



République Algérienne Démocratique et
Populaire



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hamma Lakhdar El-oued

Département de Génie électrique

Spécialité : Commande électrique

MASTER ACADEMIQUE

Thème

***MODÉLISATION ET COMMANDE FLOUE
OPTIMISÉE D'UNE GÉNÉRATRICE À DOUBLE
ALIMENTATION***

Présentée par :

- LABSI ALI
- KENIOUA ABDEL FETTAH
- BENAMMAR ANOUAR

Encadré par :

- Dr. Guediri Abdel Karim

Année Universitaire : 2020/2021



Résumé

C'est la mémoire présente la commande de la machine asynchrone à double alimentation en mode génératrice (GADA) par des techniques de l'Intelligence Artificielle (IA), utilisée dans un système de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable. Donc dans ce travail, on s'intéresse particulièrement à l'application de la commande vectorielle indirecte par orientation du flux statorique à la GADA, basée sur les régulateurs de l'intelligence artificielle, tels que la logique floue. Ces derniers surpassent les limites des techniques classiques et possèdent des caractéristiques essentielles pour l'amélioration de la robustesse de la commande vectorielle. Des résultats de simulation sous Matlab/Simulink sont donnés afin de comparer les performances des deux régulateurs dans le contrôle de la GADA.

Mots clés : Eolienne ; Machine asynchrone à double alimentation (MADA); Commande vectorielle; Puissance active; Puissance réactive; Extraction de la puissance maximale (MPPT); Logique floue.

Abstract

This is the memory presents the control of the double fed induction machine in generating mode (DFIG) using Artificial Intelligence (AI) techniques, used in a variable speed Wind energy conversion system. In This work, we are particularly interested in the application of indirect vector control by stator Field orientation of DFIG, based on artificial intelligence controllers, such as fuzzy logic . The latter surpasses the limits of conventional techniques and possess essential characteristics for improving the robustness of the vector control. Matlab/Simulink simulation results are presented to compare the performance of the two controllers in the control of DFIG.

Keywords : Wind power, Doubly Fed Induction Générateur (DFIG), Vector control, Active power, Réactive power, Maximum Power Point Tracking (MPPT); Fuzzy logic.

المخلص

يقدم هذا العمل تقنية تحكم بواسطة منظم (logique floue) المعتمد على محرك لا متزامن ثنائي التغذية GADA مع سرعة متغيرة مطبقة على نظام تحويل طاقة الرياح ذو الطاقة المتوسطة والمجهز بمولد غير متزامن ثنائي الطاقة. تجد هذه التقنية أقوى تبرير لها مع مشاكل عدم اليقين في النموذج باستخدام قانون التحكم الغير خطي. الهدف هو تطبيق هذا الامر للتحكم في تبادل الطاقة النشطة والمتفاعلة التي تولدها الآلة غير المتزامنة مع مصدر طاقة مزدوج متصل بشبكة الجهد المتوسط من خلال العمل على إشارات الدوار عبر محول ثنائي الاتجاه. تظهر نتائج المحاكاة العددية التي تم الحصول عليها الاهتمام المتزايد بمثل هذا التحكم في الأنظمة.

كلمات مفتاحية : الرياح , مولدات ثنائية التغذية , المنطق الضبابي , الاستطاعة النشطة و الغير نشطة .

Remerciement

Avant tout nous remercions الله, le tout puissant de nous avoir donnés le courage, la volonté, la patience, et la santé durant toutes ces longues années d'études.

Mes sincères remerciements à tous les enseignants de L'université de El Oued notamment à nos encadreur **Dr. Guediri Abdel Karim** Berrabah Professeur à l'Université de El Oued et chef de département de génie électrique.

Ensuite nous remercions les membres du jury pour le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de nos travaux

Enfin, merci également à tous les collègues et tous les amis.

SOMMAIRE

I. Chapitre I : Modélisation et Simulation de La MADA.	
Introduction General	01
I.1.Introduction :	05
I.2 Présentation de MADA :	05
I.2.1 Construction d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation :	05
I.2.2 Description des composants de la MADA :	05
I.3. La double alimentation :	06
I.4.Structure de la MADA	06
I.4.1.MADA à rotor bobiné	06
I.4.2.MADA sans balais :	07
I.4.3.MADA en cascade :	07
I.5.Mode de fonctionnement	07
I.5.1.Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone	07
I.5.2.Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone	08
I.5.3.Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone :	08
I.5.4.Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone :	09
I.6.Les différentes configurations de la MADA à rotor bobiné.....	09
I.6.1.Configuration pour application en génératrice	09
I.6.1.1.MADA à énergie rotorique dissipée.....	10
I.6.1.2.Structure de KRAMER	10
I.6.1.3.Structure de SCHERBIUS avec cyclo convertisseur :	11
I.6.1.4.Structure de SCHERBIUS avec convertisseurs MLI :	11
I.7. Avantages et inconvénients de la MADA :	12
I.7.1.Avantages de la MADA :	12
I.7.2 Inconvénients de la MADA :	12
I.8. Application des machines asynchrones à double alimentation :	13
I.8.1 Application moteur :	13
I.8.2 Application génératrice :	13
I.9.Modélisation de la MADA :	13
I.9.1 Hypothèses simplificatrices :	13
I.9.2.Equations mathématiques de la MADA dans le repère (a, b, c).....	14

I.9.2.1. Equations électriques.....	14
I.9.2.2. Equations magnétiques	14
I.10. Application de la transformation de Park à la GADA	15
I.10.1 Représentation de la GADA dans repère biphasé (dq)	15
I.10.1.1. Equations électriques.....	16
I.10.1.2. Equations magnétiques.....	16
I.10.1.3. Equations électriques sous forme matricielle.....	16
I.10.1.4. Expression de la puissance active et réactive	17
I.10.1.5. Expression du couple électromagnétique.....	18
I.11. Conclusion	20
II. Chapitre II Modélisation d'une Centrale Éolienne	
II.1. Introduction :	22
II.2. Modélisation du vent.....	22
II.3. Modélisation d'une turbine éolienne à axe horizontal	23
II.3.1. Hypothèse simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine.....	23
II.3.2. Modélisation de la turbine :.....	24
II.3.3. Modèle du multiplicateur.....	25
II.3.4. Equation dynamique de l'arbre	25
II.4. Modèle de la turbine en MATLAB/SIMULINK :.....	27
II.5. Stratégie de commande de la turbine :.....	27
II.6. Maximisation de la puissance extraite :.....	28
II.6.1. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse.....	29
II.7. Résultats de Simulation et interprétations.....	30
A. Profil du vent :.....	31
B. Le coefficient de puissance :.....	32
C. La puissance électrique et la Vitesse mécanique :.....	32
II.8. Conclusion :.....	33

CHAPITRE III

Etude et Modélisation d'un système éolien par logique floue base de MADA

III.1. Introduction :	35
III.2 Historique de la Logique Floue :	35
III.3 Principe de la Logique Floue :	35
III.4 Théorie des ensembles flous	36
a) Notion d'appartenance partielle	36
b) Fonctions d'appartenance	36
c) Opérateurs logiques flous.	37
III.5. Structure d'un régulateur flou :	38
- Fuzzification	38
- Moteur d'inférence floue	38
- Base de connaissances (règles).	39
- Défuzzification.	39
III.6. Command par logique flou :	39
III.6.1 Ensembles flous (Fonctions d'appartenance)	41
III.6.2 Inférence floue	42
III.6.3 Défuzzification.	43
III.7. Réglage des courants rotoriques de la MADA :	44
III.8. Résultats de simulation	44
III.9. Tests de robustesse :	47
III.10. Conclusion :	49

Tableau des figures

Chapitre I : Modélisation et Simulation de La MADA.		
Figure I.1.	Représentation de la machine asynchrone à double alimentation	05
Figure I.2	Schéma du rotor de la MADA à rotor bobiné.	06
Figure I.3	Structure de la MADA sans balais	07
Figure I.4	Structure en cascade de deux machines asynchrones	07
Figure I.5	Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone	08
Figure I.6	Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.	08
Figure I.7	Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.	09
Figure I.8	Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone	09
Figure I.9	MADA à énergie rotorique dissipée	10
Figure I.10	MADA à structure de KRAMER	10
Figure I.11	Structure de SCHERBIUS avec cyclo convertisseur	11
Figure I.12	Structure de SCHERBIUS avec convertisseurs MLI.	11
Figure I.13	Représentation simplifié de la MADA	14
Figure I.14	Schémas de Transformation des variables statoriques et rotoriques.	15
Figure I.15	schéma bloc de GADA	18
Figure I.16	Courbe de la puissance active	18
Figure I.17	Courbe de la puissance réactive.	19
Figure I.18	Courbe du courant rotorique	19
Figure I.19	Courbe du courant statorique	19
Figure I.20	Courbe de la couple	20
Chapitre II Modélisation d'une Centrale Éolienne		
Figure. II.1	Schéma de la turbine éolienne	22
Figure II.2	Profile du vent pour une durée de 500 s	23
Figure. II.3	Modèle mécanique simplifié de la turbine	24
Figure II.4	Modele d'un turbine eolienne	24
Figure. II.5	Schéma électrique équivalent de la turbine d'une éolienne	26
Figure. II.6	Modèle d'une turbine éolienne	26
Figure. II.7	Modèle en bloc de la turbine	27

Figure. II.8	Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne	27
Figure. II.9	Stratégies de commande de la turbine	28
Figure. II.10.a	Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse	29
Figure. II.10.b	Modèle de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse en MATLAB/SIMULINK	30
Figure. II.11	Modèle de la turbine avec la Commande en MATLAB/SIMULINK	30
Figure. II.12	Modèle éclaté de la turbine éolienne Sous Matlab/Sumilnk	31
Figure. II.13	Profil du vent	31
Figure. II.14	Coefficient de puissance avec un zoom	32
Figure. II.15	Vitesse mécanique	32
Figure. II.16	Couple et Puissance électrique produite	33

CHAPITRE III

Etude et Modélisation d'un système éolien par logique floue base de MADA

Figure III.1	Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble	36
Figure III.2	fonction caractéristique	37
Figure III. 3	fonction d'appartenance	37
Figure III 4	fonction d'appartenance, variable et termes linguistiques	37
Figure III.5	configuration d'un contrôleur flou.	38
Figure III.6	défuzzification par centre de gravité	39
Figure III.7 :	Schéma bloc la commande vectoriel d'un régulateur flou des puissances active et réactive	40
Figure III.8	Schéma synoptique d'un régulateur flou des puissances active et réactive	40
Figure III.9	Ensembles flous de l'erreur, la variation d'erreur et de la commande	41
Figure III.10	Schéma bloc global de la commande floue.	44
Figure III.11	Couple électromagnétique	45
Figure III.12	Les courants directs et quadrature rotoriques.	45
Figure III.13	Les courants directs et quadrature statorique.	46
Figure III.14	Puissance active (W) et Puissance réactive (VAR) statorique	46
Figure III.15	Courant triphasé statoriques	46
Figure III.16	Courant triphasé rotorique	46
Figure III.17	Courant par phase statoriques	47
Figure III.18	Courant par phase rotorique	47
Figure III.19	Le courant et la tension statoriques avec zoom	47

Figure III.20	Couple électromagnétique	48
Figure III.21	Les courants directs et quadrature rotoriques.	48
Figure III.22	Les courants directs et quadrature statorique.	48
Figure III.23	Puissance active (W) et Puissance réactive (VAR) statorique	49
Figure III.24	Courant triphasé statoriques	49
Figure III.25	Courant par phase statoriques et rotorique	49
Figure III.26	Le courant et la tension statoriques et rotorique	50
Tableau.III.1	Matrice d'inférence du régulateur flou pour 5 sous-ensembles Flous	43

Liste de symbole

V_1, V_2	Vitesse du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne
ρ	Densité de l'air à 15°C
m	Masse d'air traversant le rotor éolien en 1s
R	Rayon de la turbine
S	Surface balayée par le rotor de l'éolienne
V	Volume balayée par le rotor de l'éolienne
$P_{aér}$	Puissance extraite par le rotor éolien (aérodynamique)
P_v	Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé
C_p	Coefficient de puissance de l'éolienne
λ	Vitesse relative de l'éolienne
β	Angle de calage des pales de la turbine
Ω_1, Ω_2	Vitesse de rotation de l'éolienne respectivement avant et après le multiplicateur
Ω_s	La vitesse de synchronisme
$\Omega_{turbine}$	Vitesse de la turbine
$\Omega_{turbine_estimée}$	Vitesse mécanique estimée de la turbine
Ω_{mec}	Vitesse mécanique
v	Vitesse du vent
$v_{estimée}$	Vitesse du vent estimée
G	Rapport de multiplication
$J_{turbine}(kg.m^2)$	Moment d'inertie de la turbine
$J_g(kg.m^2)$	Moment d'inertie du rotor de la génératrice
$J(kg.m^2)$	Moment d'inertie totale
$J_{pale}(kg.m^2)$	Moment d'inertie de pale
$J_h(kg.m^2)$	Moment d'inertie de l'arbre
Kb	Elasticité de pale
Kh	Elasticité de l'arbre

Dh	Coefficient de frottement de l'arbre par rapport au multiplicateur
dg	Coefficient de frottement du rotor de la génératrice
f_{pale}	Coefficient de frottement par rapport au support
f	Coefficient de frottement visqueux
db	Coefficient de frottement de pale par rapport à l'air
$\dot{\beta}_{b1}, \dot{\beta}_{b2}, \dot{\beta}_{b3}$	Les vitesses d'orientation de chaque pale
T_{b1}, T_{b2}, T_{b3}	La force de pale dépend de la vitesse de vent appliquée
$E[J]$	L'énergie cinétique
$E_v[J]$	L'énergie cinétique de vent
$C_{aer}[N.m]$	Couple aérodynamique de l'éolienne
$C_{mec}[N.m]$	Couple mécanique total appliqué au rotor de l'éolienne
$C_{vis}[N.m]$	Couple des frottements visqueux
$C_{em}[N.m]$	Couple électromagnétique
$C_{em_ref}[N.m]$	Couple électromagnétique référence
$C_{aer_estimé}[N.m]$	Couple aérodynamique estimé
θ	Angle entre l'axe de la phase du premier enroulement statorique et l'axe du rotor.
θ_s	Angle entre l'axe de la première phase de l'enroulement statorique et l'axe d
θ_r	Angle entre l'axe de la première phase du rotor et l'axe d.
θ_{coord}	Angle coordonnée
$E_r [V]$	f e m au rotor
$E_s [V]$	f e m au stator
ω	Vitesse de rotation électrique ($\omega = p\Omega$)
ω_s	Pulsation électrique statorique
ω_r	Pulsation électrique rotorique
ω_m	La pulsation mécanique de la machine
N_r	Le nombre de spires de bobinage rotorique
N_s	Le nombre de spires de bobinage statorique
$S_s[VA]$	La puissance apparente au stator
$S_r[VA]$	La puissance apparente au rotor
$P_s[W]$	La puissance active au stator
$P_r[W]$	La puissance active au rotor

