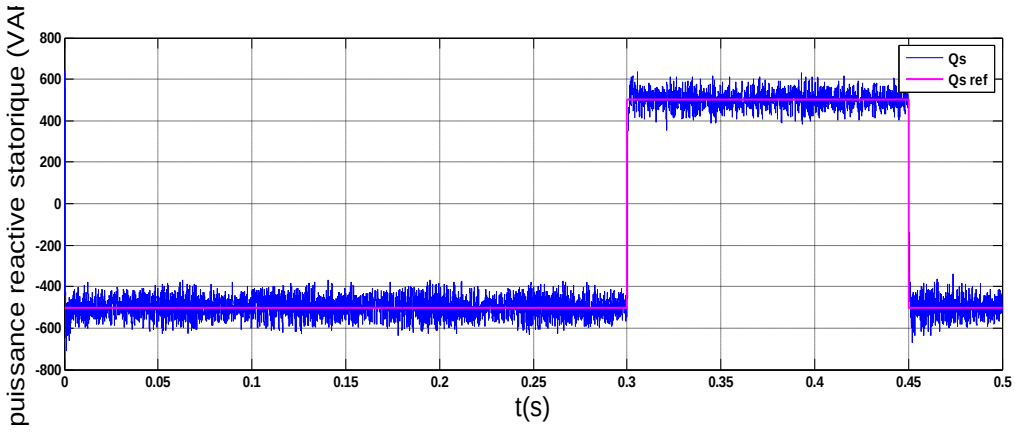


Fig .IV.6 : réglage puissance réactive statoriques par **régulateur flou**.

IV.6.Modélisation de la turbine éolienne :

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

IV.6.1 Modélisation de la turbine :

La figure (IV.7) montre le schéma d'une turbine éolienne.

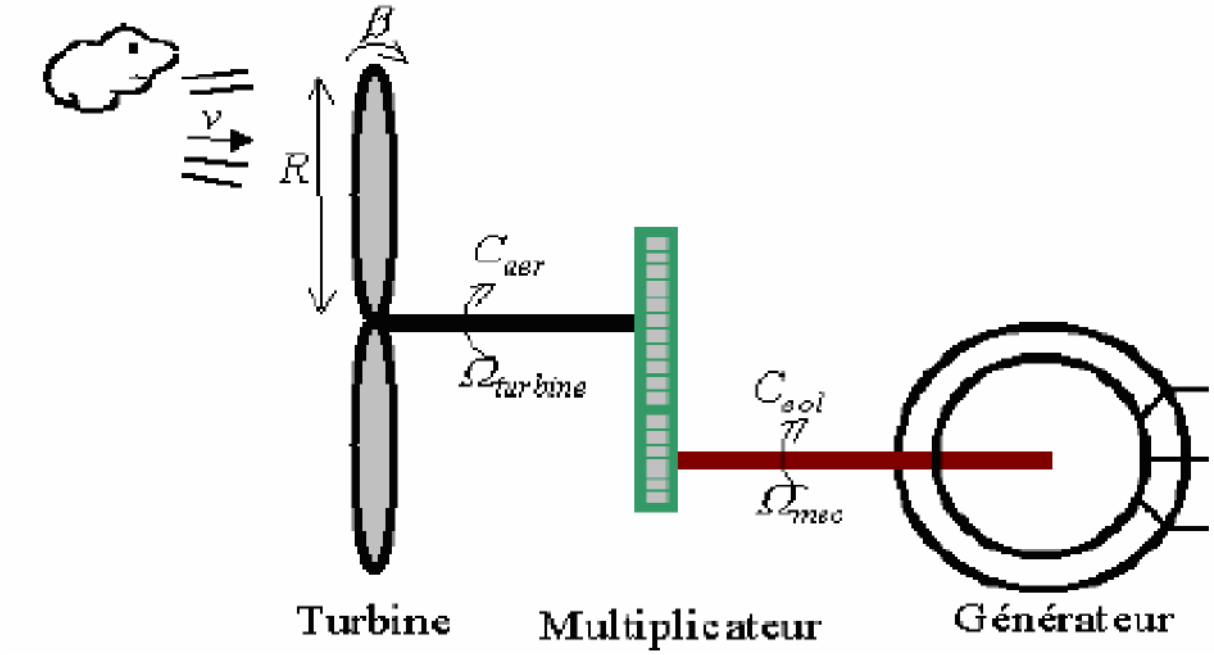


Fig .IV.7: *Schéma d'une turbine éolienne*

La puissance du vent est définie comme suit :

$$P_v = \frac{1}{2}\rho S V^3 \qquad \text{(IV.9)}$$

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors

$$P_{oer} = P_v . C_p = C_p(\lambda, \beta)\frac{1}{2}\rho S V^3 \qquad \text{(IV.10)}$$