$Q_s[VAR]$	La puissance réactive au stator
$Q_r[VAR]$	La puissance réactive au rotor
g	Glissement
$[L_{rr}]$	Matrice d'inductance rotorique
$[M_{sr}]$	Matrice inductance mutuelle stator-rotor (influence du rotor sur le stator)
$[M_{rs}]$	Matrice inductance mutuelle rotor-stator (influence du stator sur le rotor)
$[V_s]$	Vecteur tension statorique
$[V_r]$	Vecteur tension rotorique
$[I_s]$	Vecteur courant statorique
$[I_r]$	Vecteur courant rotorique
$[\varphi_s]$	Vecteur flux statorique
$[\varphi_r]$	Vecteur flux rotorique
$V [V]$	Tension
$I [A]$	Courant
$\phi [Wb]$	Flux
$M [H]$	Inductance mutuelle maximale lorsque l'axe A coïncide avec l'axe a ($\theta=0$)
$l_s [H]$	Inductance propre de chaque enroulement du stator
$l_r [H]$	Inductance propre de chaque enroulement du rotor
$M_s[H]$	Inductance mutuelle entre deux phases statorique
$M_r[H]$	Inductance mutuelle entre deux phases rotorique
L_s	Inductance de chaque enroulement du stator
L_r	Inductance de chaque enroulement du rotor
R_s	Résistance de chaque enroulement du stator
R_r	Résistance de chaque enroulement du rotor
$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$	Flux statorique selon l'axe d,q
$\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$	Flux rotorique selon l'axe d,q
V_{sd}, V_{sq}	Tension statorique selon l'axe d,q
V_{rd}, V_{rq}	Tension rotorique selon l'axe d,q
I_{sd}, I_{sq}	Courant statorique selon l'axe d,q
I_{rd}, I_{rq}	Courant rotorique selon l'axe d,q

s	Opérateur dérivé de Laplace
p	Nombre de paire de pole de la MADA
P_m	Puissance mécanique
f_r	Fréquence de rotor
f_s	Fréquence de stator
k_p, k_i	Constantes du régulateur PI
τ_r	Temps de réponse du système

Sigles utilisés

MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
FTBO	Fonction de Transfer en Boucle Ouvert
FTBF	Fonction de Transfer en Boucle Fermée
PI	Proportionnel - Intégrale

INTRODUCTION GÉNÉRAL

L'éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et ainsi la puissance mécanique obtenue, est transformée soit en puissance hydraulique par une pompe, soit en puissance électrique par une génératrice

Deux types de machines électriques peuvent être utilisés dans l'industrie des éoliennes (système aérogénérateur) :

- Machines synchrones,
- Machines asynchrones (simple alimentation : MAS ou double alimentation : MADA).

Dans notre étude nous s'intéresserons à la machine asynchrone double alimentation.

L'échauffement différentiel de la surface terrestre par le soleil entraîne le déplacement d'importantes masses d'air sur la terre, c'est-à-dire le vent. Les systèmes de conversion de l'énergie éolienne transforment l'énergie cinétique du vent en électricité ou en d'autres formes d'énergie. La production d'énergie éolienne a connu une croissance extraordinaire au cours de la dernière décennie, car cette énergie est reconnue comme étant un moyen économique de produire de l'électricité.

L'hélice d'une éolienne entre en rotation par la force du vent et permet ainsi la production d'énergie mécanique ou électrique, en tout lieu suffisamment venté. Les applications de l'énergie éolienne sont variées mais la plus importante consiste à fournir de l'électricité.

Pour cela, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart ils utilisent des machines asynchrones à double alimentation (MADA).

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'à l'étude de l'énergie et les différents types de génératrices. La dernière partie de ce chapitre illustrera les différentes structures des machines asynchrones à double alimentation, leur principe de fonctionnement, leurs applications et leur intérêt.

La logique floue, ou plus généralement le traitement d'incertitudes, est l'une des classes de l'intelligence artificielle.

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

Dans Le premier chapitre, on présentera construction de la MADA, sont principe de fonctionnement, ses variantes de fonctionnement. Ainsi l'étude de la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation. Des hypothèses simplificatrices nous faciliteront sa mise en équation permettra de simuler sont modèle pour le mode générateur.

Dans le deuxième chapitre seront abordées ; par la modélisation de la turbine. Des hypothèses simplificatrices nous faciliteront sa mise en équation pour ensuite valider son modèle et présente les résultats par la simulation sous l'environnement MATLAB/

SIMULINK, L'élaboration d'une commande adéquate pour le captage maximum de puissance disponible.

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

Enfin, ce travail sera terminé par une conclusion générale et quelques perspectives de recherche envisagées

Chapitre I

**Modélisation et Simulation
de La MADA.**

I.1. Introduction :

La plupart des génératrices utilisées dans les systèmes de génération d'énergie éolienne sont des génératrices asynchrones. Elles sont robustes, leur coût est relativement faible. Il existe deux types de machines asynchrones : les machines asynchrones à cage d'écureuil et les machines asynchrones à rotor bobiné.

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné, la plus utilisée dans les éoliennes tournant à une vitesse variable, en partant d'un certain nombre hypothèses simplificatrices pour la modélisation mathématique de la machine, ainsi que ces modes de fonctionnement en mode génératrice.

I.2 Présentation de MADA :

I.2.1 Construction d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation :

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasés classiques (asynchrone à cage ou synchrone), constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements [1].

L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne (figure I.1)

Cette machine peut fonctionner comme générateur ou moteur. Le stator de la MADA est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un convertisseur.

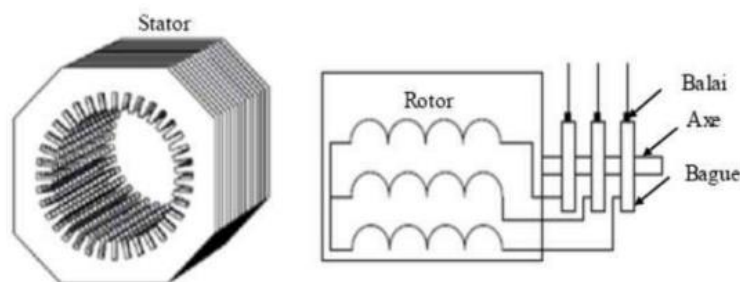


Figure I.1. Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.

I.2.2 Description des composants de la MADA :

Le circuit statorique est directement connecté au réseau. Le circuit rotorique est quant à lui relié au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. La partie convertisseurs de puissance est principalement constituée par :

- Un redresseur : C'est le convertisseur côté rotor qui permet de contrôler le couple électromagnétique T_g et la puissance réactive Q_s échangée entre le stator et le réseau ;
- Un bus continu.

- Un onduleur : C'est le convertisseur côté réseau qui contrôle la tension (bus continu) et la puissance réactive Q_R échangée entre le rotor et le réseau. Les convertisseurs sont bien évidemment commandés en MLI (PWM). [2]

I.3. La double alimentation :

L'une des solutions associant le convertisseur statique et la machine pour obtenir des vitesses variables est la machine asynchrone double alimentée (machine à induction double alimentée), (de l'anglais, DFIM : Doubly Fed Induction Machine), où le stator est connecté au réseau (50 HZ) et le rotor est alimenté à travers un convertisseur de fréquence. Elle apparaît comme une solution intéressante. Le système est réversible en vitesse et en couple, dans tous les cas, les vitesses hypo-synchrones et hyper-synchrones sont possibles et le système peut être utilisé dans le fonctionnement moteur et générateur. Ces caractéristiques favorisent l'utilisation de cette machine dans les processus industriels spéciaux demandant une haute performance dynamique. Elle a été déjà utilisée dans applications générales de haute puissance comme les laminoirs d'acier ou de fer, aussi bien que dans les applications de production d'énergie électrique où elle a donné des résultats satisfaisants [3].

La double alimentation concerne les machines à courant alternatif ayant des enroulements statoriques et rotoriques biphasés ou triphasés. On utilise généralement le moteur asynchrone à rotor bobiné [4].

Dans les moteurs à double alimentation est appliquée (recueillie) au niveau des enroulements du stator et du rotor. Les enroulements statorique sont directement alimentés par le réseau, alors que ceux du rotor sont alimentés à travers un régulateur de fréquence [4].

I.4. Structure de la MADA

Selon la conception du rotor, plusieurs types de machines asynchrones à double alimentation ont été envisagés. On va décrire les plus utilisés dans l'industrie.

I.4.1. MADA à rotor bobiné

La machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné est composée, comme toute machine à courant alternatif, d'un stator et d'un rotor. Le stator est identique à celui d'une machine asynchrone classique. Le rotor est constitué d'enroulements triphasés connectés en étoiles dont les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants. [10]

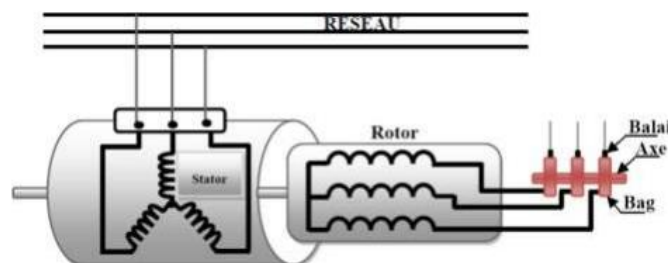


Figure I.2 : Schéma du rotor de la MADA à rotor bobiné.

Cette machine est très proche à la précédente, sauf que cette fois ci les deux enroulements statoriques appartiennent à un circuit magnétique commun. Le rotor est commun et à cage d'écureuil.

I.4.2.MADA sans balais :

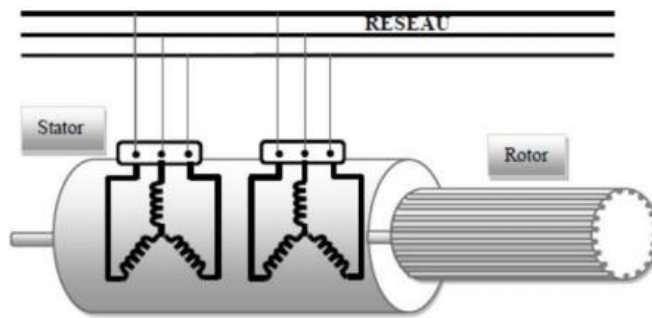


Figure I.3 : Structure de la MADA sans balais

I.4.3.MADA en cascade :

La structure de la MADA en cascade est définie par deux machines asynchrones dont les rotors sont couplés électriquement et mécaniquement. Cette structure permet d'avoir un système à double alimentation côté stator. Les enroulements statoriques sont reliés à deux sources de tension triphasées [11].

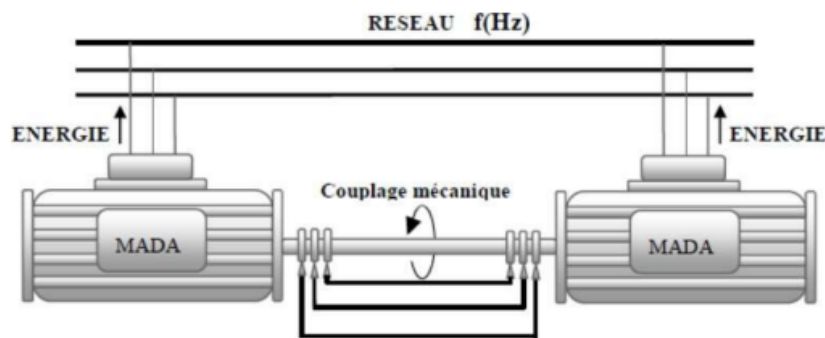


Figure I.4 : Structure en cascade de deux machines asynchrones

I.5.Mode de fonctionnement

Comme la machine asynchrone à cage, la MADA fonctionne en moteur et en générateur, la différence réside dans le fait que pour la MADA ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement. Dans le cas d'une 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 fonctionnement en hyper ou hypo synchrone aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [16]. Cette propriété fondamentale a fait de la MADA le choix par excellence des entraînements à vitesse variable et surtout ces dernières années pour la génération d'énergie éolienne à vitesse variable.

I.5.1.Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

- Le fonctionnement de la MADA en moteur.
- La puissance P_s est fournie par le réseau au stator de cette dernière.
- La vitesse de rotation est inférieure à celle du synchronisme.
- La puissance de glissement P_r transite à travers les deux convertisseurs pour être réinjectée au réseau (Fig. I.5).

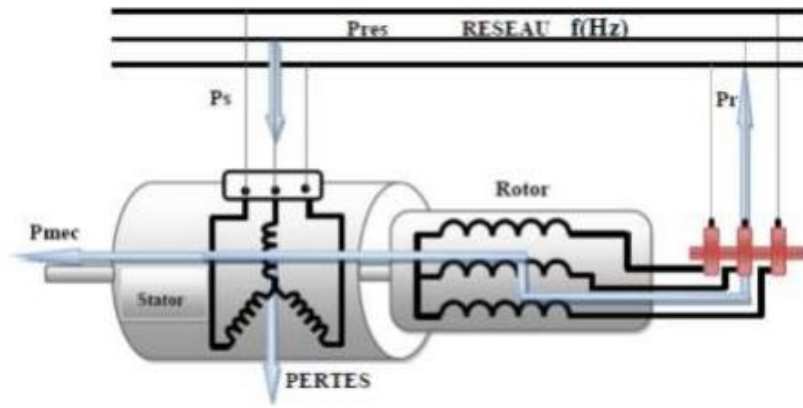


Figure I.5 : Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.

I.5.2.Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

- Le fonctionnement de la MADA en moteur.
- Le réseau fournit la puissance au stator et au rotor de la MADA.
- La puissance de glissement transite par les deux convertisseurs pour être absorbée par le rotor de la MADA entraînant par ceci un fonctionnement du moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme.
- Le champ tournant induit par les enroulements rotoriques est alors en opposition de phase avec celui du stator (Fig. I.6).

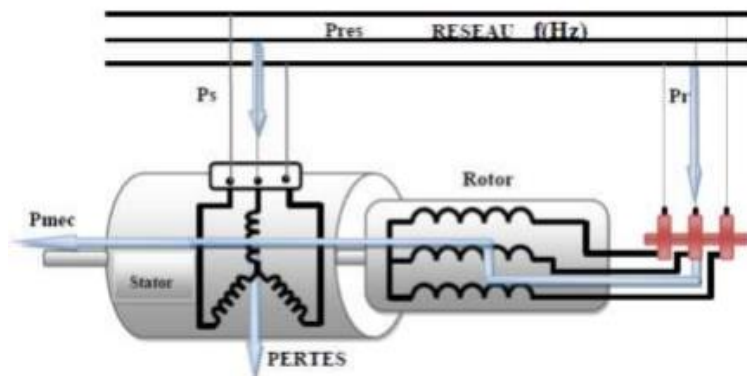


Figure I.6 : Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.

I.5.3.Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone :

- Le fonctionnement de la MADA en génératrice,
- La turbine fournit une puissance mécanique P_{mec} à la machine.
- Une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor (Fig.I.7)

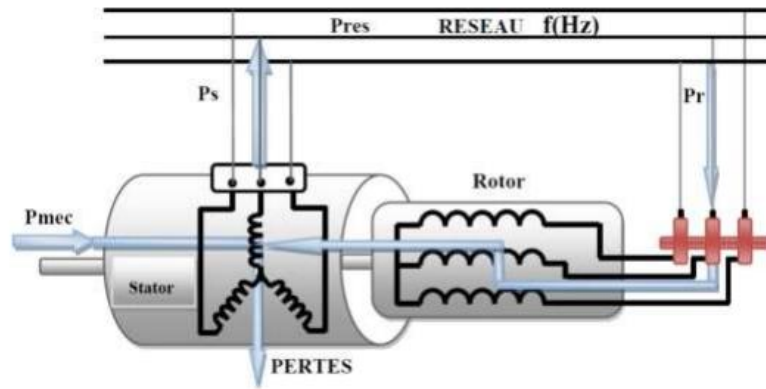


Figure I.7 : Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.

I.5.4.Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone :

- Le fonctionnement de la MADA en génératrice.
- La totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près.
- Une partie de cette puissance correspondant à $g/(1 - g) P_{mec}$ est transmise par l'intermédiaire du rotor (Fig. I.8).

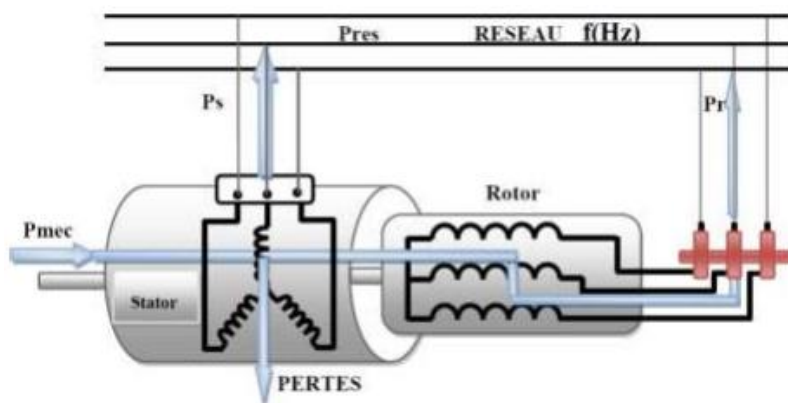


Figure I.8 : Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone

I.6.Les différentes configurations de la MADA à rotor bobiné

Le mode de fonctionnement de la MADA aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur est imposé par la commande des tensions rotoriques. Chaque mode est caractérisé par une configuration qui répond à un critère choisi. Les différentes configurations les plus utilisées dans les aérogénérateurs pour un fonctionnement en mode génératrice sont présentées ci-dessous.

I.6.1.Configuration pour application en génératrice

Le mode générateur est le mode idéal pour l'utilisation d'une MADA, puis qu'elle permet d'avoir une plage de vitesse de rotation variant entre $\pm 30\%$ de la vitesse du synchronisme. De plus, le contrôle des tensions rotoriques permet de contrôler les puissances actives et réactives produites, et de faciliter ainsi sa commande. [11]

Généralement, le stator de la MADA est connecté directement au réseau et son rotor est alimenté de différentes façons que nous allons montrer dans ce qui suit.

I.6.1.1.MADA à énergie rotorique dissipée

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la (Fig.I.9), 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.

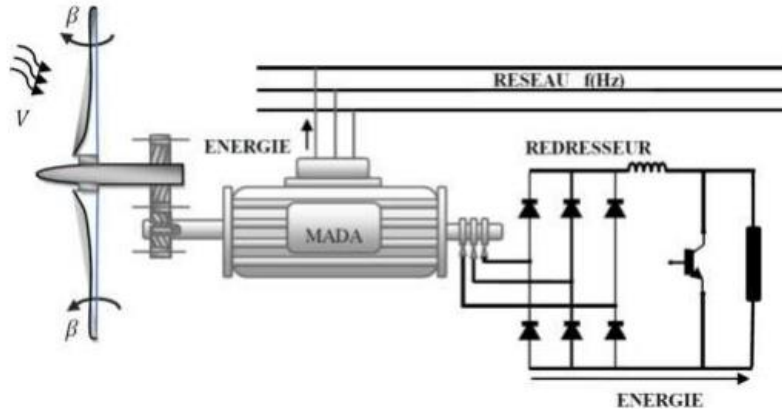


Figure I.9 : MADA à énergie rotorique dissipée.

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 transmise dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance.[13]

I.6.1.2.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 (Fig. I.10) [5]

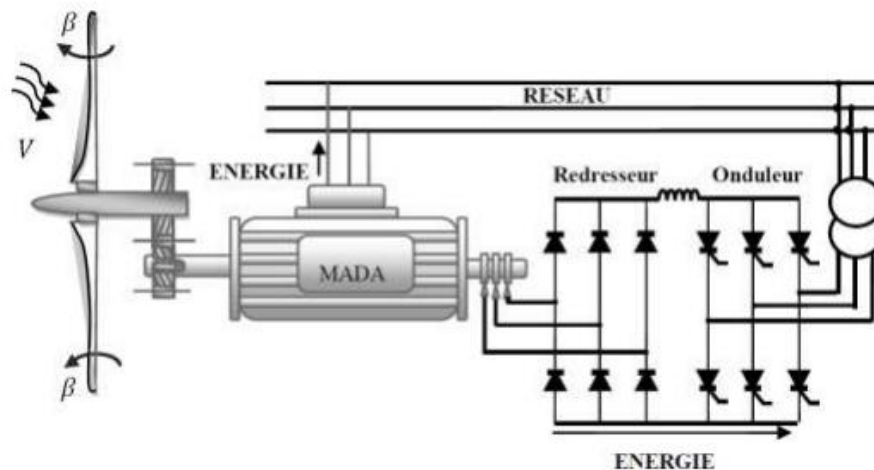


Figure I.10 : MADA à structure de KRAMER

L'ensemble « redresseur-onduleur » est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Comme dans le cas de la machine sans balais, 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. [14]

I.6.1.3. Structure de SCHERBIUS avec cyclo convertisseur :

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur onduleur peut être remplacée par un cyclo convertisseur (Figure IV.11), l'ensemble est alors appelé structure de SCHERBIUS. Comme le flux de la puissance est bidirectionnel, il est possible d'augmenter ou de diminuer l'énergie de glissement et ainsi faire fonctionner la machine en génératrice ou en moteur [8]. 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 cyclo convertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés en MLI.

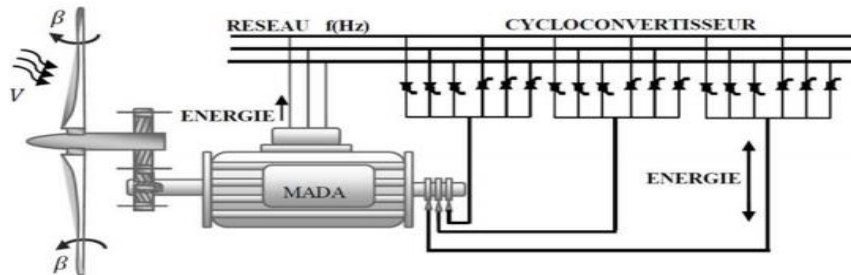


Figure I.11 : Structure de SCHERBIUS avec cyclo convertisseur.

I.6.1.4. Structure de SCHERBIUS avec convertisseurs MLI :

Le progrès de l'électronique de puissance permet d'avoir des interrupteurs qui peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture comme les IGBT's avec une fréquence de commutation importante. L'utilisation des convertisseurs à base de ce type d'interrupteurs permet le rejet des premiers harmoniques vers les fréquences élevées ce qui limite les perturbations harmoniques et facilite le filtrage [9]

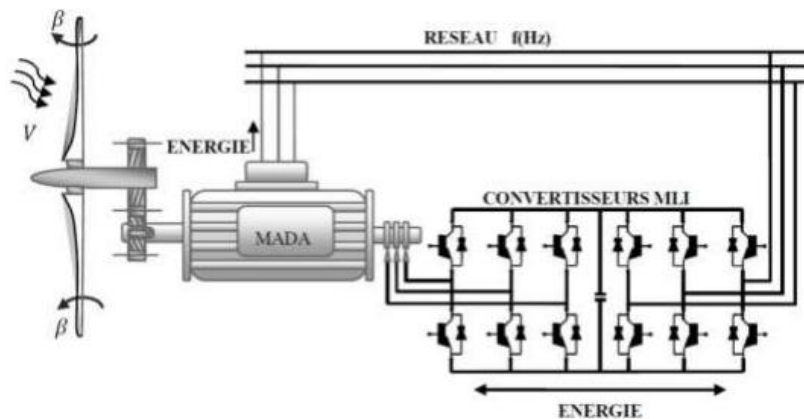


Figure I.12 : Structure de SCHERBIUS avec convertisseurs MLI.

La réversibilité de puissance 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 $\pm 30\%$ autour du synchronisme, les convertisseurs sont alors dimensionnés pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représentent moins de 1%

de cette puissance [11]. De plus, le fonctionnement hyper synchrone 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.

I.7. Avantages et inconvénients de la MADA :

Nous introduisons dans ce paragraphe les avantages et les quelque inconvénients que présente la machine asynchrone à double alimentation [15].

I.7.1. 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
- 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 hyper synchronisme offre une large plage de variation de la vitesse ;

I.7.2 Inconvénients de la MADA :

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais [15].
- La présence des balais nécessite des interventions périodiques, ce qui augmente le coût de la maintenance.
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage nous soulignons que des études récentes, tenant compte de la chute du prix du silicium donnent maintenant un petit avantage à la MADA [15].

I.8. Application des machines asynchrones à double alimentation :

La machine asynchrone doublement alimentée est utilisée dans diverses applications soit en mode moteur ou en mode générateur. Nous citerons, dans ce qui suit, les applications plus envisagées dans l'industrie.

I.8.1 Application moteur :

La MADA représente une nouvelle solution dans le domaine des entraînements de forte puissance, notamment ceux exigeant un large domaine de fonctionnement étendu à puissance constante et une grande plage de variation de la vitesse [6] comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime.

I.8.2 Application génératrice :

Grâce à sa capacité de fonctionner dans une large gamme de vitesses, la MADA est devenue la solution adaptée pour l'énergie éolienne. L'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet d'avoir des tensions statoriques à fréquence et amplitude fixes quel que soit la vitesse de rotation de son arbre. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée

- Génération des réseaux de bord des navires ou des avions [7] ;
- Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable ;
- Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable ;

Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

I.9. Modélisation de la MADA :

La modélisation des machines électriques consiste en élaboration des modèles mathématique qui permettent de prédire le comportement de la machine dans différents régimes de fonctionnement, en prévoyant ainsi les points qui risquent de provoquer des perturbations.

I.9.1 Hypothèses simplificatrices :

- L'entrefer constant.
- L'effet des encoches négligé.
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- Les pertes ferromagnétiques négligeables.
- De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements [16]

La figure (I.13) rappelle la position des axes des phases statoriques et rotoriques dans l'espace électrique, où l'angle électrique est égal à l'angle réel multiplié par le nombre (P) de paires de pôles par phase.

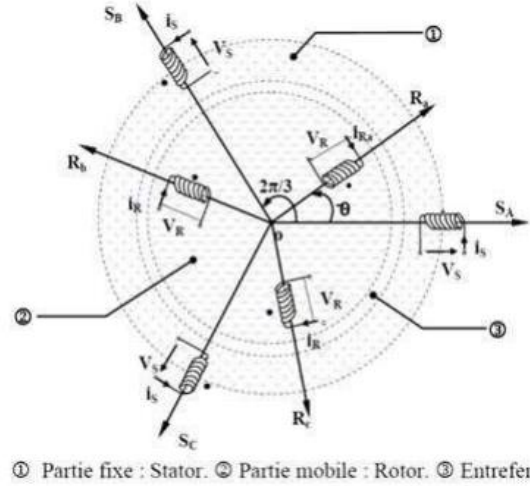


Figure I.13 : Représentation simplifiée de la MADA

I.9.2. Equations mathématiques de la MADA dans le repère (a, b, c)

- La machine asynchrone à double alimentation MADA comporte trois bobines statoriques décalées entre elles par un angle de $(2\pi/3)$ et aussi trois bobines rotorique identique de répartition et similaire à celles du stator.
- Les équations générales de machine asynchrone à cage d'écureuil dans un repère triphasé en mode hypo synchrone s'écrivent sous forme matricielle.

I.9.2.1. Equations électriques

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\varphi_s]}{dt} \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d[\varphi_r]}{dt} \end{cases} \quad (I.1)$$

$$\text{Avec : } [I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} * [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} * [V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} * [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} * [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} * [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix}$$

Les matrice des résistances statorique et rotorique de la MADA sont données par:

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} * [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

I.9.2.2 Equations magnétiques

Les hypothèses que nous avons présentées conduisent à des relations linéaires entre le flux et les courants. Elles sont exprimées sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\varphi_r] = [M_{sr}][I_s] + [L_{rr}][I_r] \end{cases} \quad (I.2)$$

Les quatre matrices d'inductance s'écrivent :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} * [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

I.10. Application de la transformation de Park à la GADA

Les grandeurs statorique et rotorique sont transformées comme suit : On choisit comme référence le repère de Park liée au champ tournant dont

• **Tensions :**

$$\begin{cases} [V_{dq0}]_s = [P(\theta_s)][V_s] \\ [V_{dq0}]_r = [P(\theta_s - \theta)][V_r] \end{cases} ; \quad \begin{cases} [V_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[V_{dq0}]_s \\ [V_r] = [P(\theta_s - \theta)]^{-1}[V_{dq0}]_r \end{cases}$$

• **Courants :**

$$\begin{cases} [I_{dq0}]_s = [P(\theta_s)][I_s] \\ [I_{dq0}]_r = [P(\theta_s - \theta)][I_r] \end{cases} ; \quad \begin{cases} [I_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[I_{dq0}]_s \\ [I_r] = [P(\theta_s - \theta)]^{-1}[I_{dq0}]_r \end{cases}$$

• **Flux :**

$$\begin{cases} [\varphi_{dq0}]_s = [P(\theta_s)][\varphi_s] \\ [\varphi_{dq0}]_r = [P(\theta_s - \theta)][\varphi_r] \end{cases} ; \quad \begin{cases} [\varphi_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[\varphi_{dq0}]_s \\ [\varphi_r] = [P(\theta_s - \theta)]^{-1}[\varphi_{dq0}]_r \end{cases}$$

I .10.1 Représentation de la GADA dans repère biphasé (dq)

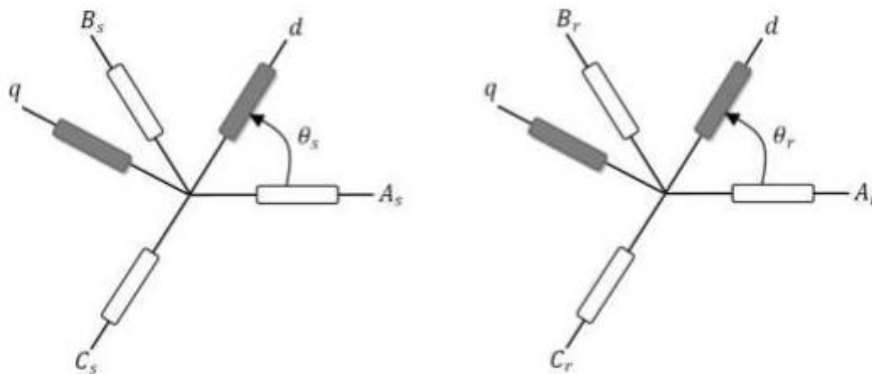


Figure I.14 : Schémas de Transformation des variables statoriques et rotoriques.