Avec :

C_p: est le coefficient de performance ou coefficient de puissance

$$C_p(\lambda,\beta) = (0.44 - 0.0167\beta)\sin\left(\frac{\pi(\lambda-3)}{15-0.3\beta}\right) - 0.00184\,(\lambda-3)\beta \qquad \text{(IV.11)}$$

β: est l'angle d'orientation des pales.

λ:est le rapport de vitesse défini par :

$$\lambda = \left(\frac{\Omega_{tr} R}{V_{ve}}\right) \qquad \text{(IV.12)}$$

Ω_{tr}: vitesse de la turbine.

Le couple aérodynamique est donné par :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{tr}} \frac{1}{2\Omega_{tr}} C_p \rho S V^3 \qquad \text{(IV.13)}$$

IV.6.2 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur est modélisé mathématiquement comme suit :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \qquad \text{(IV.14)}$$

Avec :

C_g:Couple issu du multiplicateur.

C_{aer} :Couple aérodynamique.

Ggain du multiplicateur.

Pour la vitesse, on aura :

$$\Omega_{tr} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \qquad \text{(IV.15)}$$

IV.6.3 Equation dynamique de l'arbre

La modélisation de la transmission mécanique se résume donc comme suit :

$$j_t \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum descouples = C_{mec} \qquad \text{(IV.16)}$$

j_t: C'est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice

C_{mec} : C'est le couple mécanique, ce dernier prend en compte :

Cem :Le couple électromagnétique produit par la génératrice

C_{vis} : Le couple de frottement visqueux

Cg : et le couple issu du multiplicateur.

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad \text{(IV.17)}$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f **:**

$$C_{vis} = f\Omega_{mec} \quad \text{(IV.18)}$$

IV.6.4 Schéma bloc du modèle de la turbine

La figure (IV.8) montre le schéma bloc du modèle de la turbine.

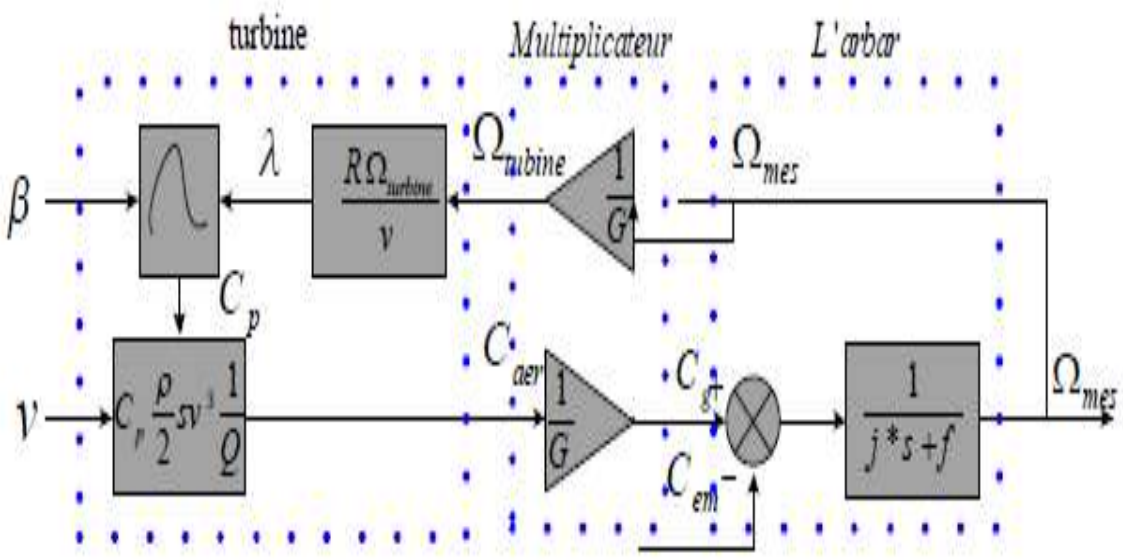


Fig.IV.8*: Schéma bloc du modèle de la turbine*

La turbine génère le couple aérodynamique (équation (IV.13)) qui est appliquée au multiplicateur.

Les entrées de la turbine sont :

v : La vitesse du vent.

β: L'angle d'orientation des pales.

Ω_{mec} : La vitesse de rotation de la turbine.

Le modèle de l'arbre d'écrit la dynamique de la vitesse mécanique il a donc deux entrées :

-Le couple du multiplicateur

-Le couple électromagnétique fourni par la génératrice.

La vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées :

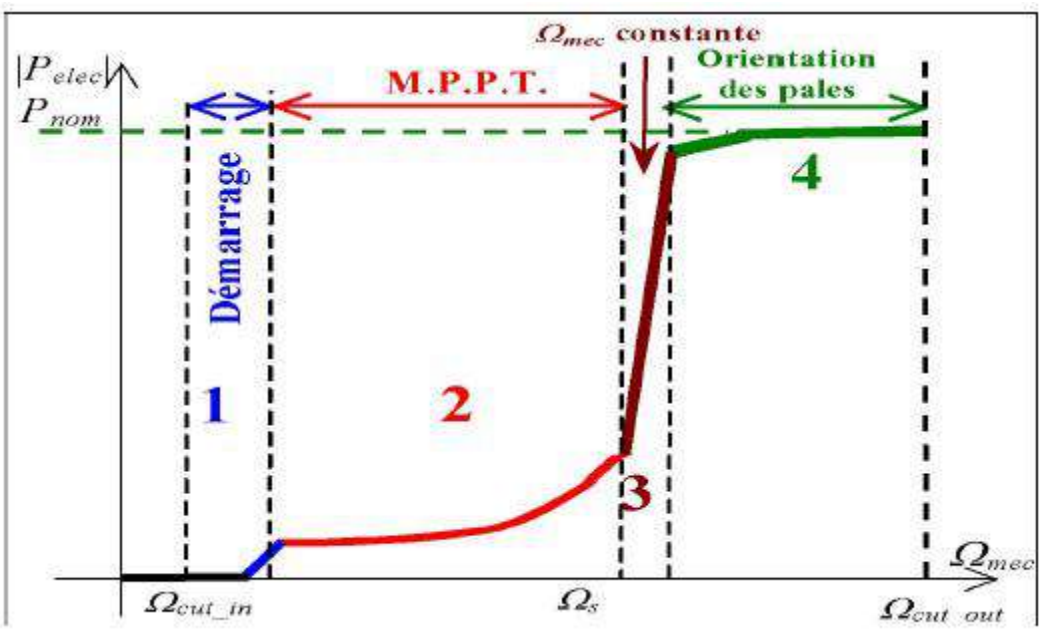
- L'angle de la pale

-Le couple électromagnétique de la génératrice

La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système.

IV.7.LES DIFFERENTES ZONES DE FONCTIONNEMENT DE L'EOLIENNE A VITESSE VARIABLE

Il y a quatre zones de fonctionnement pour un éolienne figure (IV.9)



FigIV.9: *Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne de grande puissance*

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

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

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

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

Par sécurité, si la vitesse du vent devient trop importante et risque d'endommager l'éolienne, l'angle de calage des pales se fixe à 90°. C'est la mise en drapeau qui met fin au fonctionnement de l'éolienne jusqu'à ce que la vitesse du vent devienne moins importante.

En pratique le passage de la zone 2 à la zone 4 est un peu particulier. En effet la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique Cem en zone 2 et, en zone 4 c'est la puissance qui doit être contrôlée par le dispositif d'orientation des pales.

Dans ce qui suit nous sommes intéressés à la zone 2 ou la maximisation de l'énergie électrique extraite (MPPT), cette opération est réalisée par le contrôle du couple électromagnétique générer.