I.10.1.1. Equations électriques

En multipliant les systèmes des équations (I.3) par la matrice de Park, on obtient

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (I.3)$$

Sous forme vectorielle cela donne

$$\begin{cases} V_s = R_s \bar{I}_s + \frac{d\varphi_s}{dt} + J \omega_s \bar{\varphi}_s \\ V_r = R_r \bar{I}_r + \frac{d\varphi_r}{dt} + J(\omega_s - \omega) \bar{\varphi}_r \end{cases} \quad (I.4)$$

J: appelée matrice de rotation.

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

I.10.1.2. Equations magnétiques

En multipliant les systèmes des équations (I.4) par la matrice de Park, on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (I.5)$$

I.10.1.3. Equations électriques sous forme matricielle

Les deux systèmes des équations (I.3) et (I. 5) s'écrivent :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + L_s \frac{dI_{sd}}{dt} + M \frac{dI_{rd}}{dt} - \omega_s L_s I_{sq} - \omega_s M I_{rq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + L_s \frac{dI_{sq}}{dt} + M \frac{dI_{rq}}{dt} + \omega_s L_s I_{sd} + \omega_s M I_{rd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + L_r \frac{dI_{rd}}{dt} + M \frac{dI_{sd}}{dt} - \omega_s L_r I_{rq} - \omega_s M I_{sq} + \omega L_r I_{rq} + \omega M I_{sq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + L_r \frac{dI_{rq}}{dt} + M \frac{dI_{sq}}{dt} + \omega_s L_r I_{rd} + \omega_s M I_{sd} - \omega L_r I_{rd} - \omega M I_{sd} \end{cases} \quad (I.6)$$

Ce système d'équation (I. 6) se traduit sous la forme matricielle comme suit :

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \\
 \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} &+ \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -L_s & 0 & -M \\ L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -M & 0 & -L_r \\ M & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \\
 \omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} & \quad (I.7)
 \end{aligned}$$

$$[V] = [A][I] + [B] \frac{d}{dt}[I] + \omega_s [C][I] + \omega [D][I] \quad (I.8)$$

Et la matrice, ce qui représente les équations magnétiques

$$[\varphi] = [B][I] \quad (I.9)$$

$$\text{Dont : } [V] = \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix}; [I] = \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix}; [\varphi] = \begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 [A] &= \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}; [B] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}; \\
 [C] &= \begin{bmatrix} 0 & -L_s & 0 & -M \\ L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -M & 0 & -L_r \\ M & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix}; [D] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

I.10.1.4. Expression de la puissance active et réactive

La puissance active et réactive au stator est définie comme :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (I.10)$$

Le même pour les puissances active et réactive rotorique

$$\begin{cases} P_r = V_{rd} I_{rd} + V_{rq} I_{rq} \\ Q_r = V_{rq} I_{rd} - V_{rd} I_{rq} \end{cases} \quad (I.11)$$

I.10.1.5. Expression du couple électromagnétique

$$C_{em} = p(\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}) \quad (\text{I.12})$$

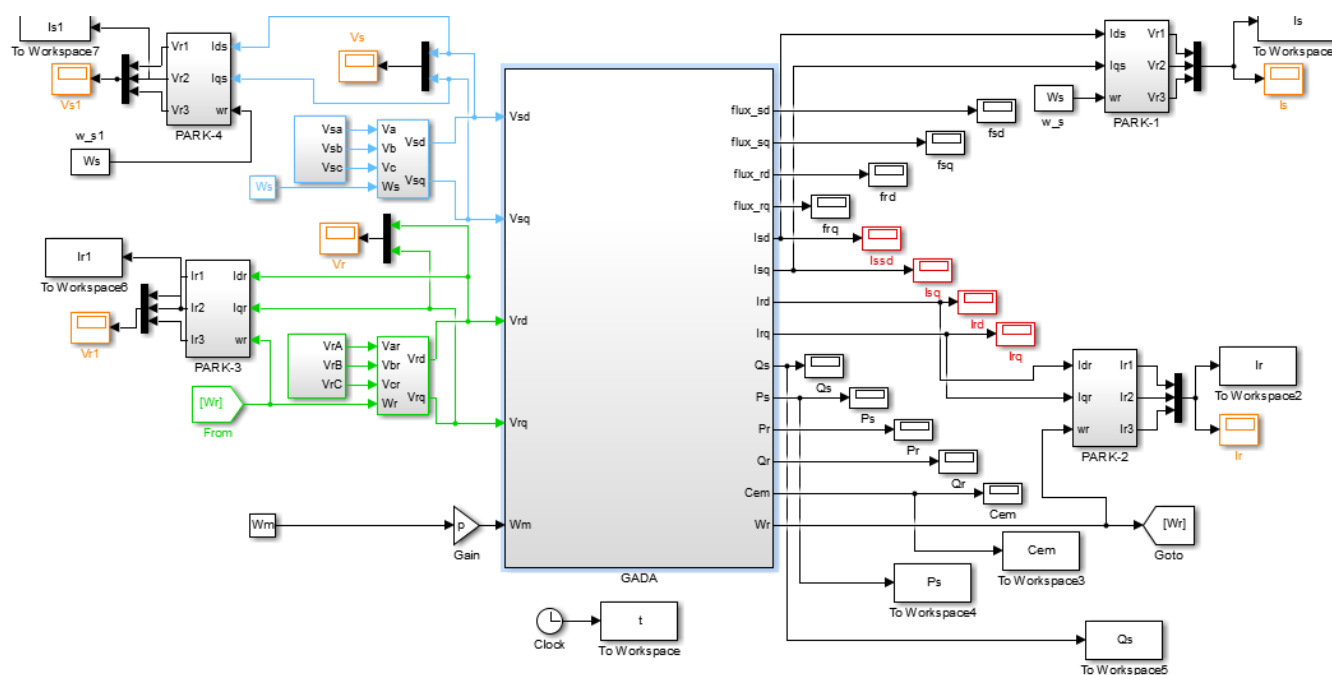


Figure I.15 .schéma bloc de GADA

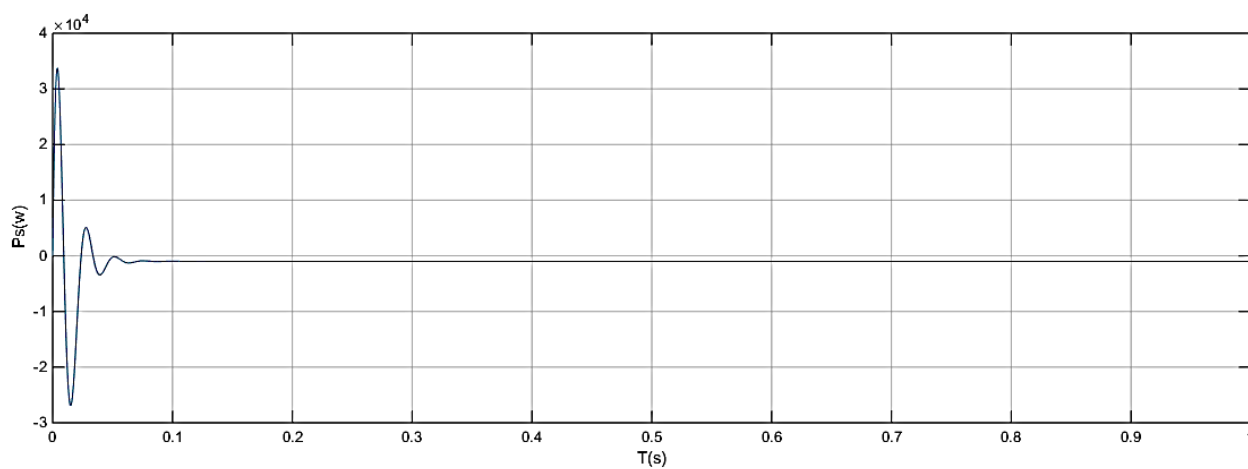


Figure I.16 Courbe de la puissance active statorique .

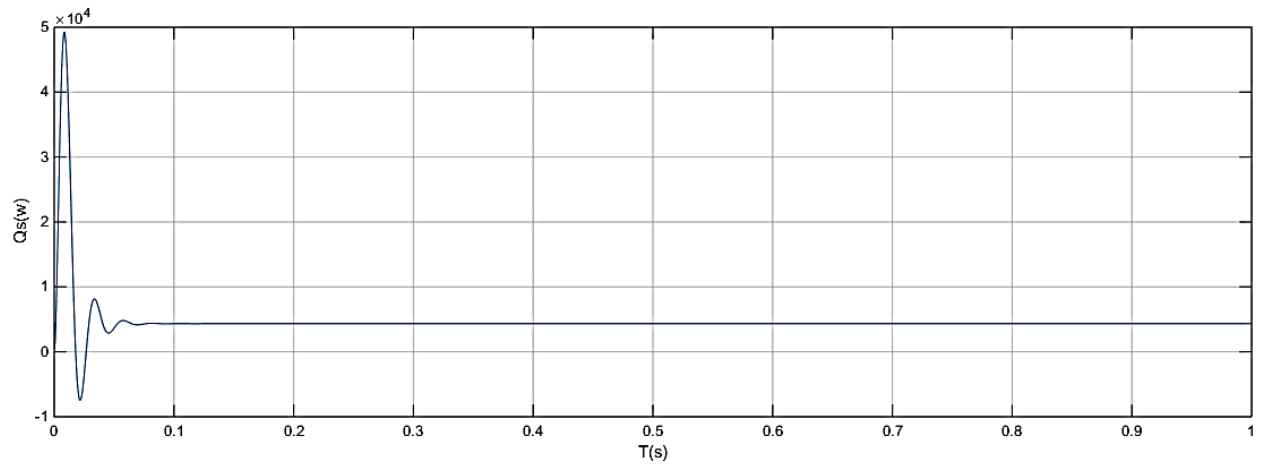


Figure I.17 Courbe de la puissance réactive statorique.

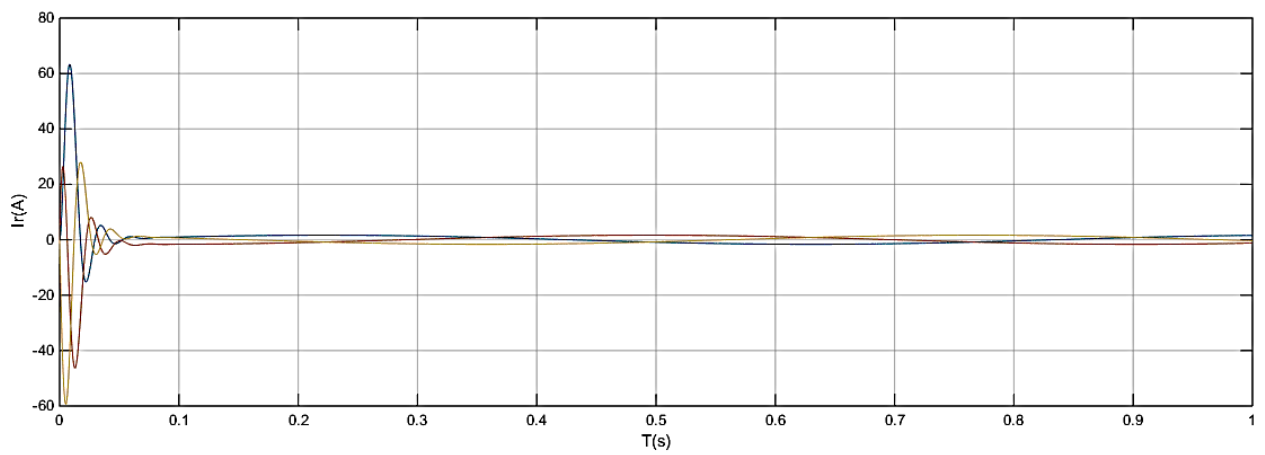


Figure I.18 Courbe du courant rotorique .

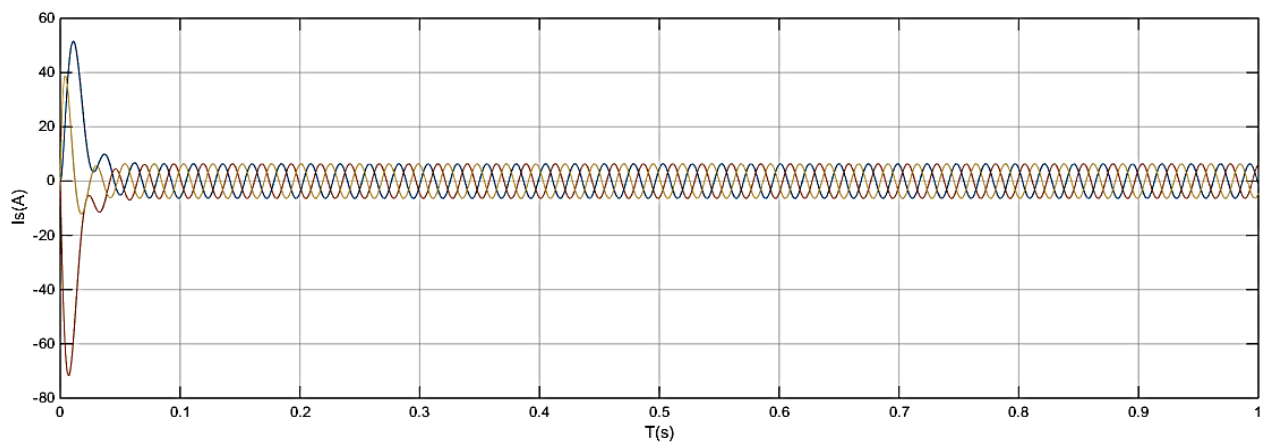


Figure I.19 Courbe du courant statorique.