IV.8.MAXIMISATION DE LA PUISSANCE EXTRAITE :

Cette structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas on obtient :

$$j_t \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad \text{(IV.19)}$$

Si on néglige l'effet du couple des frottements visqueux, on obtient :

$$C_g = C_{em} \quad \text{(IV.20)}$$

A partir de la mesure de la vitesse mécanique et la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent, on obtient :

$$C_{aer} = C_p \frac{\rho s}{2} \frac{1}{\Omega_{turbin\ -estim\ ée}} v^3_{estim\ ée} \quad \text{(IV.21)}$$

Avec :

$$v_{estim\ ée} = \frac{\Omega_{turbin\ -estim\ ée} R}{\lambda} \quad \text{(IV.22)}$$

On fixe le rapport de vitesse à la valeurλ_{cpmax} qui correspond au maximum du coefficient de puissance *C*p max et, en regroupant les équations précédentes, on aura l'expression du couple de référence qui est proportionnel au carré de la vitesse de la génératrice.

$$C_{mec-ref} = \frac{C_p}{\lambda^3 C_p} \frac{\rho \pi R^5}{2G^3} \Omega^2_{mes} \quad \text{(IV.21)}$$

La figure (VI.10) représente le schéma bloc de maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.

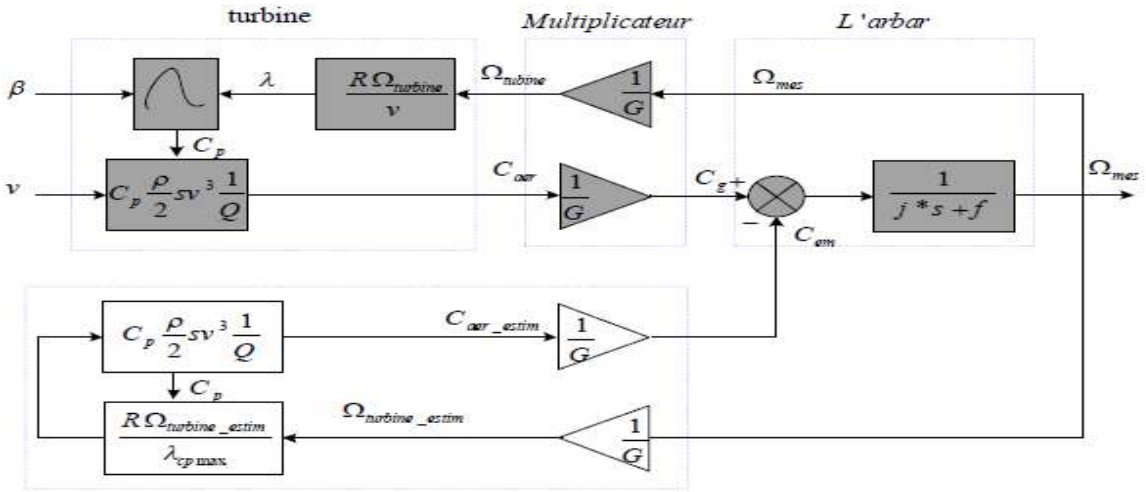


Fig.IV.10:*Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse*

La figure (IV.11) présente le profil du vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne ainsi que l'allure de la vitesse du rotor figure (IV.12). On suppose qu'à t=0,03s, la vitesse du vent atteint une valeur seuil 4m/s pour laquelle la MADA commence à produire de l'énergie. A partir de t=1s, la vitesse du vent aura une valeur moyenne de 12m/s