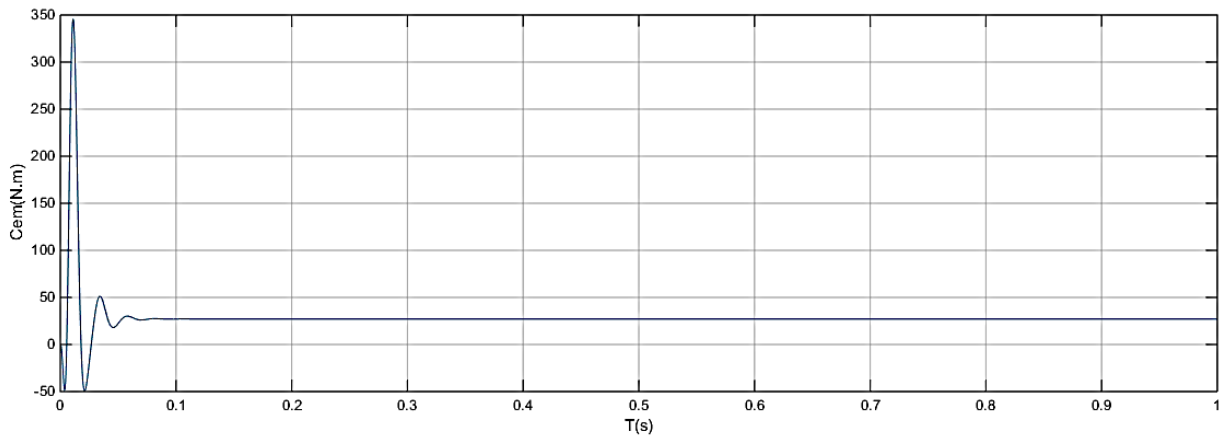


Figure I.20 Courbe de la couple.

I.11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, fonctionnement génératrice. En basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi, dont la complexité a été réduite. Nous avons constaté que le modèle de la machine asynchrone à double alimentation est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle. Ainsi, les résultats de simulation ont été présentés.

Chapitre II

Modélisation d'une turbine

II.1. Introduction :

Comme on l'a vu auparavant, pratiquement toutes les éoliennes sont à axe horizontal car, même si les éoliennes à axe vertical ont été prometteuses dans les années 80 et au début des années 90, leur faible rendement aérodynamique, ainsi que les fluctuations élevées de la puissance électrique produite, les ont écartées du marché

Alors, dans ce chapitre, nous nous intéressons uniquement à la modélisation d'une turbine éolienne à axe horizontal tri-pales (figure. II.1). Tous les modèles ont été développés en vue d'une exploitation par le logiciel Matlab/Simulink, qui permet de mettre en place assez rapidement des modèles ainsi que les lois de commande associées et est bien adapté à la simulation des phénomènes de nature mécanique et électromécanique étudiés ici. [22], [20]

II.2. Modélisation du vent

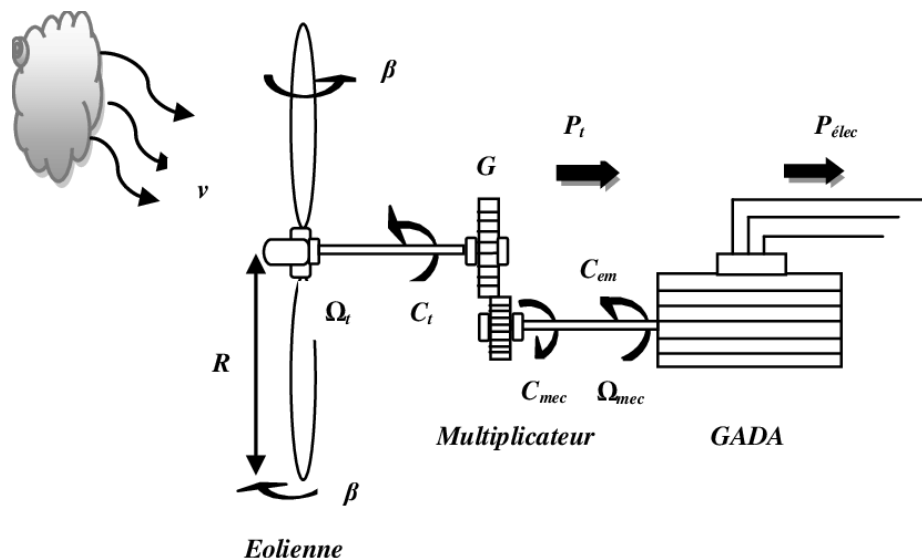


Figure. II.1 Schéma de la turbine éolienne

Le vent est la raison d'être des aérogénérateurs. L'énergie cinétique contenue dans le vent est transformée en partie en énergie mécanique par la turbine, puis en énergie électrique par le générateur. La masse exacte du vent à la hauteur de la turbine est assez complexe. Cependant le vent peut être représenté par une grandeur aléatoire définie par des paramètres statistiques. De nombreux travaux sur la modélisation du vent à partir d'un bruit blanc sur lequel on applique une fonction de transfert à déterminer. Les paramètres de cette fonction de transfert

dépendent des grandeurs caractéristiques du site et du vent. La vitesse du vent peut être donc modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps :

$$v(t) = f(t)$$

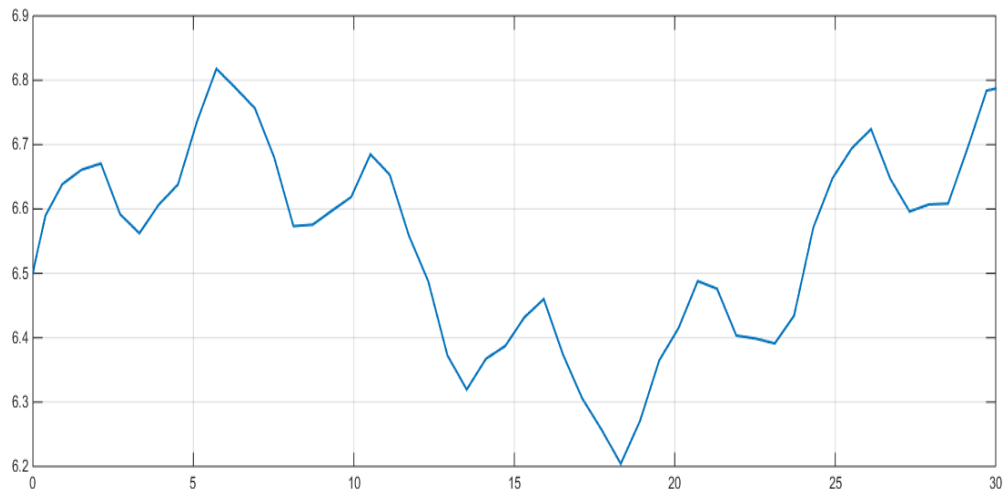


Figure II.2 : Profil du vent pour une durée de 500 s

La figure II. 5 représente un résultat de simulation qui montre un profil du vent avec une valeur moyenne de la vitesse (10 m/s).

II.3. Modélisation d'une turbine éolienne à axe horizontal

Le système de conversion de l'énergie éolienne est complexe. Ce système dépend de la multiplicité des domaines existants, à savoir, aérodynamique, mécanique, et électrique. Par ailleurs, les facteurs, tel que la vitesse du vent, la dimension, et la forme de la turbine, déterminent la puissance mécanique. Un modèle dynamique prenant en compte tous ces paramètres est nécessaire pour comprendre le comportement de la turbine. Afin de contrôler les performances et satisfaire les caractéristiques opérationnelles voulues, le recours à la modélisation est une nécessité [24]:

II.3.1. Hypothèse simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans le cadre d'étude électromécanique sont relativement simples et obéissent aux hypothèses simplificatrices suivantes [17], [18]:

- Les pales sont considérées à conception identique avec les mêmes paramètres d'inertie, d'élasticité et de frottement ;
- Les coefficients de frottements des pales par rapport à l'air et par rapport au support sont très faibles et peuvent être ignorés ;

- La vitesse du vent est supposée à répartition uniforme sur toutes les pales, ce qui permet de considérer l'ensemble des pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de tous les systèmes mécaniques.

On obtient alors un modèle mécanique simple (voir Figure. II.6) :

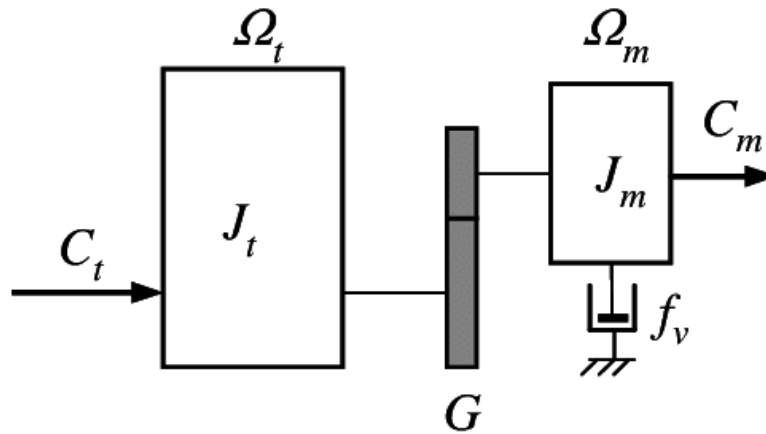


Figure. II.3 Modèle mécanique simplifié de la turbine

II.3.2. Modélisation de la turbine :

Un système éolien transforme l'énergie de la masse d'air en mouvement et délivre une puissance mécanique caractérisée par la vitesse de rotation et le couple mécanique. Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de gain K (figure II.6)

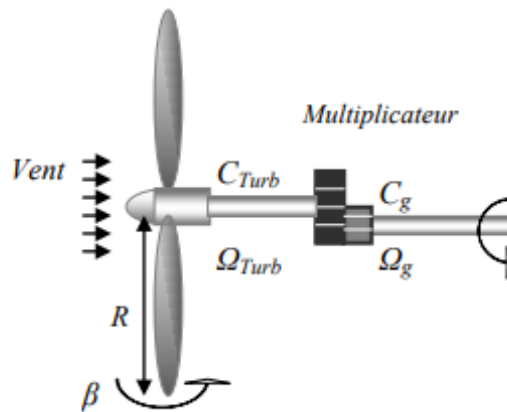


Figure II.4: Modélé d'une turbine éolienne

Le couple exercé par le vent sur l'arbre de la turbine se déduit directement de l'équation (1.5) en divisant l'expression de la puissance mécanique par la vitesse de rotation de l'arbre

$$C_{turb} = \frac{P}{2\Omega_{turb}} Cp(\lambda) \rho \pi R^3 V_v^2 \quad (II.1)$$

L'expression (II.25) donne la valeur du couple éolien qui est créé sur l'arbre de la turbine par la masse d'air ayant une vitesse V_v .

II.3.3. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse (rapide) de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les expressions suivantes :

$$\frac{C_{turb}}{K} = C_g \quad (II.2)$$

$$\Omega_{mec} = K\Omega_{turb}$$

Ω_{mec} représente la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice

II.3.4. Equation dynamique de l'arbre [19]

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie J_{turb} et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice.

$$J = J_{total} = \frac{J_{turb}}{K^2} + J_g \quad (II.3)$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée sur cet axe. A titre illustratif, pour une éolienne l'estas de 2 MW, une pale a une longueur de 39 m et pèse 6.5 tonnes. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total (C) appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (II.3)$$

Où J est l'inertie totale qui apparait sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C et le couple issu du multiplicateur C_g

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II.4)$$

$$C_{vis} = f.\Omega_{mec}$$

Il est plus logique de considérer la turbine comme une source de vitesse. L'équivalence électrique d'un tel système inertiel est montrée sur le schéma de la figure II.7

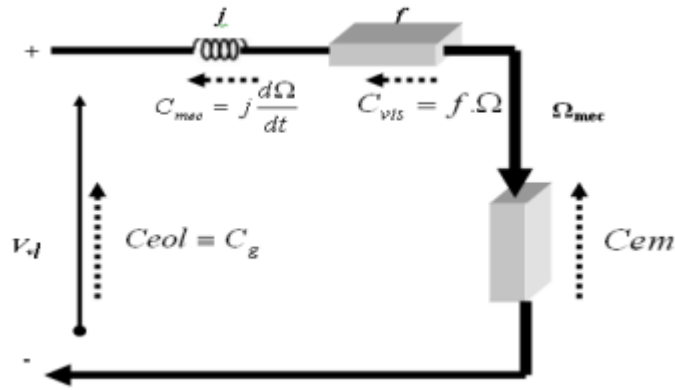


Figure. II.5 Schéma électrique équivalent de la turbine d'une éolienne

Le schéma bloc correspondant à la modélisation de la turbine se déduit aisément des expressions précédentes. Il peut être représenté par la figure II.8:

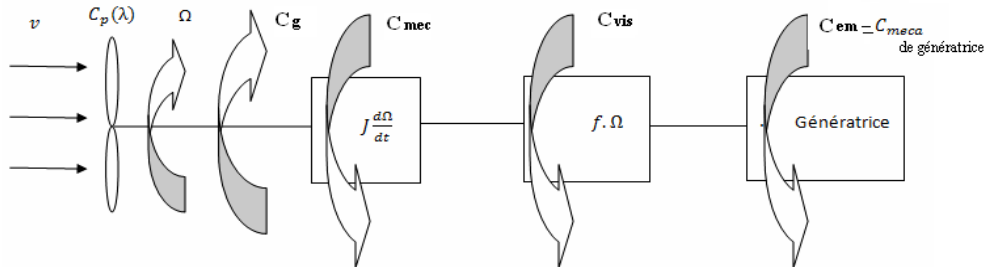


Figure. II.6 Modèle d'une turbine éolienne

Les entrées de la turbine sont la vitesse du vent, l'angle d'orientation des pales et la vitesse de rotation de la turbine. Le modèle du multiplicateur transforme la vitesse mécanique et le couple aérodynamique respectivement en vitesse de la turbine et en couple de multiplicateur (relations I1.25). Le modèle de l'arbre décrit la dynamique de la vitesse mécanique. Il a donc deux entrées : le couple du multiplicateur et le couple électromagnétique fourni par la génératrice. Le schéma bloc montre que 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.

II.4. Modèle de la turbine en MATLAB/SIMULINK :

Le modèle de la turbine se déduit aisément de les équations dessus et est représenté sur la Figure. II.7, Figure. II.8

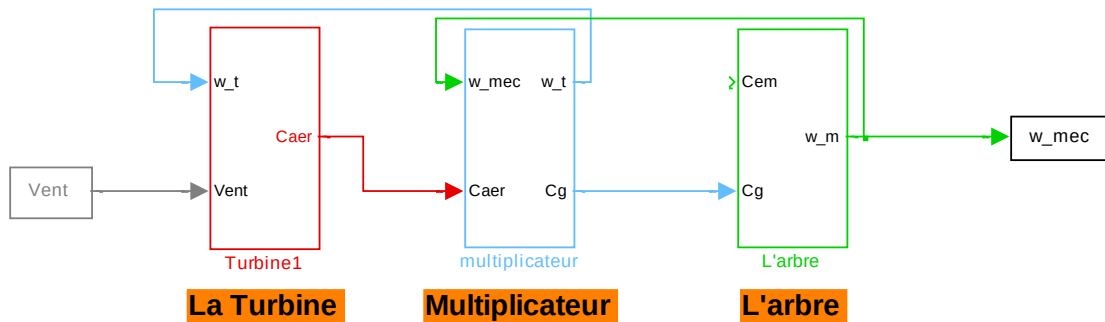


Figure. II.7 Modèle en bloc de la turbine

La turbine génère un couple aérodynamique transmis au multiplificateur. Ce couple peut être calculé à partir des valeurs de la vitesse du vent et la vitesse de rotation de la turbine.

Le multiplificateur transforme la vitesse de la turbine et le couple aérodynamique respectivement en vitesse mécanique et en couple du multiplificateur.

La turbine peut être ainsi commandée par l'action du couple électromagnétique du convertisseur électrique. La vitesse du vent est considérée comme une perturbation.

II.5. Stratégie de commande de la turbine :

Comme il est illustré sur la figure. II.8, on distingue quatre (04) zones principales de fonctionnement.

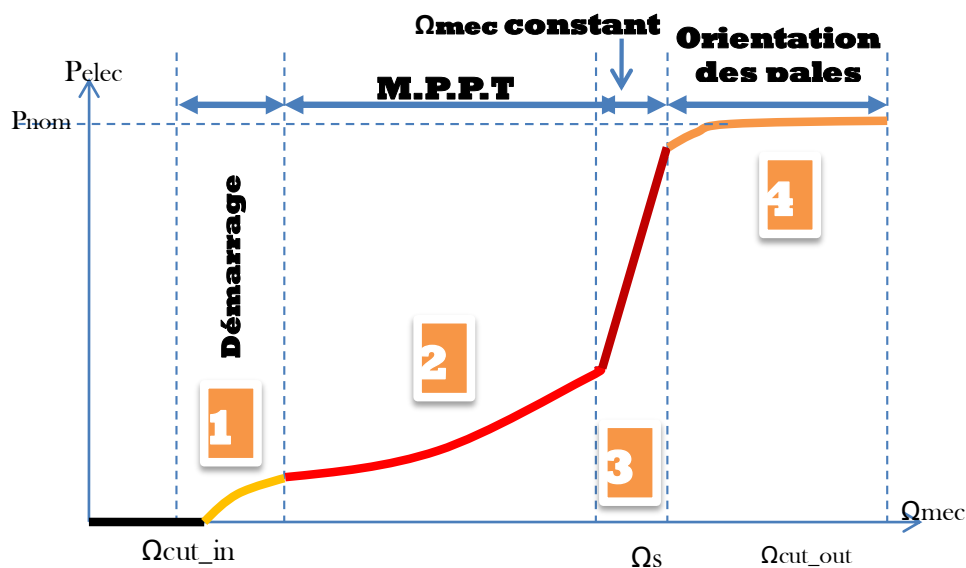


Figure. II.8 Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne

-Zone1 : A partir d'une certaine vitesse minimale nécessaire à l'entraînement de l'aérogénérateur l'éolienne commence à tourner ;

-Zone2 : A partir d'une certaine vitesse seuil de la génératrice (correspondant à un glissement de 30%), un algorithme de commande permettant l'extraction du maximum de puissance du vent (MPPT) est appliqué. On maintient l'angle de calage à sa valeur minimale qui correspond au maximum du coefficient de puissance ;

-Zone3 : Au-delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone la puissance atteint jusqu'à 90% de sa valeur nominale ;

-Zone4 : arrivée à la puissance nominale, la vitesse doit être limitée, c'est la phase où intervient la limitation de vitesse par orientation des pales (angle de calage), c'est le «Pitch Control ». [23], [19].

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

II.6. Maximisation de la puissance extraite :

En pratique, la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique, de manière à maximiser la puissance électrique générée, c'est le principe de MPPT. On distingue deux structures de commande [23]:

- Le contrôle par asservissement de la vitesse mécanique ;
- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.

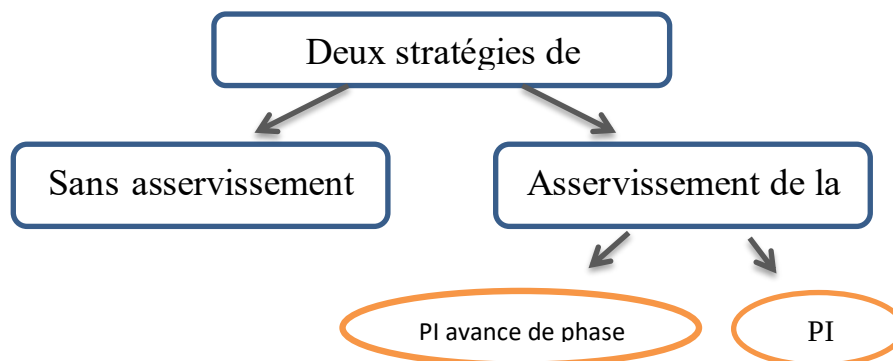


Figure. II.9 Stratégies de commande de la turbine

Il est difficile de mesurer précisément la vitesse du vent qui est de nature une grandeur très fluctuante. Une mesure erronée de la vitesse conduit donc à une dégradation de la puissance captée selon la technique MPPT. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse [23], [19].

II.6.1. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse

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

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II.5)$$

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

$$C_{em} = C_g \quad (II.6)$$

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

$$C_{aer} = C_p \frac{1}{2} \rho S \frac{1}{\Omega_{turbine_estimee}} v_{estimee}^3 \quad (II.7)$$

Avec :

$$v_{estimee} = \frac{\Omega_{turbine_estimee} \cdot R}{\lambda} \quad (II.8)$$

On fixe le ratio de vitesse à la valeur λ_{cp_max} , 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.

$$C_{em_ref} = \frac{\rho \pi R^5}{2G^3} \frac{C_p}{\lambda^3 C_{p_max}} \Omega_{mec}^2 \quad (II.9)$$

La figure. II.10.a, figure. II.10.b représente le schéma bloc et le modèle de maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.

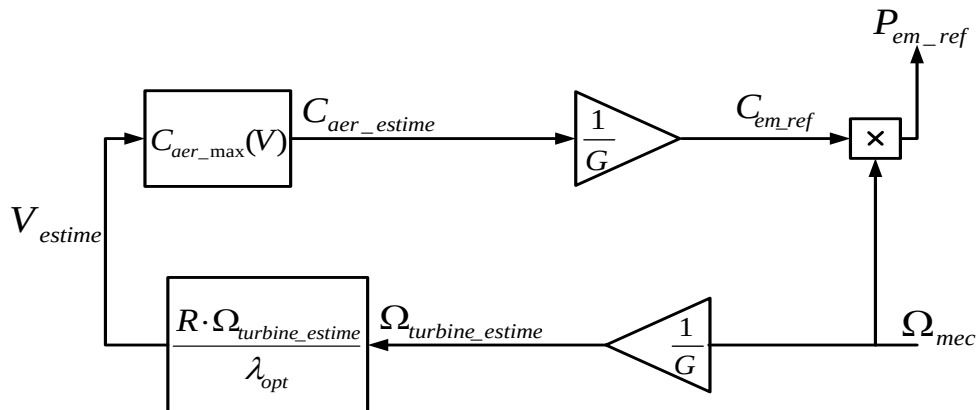


Figure. II.10.a Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse

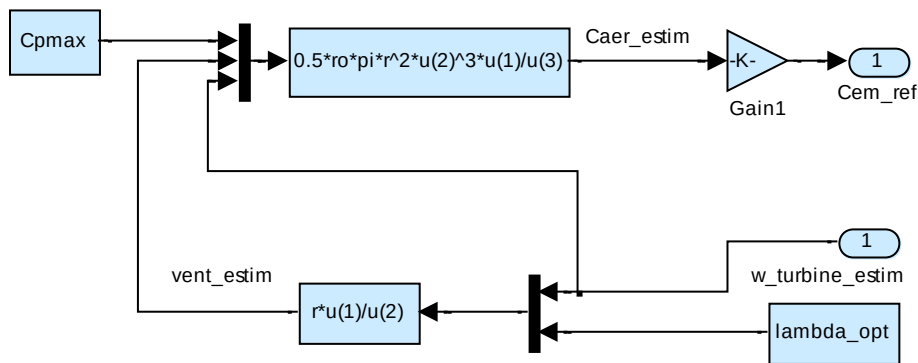


Figure. II.10.b Modèle de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse en MATLAB/SIMULINK

II.7. Résultats de Simulation et interprétations

Nous présenterons la Simulation du fonctionnement de la partie mécanique de l'éolienne. Les Simulations sont faites dans l'environnement MATLAB/SIMULINK. Cet environnement nous permet de développer les schémas blocs de régulation et de les associer aux modèles de machine

Nous n'allons pas raccorder l'hélice et le multiplicateur à une génératrice mais simplement observer le couple produit à la sortie du multiplicateur en fonction de l'évolution du vent. Pour ce faire, Nous avons besoin de la valeur du couple électromagnétique de multiplicateur, couple qui serait imposée par la génératrice en fonction de la puissance qu'elle produit.

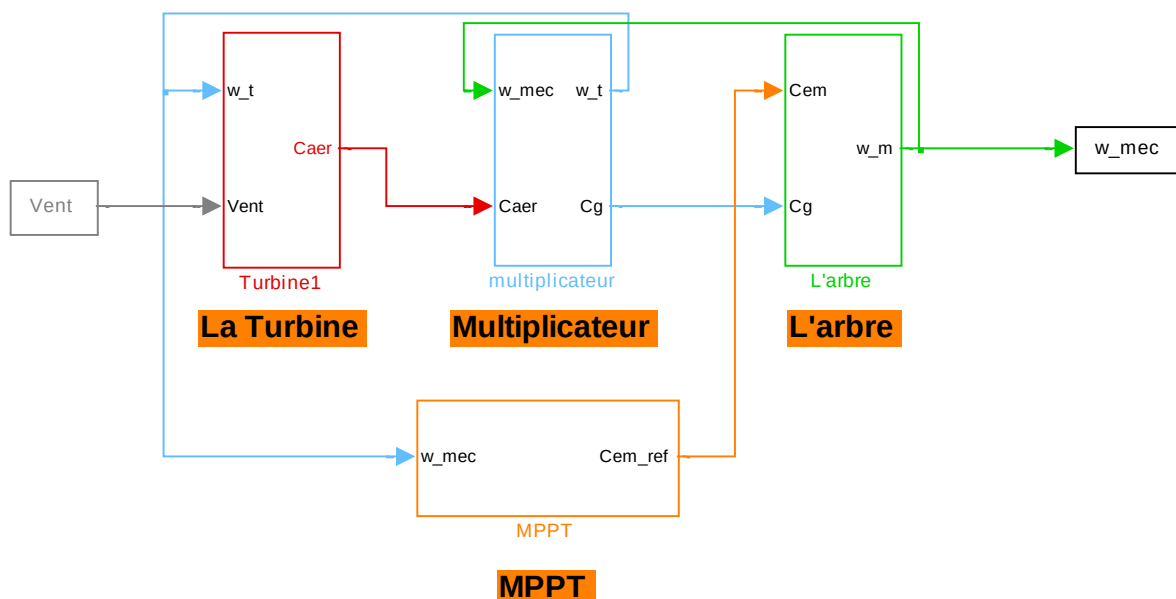
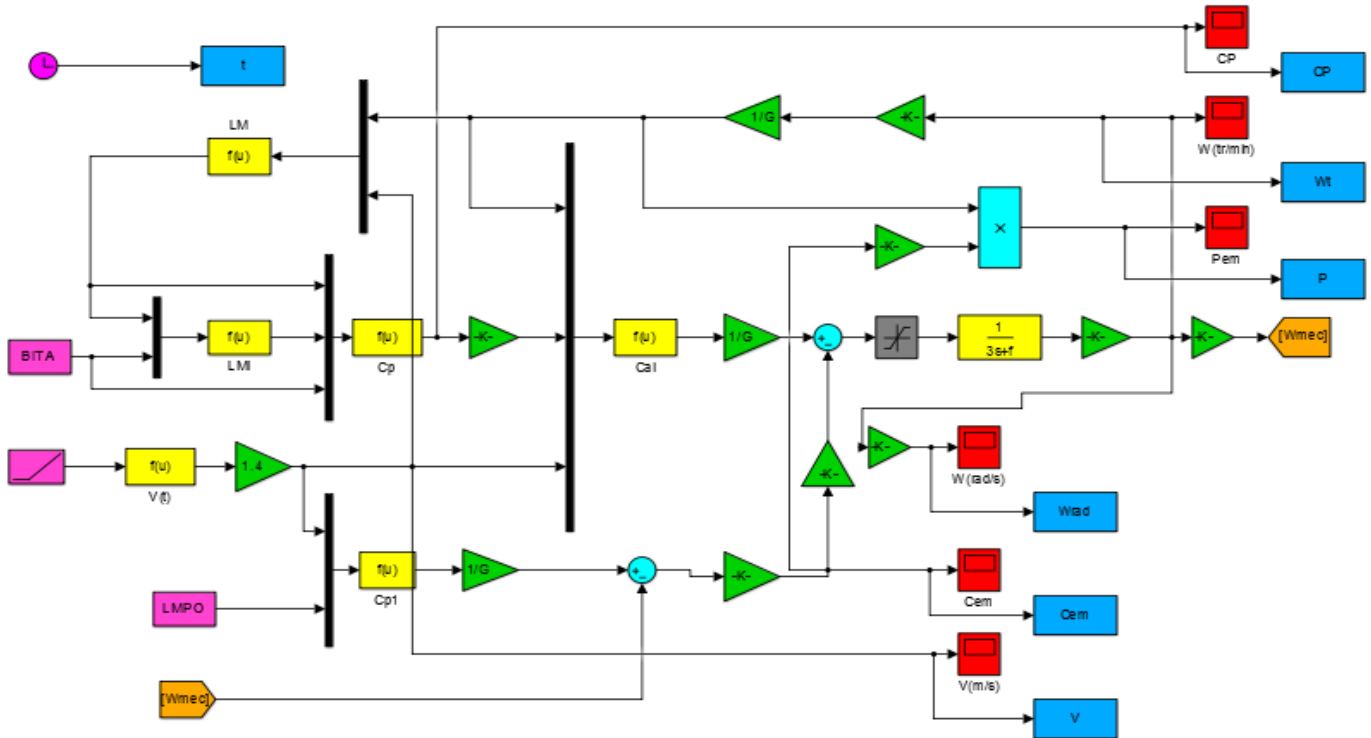


Figure. II.11 Modèle de la turbine avec la Commande en MATLAB/SIMULINK

Nous allons donc nous fixer une couple référence et utiliser le profil de vent de la figure. II.11 pour valider le modèle établi précédemment. Nous observerons l'allure de la



Vitesse mécanique et de la puissance de référence en fonction de l'évolution du vent.

Où les composants électriques utilisés donnés en Annexe A.2.

Fig. II.12 Modèle éclaté de la turbine éolienne Sous Matlab/Sumilnk

a- Profil du vent :

La figure (II.13) présente le profil du vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne.