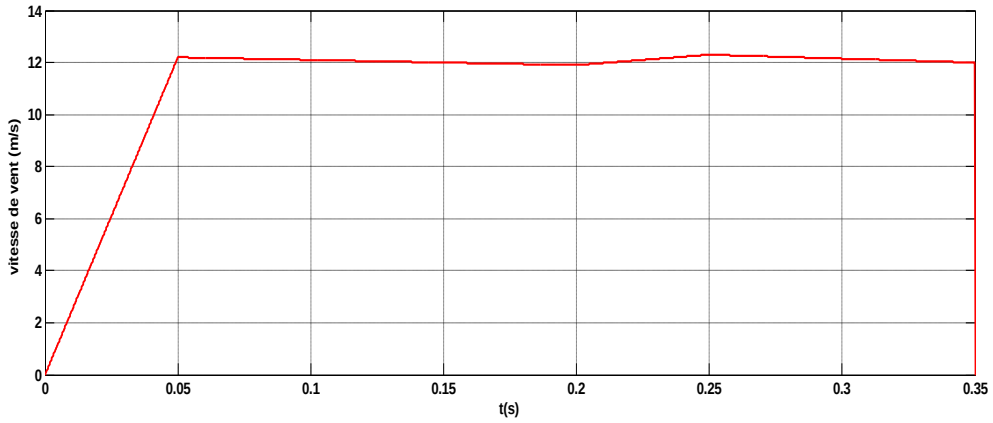


Fig.IV.11 : *Vitesse de vent (m/s)*

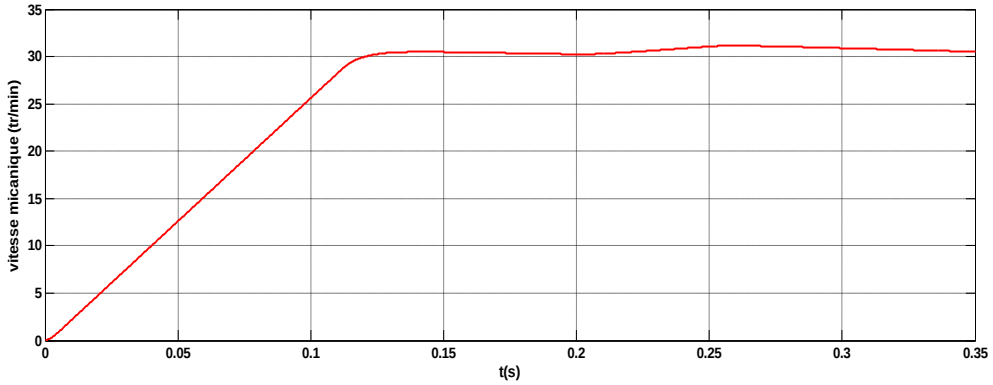


Fig.IV.12 :*La vitesse mécanique*

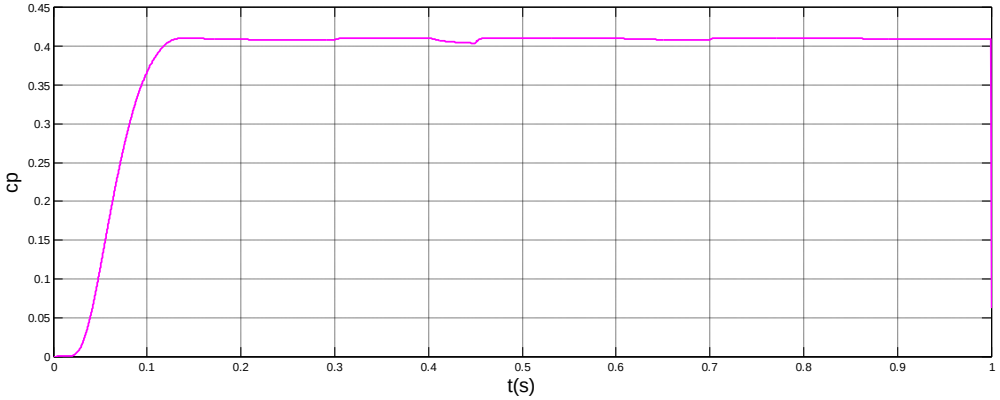


Fig.IV.13 : *Le coefficient de puissance*

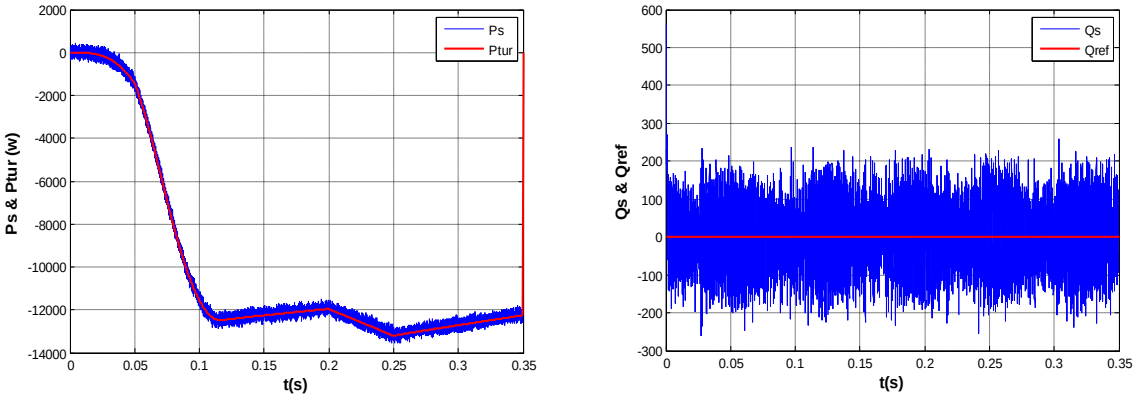


Fig.IV.14 : La puissance active et réactive statorique

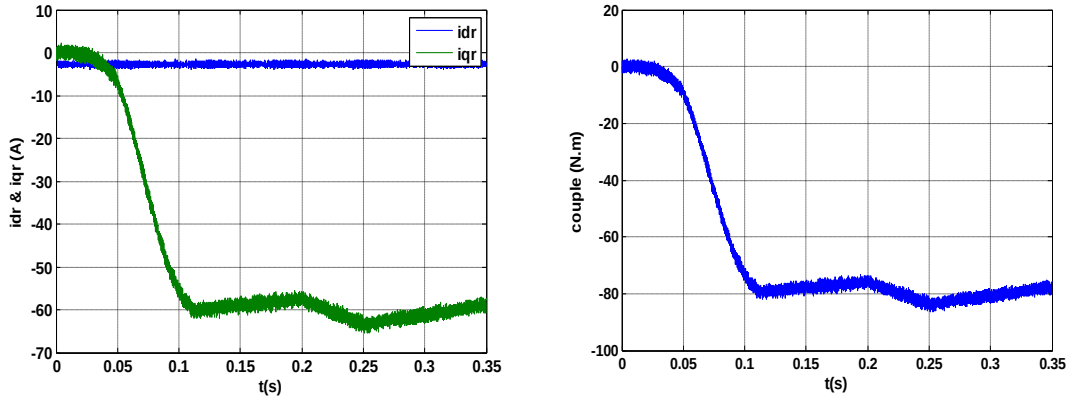


Fig.IV.15: Les courants rotorique idr, iqr et le couple .

Les résultats de simulation montrent que la variation de la puissance électrique figure (IV.14) est adaptée à la variation de la vitesse de la génératrice figure (IV.12), et cette dernière est adaptée à la variation de la vitesse du vent. Ceci montre l'influence de la variation de la vitesse mécanique en fonctionne de la vitesse du vent sur la puissance électrique produite.

IV.9.CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis d'avoir une vue générale sur les systèmes flous type-1. Nous avons montré comment appliquer cette théorie en vue de la conception d'un régulateur flou. Une simulation à base d'un contrôleur flou type-1 a été effectuée pour faire le réglage de la puissance active et réactive d'une machine asynchrone à double alimentation. Les résultats obtenus montrent que le régulateur flous type-1 présente des performances de poursuite très

satisfaisantes, il a amélioré la dynamique des puissances statoriques par rapport à celle du réglage par PI. En fin nous avons fait une comparaison entre les résultats obtenus des différentes commandes. On a étudié les différents éléments d'une éolienne utilisant un multiplicateur, ainsi que son principe de fonctionnement. Nous avons modélisé la turbine, par la suite nous l'avons associée à un système de conversion d'énergie constitué d'une machine asynchrone à double alimentation. Après avoir présenté les différentes zones de fonctionnement d'une éolienne, nous avons détaillé la zone particulière, où la maximisation de l'énergie extraite du vent est effectuée.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERAL

L'objectif principal de ce mémoire est l'étude d'une machine asynchrone à double alimentation dans une installation éolienne. Pour ce faire, dans le premier chapitre, on a présenté l'état de l'art sur l'éolienne et l'étude de vent plus les différents types d'éolienne et leurs utilisations.