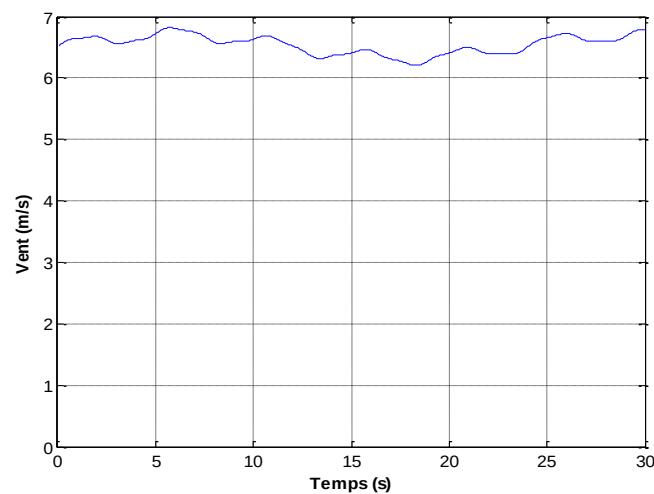


Figure. II.13 Profil du vent

b- Le coefficient de puissance :

La figure (II.14) montre le coefficient de puissance obtenu par le profil du vent présenté sur la figure (II.13).

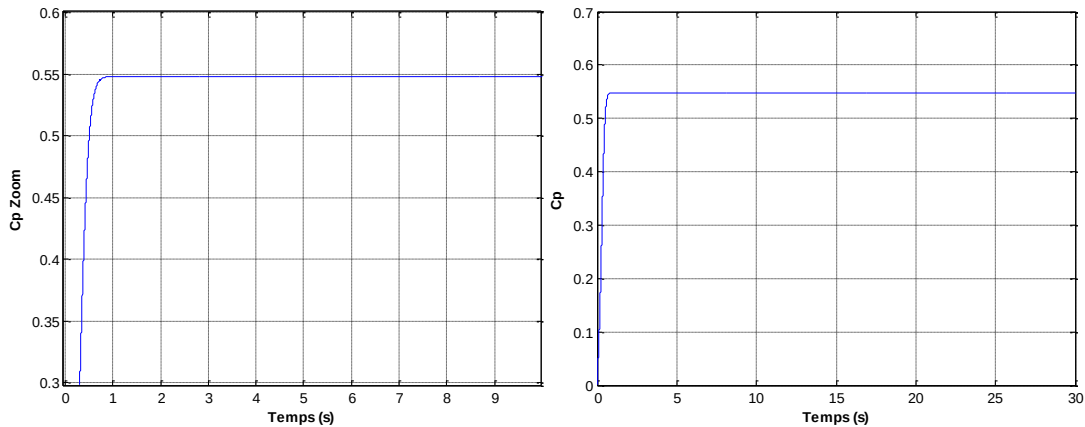


Figure. II.14 Coefficient de puissance avec un zoom

Ce coefficient de puissance est obtenu pour un angle de calage β fixe ($\beta=2^\circ$), qui nous donne un $\lambda_{optimale}$.

On remarque que le C_p atteint une valeur moyenne de 0,54, il cherche à être gardé au maximum possible pour but de maximiser la production, et varie légèrement selon la variation de la vitesse du vent.

c- La puissance électrique et la Vitesse mécanique :

En négligeant les pertes d'origine électrique, la puissance électrique devient égale à la puissance électromagnétique définie par $:(\Omega_{mec} \cdot C_{em})$. Cette puissance -puissance de référence- sera comptabilisée négativement car elle s'oppose à la puissance aérodynamique "pour respecter la convention récepteur de l'ensemble". Lorsque ces deux puissances sont égales, l'éolienne tourne à vitesse constante.

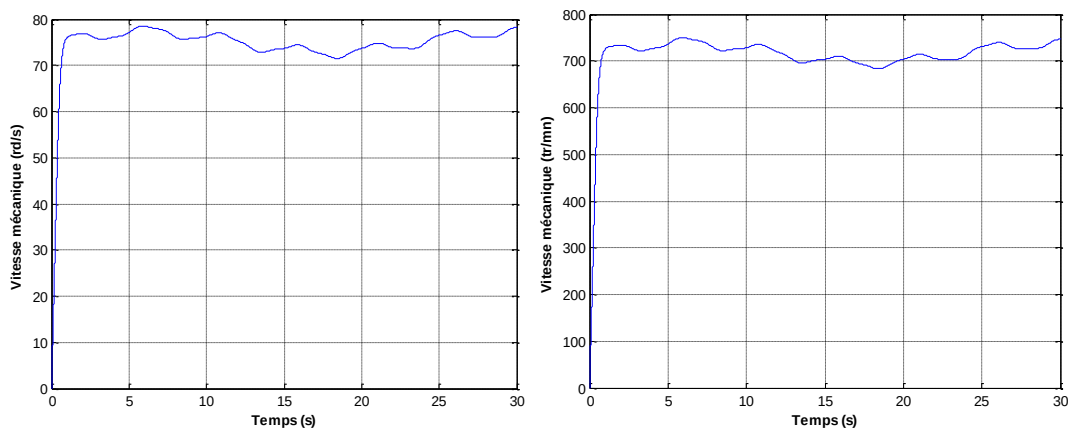


Figure. II.15 Vitesse mécanique

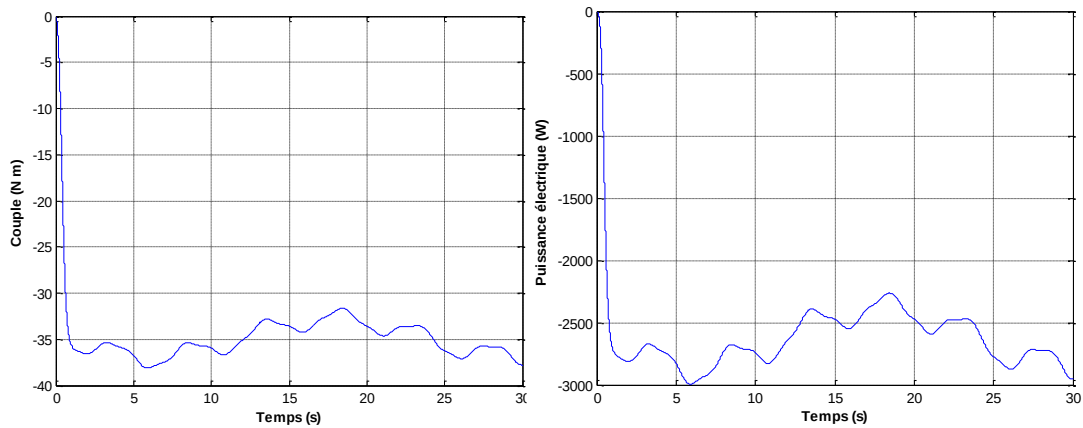


Figure. II.16 Couple et Puissance électrique produite

II.8. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons détaillé une modélisation des différentes parties de la turbine éolienne prenant en compte les caractéristiques du profil de pales, l'angle décalage de celle-ci et le profil de vent utilisé.

Nous avons modélisé l'ensemble mécanique incluant le multiplicateur, permettant l'interconnexion avec une génératrice qui aura le couple comme entrée et la vitesse comme sortie. Ce modèle permet d'obtenir l'allure du couple et simule un comportement mécanique proche de la réalité tout en étant facilement exploitable pour les simulations. [21]

Cette partie mécanique est un élément essentiel dans la conversion éolienne. Elle comporte sa propre commande afin de maximiser la puissance extraite du vent par MPPT .

Nous allons maintenant nous intéresser aux autres parties de l'éolienne afin de modéliser l'ensemble et étudier le fonctionnement global du système de conversion d'énergie.

CHAPITRE III

**Etude et Modélisation d'un système
éolien par logique floue base de
MADA**

III.1. Introduction :

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

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

III.2 Historique de la Logique Floue :

Le terme d'ensemble flou apparait pour la première fois en 1965 lorsque le professeur Lotfi A. Zadeh, de l'Université de Berkeley aux USA. Public un article intitulé « Ensembles flous ».

En 1975, le professeur Mamdani à Londres développe une stratégie pour le contrôle des procédés et présente les résultats très encourageants qu'il a obtenus sur la conduite d'un moteur à vapeur. En 1978, la société danoise FL, Smidth réalise le contrôle d'un four à ciment. C'est là la première véritable application industrielle de la logique floue.

C'est au Japon, où la recherche n'est pas seulement théorique mais également très applicative, que la logique floue connaît son véritable essor. A la fin des années 1980, c'est d'un véritable boom qu'il faut parler. Les produits grand public, entre autres les machines à laver, sont pourvus de tels régulateurs. Dans l'industrie, le traitement des eaux, les grues portuaires, les métros, les systèmes de ventilation et de climatisation sont également concernés. Enfin, des applications existent dans des domaines très différents tels que la finance ou le diagnostic médical [26].

III.3 Principe de la Logique Floue :

Le principe de conception d'un régulateur flou consiste à exprimer la stratégie de régulation à partir d'objectifs de régulation et d'observations sur les entrées-sorties du processus, sans analyser en détail la dynamique sous-jacente du système. Le régulateur flou utilise des règles linguistiques qu'il est capable d'interpréter numériquement afin d'établir une stratégie de régulation [27-29]. Les problèmes principaux de conception sont :

- La définition du formalisme linguistique,
- Le choix d'opérateurs mathématiques pour manipuler les variables floues [30]

III.4 Théorie des ensembles flous

a) Notion d'appartenance partielle

Dans la théorie des ensembles, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble. La notion d'ensemble est à l'origine de nombreuses théories mathématiques. Cette notion essentielle ne permet cependant pas de rendre compte de situations pourtant simples et rencontrées fréquemment. Parmi des fruits, il est facile de définir l'ensemble des pommes. Par contre, il sera plus difficile de définir l'ensemble des pommes mûres. On conçoit bien que la pomme mûrit progressivement. La notion de pomme mûre est donc graduelle. C'est pour prendre en compte de telles situations qu'a été créée la notion d'ensemble flou. La théorie des ensembles flous repose sur la notion d'appartenance partielle : chaque élément appartient partiellement ou graduellement aux ensembles flous qui ont été définis. Les contours de chaque ensemble flou (Figure III.1) ne sont pas « nets », mais « flous » ou « graduels ».

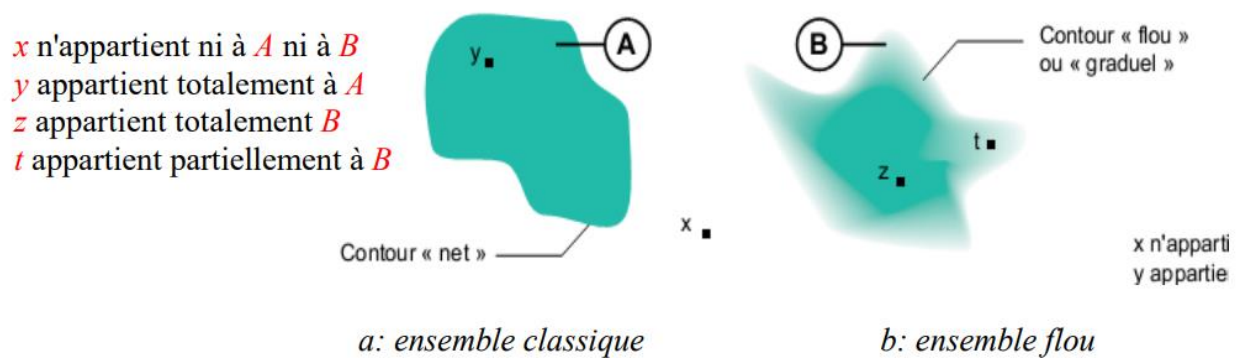


Figure III.1 : Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou [26]

b) Fonctions d'appartenance :

Un ensemble flou est défini par sa « fonction d'appartenance », qui correspond à la notion de « fonction caractéristique » en logique classique. Supposons que nous voulions définir l'ensemble des personnes de « taille moyenne ». En logique classique, nous conviendrons par exemple que les personnes de taille moyenne sont celles dont la taille est comprise entre 1,60 m et 1,80 m. La fonction caractéristique de l'ensemble (Figure III.2) donne « 0 » pour les tailles hors de l'intervalle [1,60 m ; 1,80 m] et « 1 » dans cet intervalle. L'ensemble flou des personnes de « taille moyenne » sera défini par une « fonction d'appartenance » qui diffère d'une fonction caractéristique par le fait qu'elle peut prendre n'importe quelle valeur dans l'intervalle [0, 1]. A chaque taille

possible correspondra un « degré d'appartenance » à l'ensemble flou des «tailles moyennes» (Figure III.3), compris entre 0 et 1.

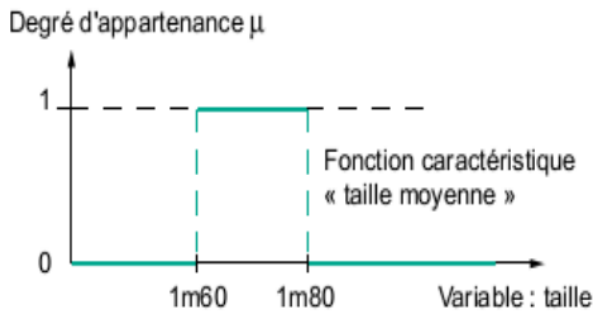


Figure III.2 : fonction caractéristique [26]

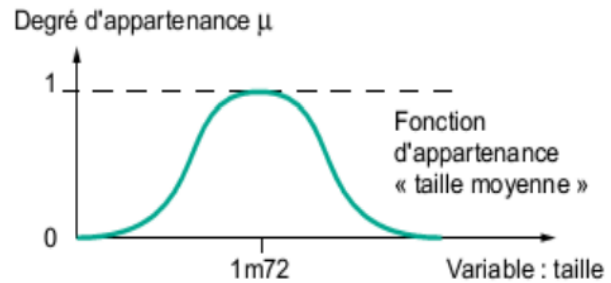


Figure III. 3: fonction d'appartenance[26]

Plusieurs ensembles flous peuvent être définis sur la même variable, par exemple les ensembles «taille petite», «taille moyenne» et «taille grande», notions explicitées chacune par une fonction d'appartenance (Figure III.4).

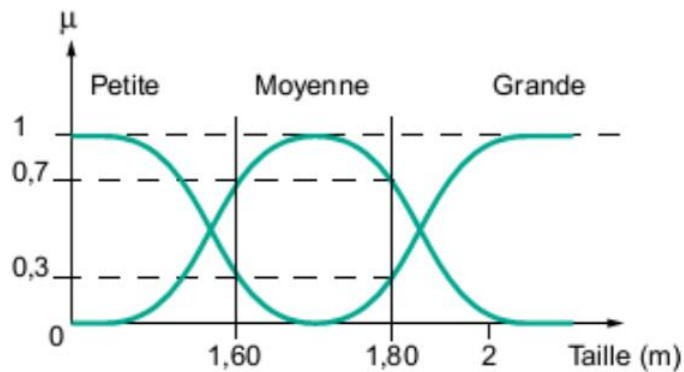


Figure III 4: fonction d'appartenance, variable et termes linguistiques [26]

c) Opérateurs logiques flous

Ces opérateurs permettent d'écrire des combinaisons logiques entre notions floues, c'est-à-dire de faire des calculs sur des degrés de vérité. Comme pour la logique classique, on peut définir des opérateurs ET, OU, négation.