La modélisation de la machine asynchrone à double alimentation était l'objectif du deuxième chapitre. La mise en équation des différentes grandeurs caractérisant la machine asynchrone double alimentation étudiées nous a permis d'établir un modèle mathématique équivalent dont la complexité a été réduite en se basant sur certaines hypothèses simplificatrices.

Les résultats de simulation de ce modèle sous Matlab/Simulink nous confirment la validité du modèle linéaire pour l'application envisagée de la machine. Dans Le troisième chapitre, pour une gestion efficace de la production d'énergie éolienne, il était pratique de raisonner en termes de puissances pour la commande de la MADA. Pour ce la, on applique le contrôle indépendant des puissances active et réactive statoriques en partant de la commande vectorielle de la MADA à flux statorique orienté.

Dans Le quatrième chapitre, un aperçu général sur la théorie de la logique floue et ses principes de base est présenté. Les résultats de l'utilisation de ce type de contrôleur présentent des performances intéressantes de la MADA dans un système éolien.

Enfin, après avoir présenté la modélisation de la turbine, un algorithme de maximisation de la puissance captée du vent a été mis en ouvre, ou on a supposé que la vitesse du vent varie légèrement au régime permanent. Le fonctionnement de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent été illustrée et la puissance est effectivement maximisée.

ANNEXE **II**

Les paramètres de la turbine

paramètre	signification
V = 12 m/s	La vitesse de vent
B = 0°	Angle de calage
P = 1.29 kg/m^3	La Masse volumique de l'aire
R = 35.25 m	Rayon de la pale
G = 90	Rapport de transmission du multiplicateur
f= 0.0024 N.m/rad	Coefficient de frottement visqueux du générateur

ANNEXE I

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

paramètres	signification
P = 1.5K W	Puissance nominale consommé
Ω = 1420 tr/min	Vitesse nominal
P = 2	Paire de poles
Rs = 4.85 Ω	Resistance statorique
Rr = 3.805 Ω	Resistance rotorique
Ls = 0.274 H	Inductance statorique
L r = 0.274 H	Inductance rotorique
M = 0.258 H	Inductance Mutuell
J = 0.031 kg.m^2	Inertie du rotor
f = 0.008 N.m/rad	Coefficient de frottement

REFERENCES BIBLIOGRAPHIE

[01] TELLI Abderrahim«Etude et commande d'une éolienne a vitessevariable intégréeaux réseauxmt»Mémoire de Magister,université des sciences et de la technologie d'Oran, 2012.

[02] Abdelfettah KERBOUA, «Régulation des puissances d'une éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau électrique », université de sidi-bel-abbes, 2012.

[03] Akkila BOUKHELIFA, « les éléments d'optimisation du pilotage d'une machine asynchrone en vue d'un contrôle vectoriel» Ecole nationale polytechnique, thèse de magister, 27/12/2007.

[04] LATRECHE Mohammed Tahar «Commande Floue de la Machine Synchrone à AimantPermanant (MSAP) utilisée dans un système éolien », Mémoire de Magister, de université de Sétif, 24 /06 /2012

[05] GHENNAM. Tarak « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation », Thèse de Doctorat, école nationale polytechnique, 29/09/2011.

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

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

[08] DNDOUGA Abdehakim «Contrôle de puissance active et réactive de la Machine Asynchrone à Double Alimentation»mémoire de Magister, université de BATNA,2008

[09] BOUMARAF Farid «Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle» mémoire de Magister, université de BATNA,2009

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

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

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

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

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

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

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

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

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

[19] KELKOUL Bahia, « etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une machine asynchrone à double alimentation» Thèse de Magister, Université de TLEMCEN, Algérie, 2011.

[20] S. Mekhtoub, « Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne» mémoire de Ingénieur d'Etat Ecole nationale polytechnique, 2007.

[21] Salah. BOULKHRACHEF« Analyse et commande d'un onduleur a cinq niveaux structure NPS application a la machine asynchrone commandée par logique flou », Thèse Magistère, école nationale polytechnique,2001 .