Exemple : Appartement Intéressant Loyer Raisonnable ET Surface Suffisante

- Intersection : L'opérateur logique correspondant à l'intersection d'ensembles est le ET. Le degré de vérité de la proposition « A ET B » est le minimum des degrés de vérité de A et de B :

$$\mu (A \text{ et } B) = \text{MIN} (\mu (A). \mu (B)) \quad (\text{III.1})$$

- Union : L'opérateur logique correspondant à l'union d'ensembles est le OU. Le degré de vérité de la proposition « A OU B » est le maximum des degrés de vérité de A et de B :

$$\mu (A \text{ ou } B) = \text{MAX} (\mu (A), \mu (B)) \quad (\text{III.2})$$

- Complément : L'opérateur logique correspondant au complément d'un ensemble est la négation.

$$\mu (\text{NON } A) = 1 - \mu (A) \quad (\text{III.3})$$

III.5. Structure d'un régulateur flou :

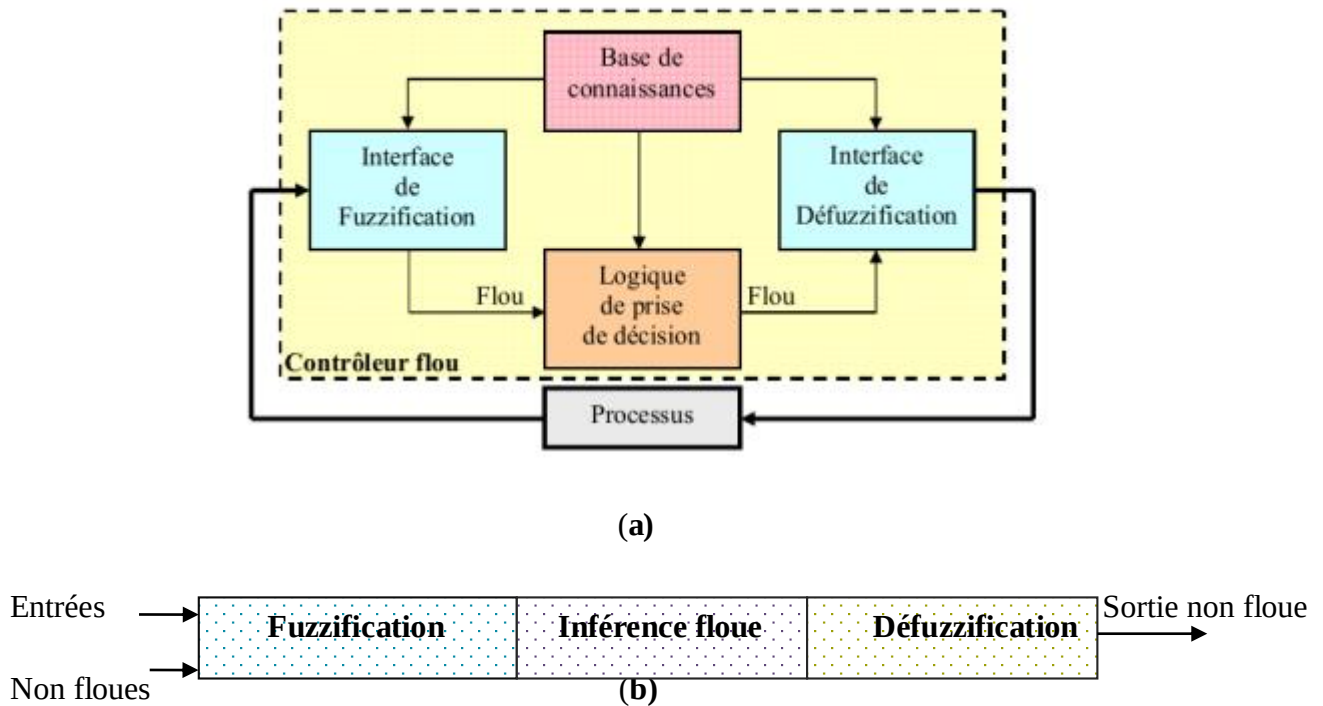


Fig. III.5 : configuration d'un contrôleur flou.

Comme il est indiqué sur la Fig. III.5, le régulateur par logique floue est composé donc de quatre éléments de base :

- Fuzzification

C'est la transformation des grandeurs physiques (entrées) en valeurs linguistiques (sous ensemble flou) représentés par leurs fonctions d'appartenances qui peuvent être traitées, ensuite, par le mécanisme d'inférence.

- Moteur d'inférence floue

C'est un mécanisme de décision. Il permet, à partir d'un fait observé de la base des règles floues, une décision en exploitant le raisonnement approximatif. Il existe plusieurs méthodes pour réaliser ces opérateurs dans une inférence et qui s'appliquent aux fonctions d'appartenance :

- Méthode d'inférence max

- Méthode d'inférence min
- Méthode d'inférence somme

- Base de connaissances (règles)

La logique floue a pour objectif de formaliser et de mettre en œuvre la façon de raisonner d'un être humain. En cela, elle peut être classée dans le domaine de l'intelligence artificielle. L'outil le plus utilisé dans les applications de logique floue est la base de règles floues. Une base de règles floues est composée de règles qui sont généralement utilisées en parallèle, mais peuvent également être enchaînées dans certaines applications. Une règle est du type : SI « prédicat » ALORS « conclusion ». Par exemple : « Si température élevée et pression forte ALORS ventilation forte et soupape grande ouverte »

- Défuzzification

A la fin de l'inférence, l'ensemble flou de sortie est déterminé mais il n'est directement pas utilisable pour donner une information précise à l'opérateur ou commander un actionneur. Il est nécessaire de passer du « monde flou » au « monde réel », c'est la défuzzification. Il existe plusieurs méthodes, la plus souvent rencontrée étant le calcul du « centre de gravité » de l'ensemble flou (Figure III.6)

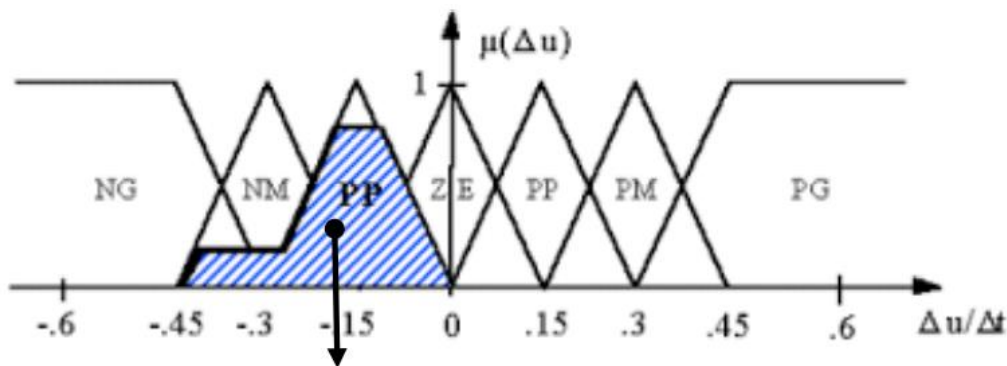


Figure III.6 : défuzzification par centre de gravité

III.6. Commande par logique floue :

Dans le système présenté dans cette étude, deux régulateurs indépendants à base de la logique floue sont utilisés pour produire les tensions de référence souhaitées à la commande des puissances active et réactive dans le stator de la MADA (P_s , Q_s).

Comme il est représenté sur la figure III.7, dans le contrôleur floue CF, la valeur de référence $r(t)$ est comparée à la valeur réelle (mesurée) $y(t)$ pour obtenir l'erreur $e(t)$. De plus,

cette erreur est comparée avec l'erreur précédente $e(t-1)$ pour obtenir la variation de l'erreur $\Delta e(t)$.

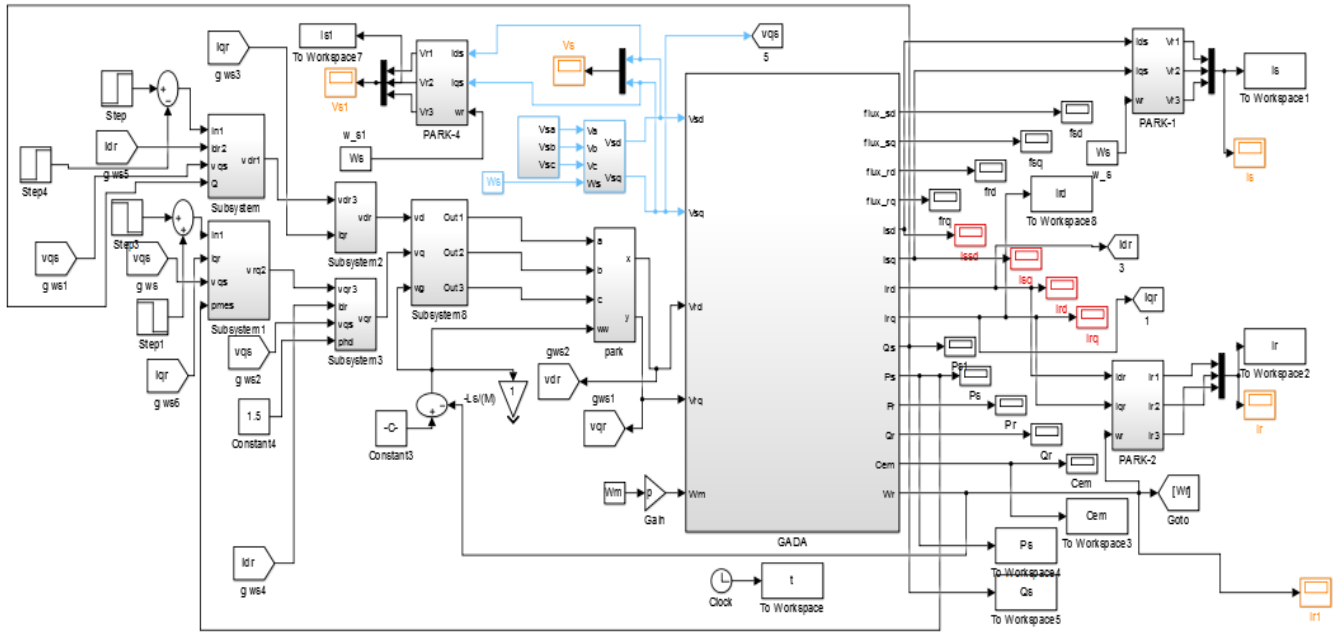


Figure III.7: Schéma bloc la commande vectoriel d'un régulateur flou des puissances active et réactive

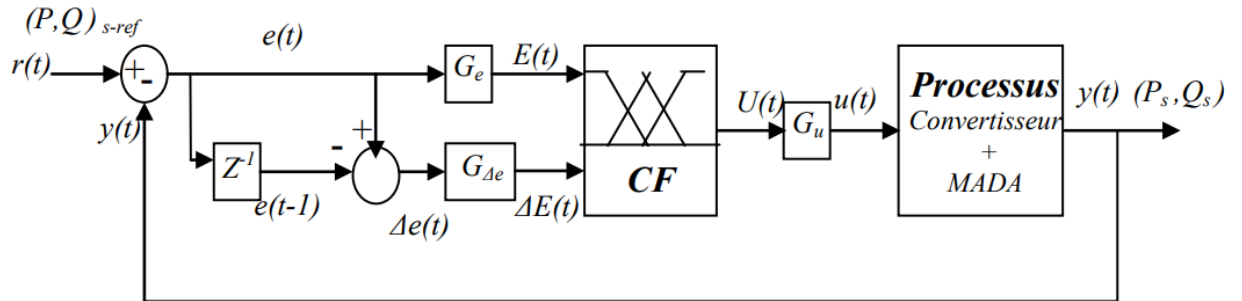


Figure III.8: Schéma synoptique d'un régulateur flou des puissances active et réactive

Les deux entrées du contrôleur flou (CF) sont l'erreur de la puissance et sa variation. La sortie du régulateur corespond à la commande. Ces trois grandeurs sont normalisées comme suit:

$$E = G_e e, \Delta E = G_{\Delta e} \Delta e, U = G_u u \quad (III.4)$$

Où, G_e , $G_{\Delta e}$ et G_u , sont des facteurs d'échelle ou des gains de normalisation associés à $e(t)$, $\Delta e(t)$, $u(t)$ respectivement. Ils permettent de changer la sensibilité du régulateur flou sans en changer la structure. Les grandeurs $[E(t), \Delta E(t), U(t)]$ indicées sont donc les grandeurs normalisées à l'entrée et à la sortie du CF.

D'après [32], la normalisation des grandeurs d'entrées et de sortie est une étape clé du bon fonctionnement. Les gains d'entrées permettent de doser l'action des entrées sur le CF, tandis que le gain de sortie influence la commande qui est directement envoyée au procédé. Il existe un fort lien entre les gains d'entrées et le gain de sortie puisque le réglage des gains d'entrées influe sur la sortie du CF. À la limite, un mauvais choix de réglage aurait pour conséquence de biaiser les résultats. L'erreur et sa variation est donné par l'expression suivante :

$$E(t) = G_e [r(t) - y(t)] \quad (\text{III.5})$$

$$\Delta E(t) = G_{\Delta e} [e(t) - e(t-1)]$$

Remarque : Comme, il y a un risque de dépassement des valeurs maximales, un limiteur a été placé à la sortie du CF pour assurer en tout temps une valeur de sortie $u(t)$ comprise dans l'intervalle de l'univers du discours de la sortie.

III.6.1 Ensembles flous (Fonctions d'appartenance)

Pour les fonctions d'appartenance, on a choisi pour chaque variable les formes triangulaires et trapézoïdales comme le montre la figure suivante :

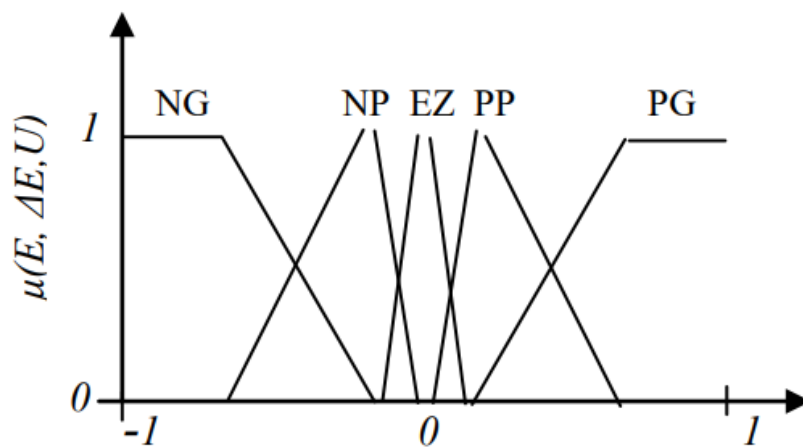


Figure III.9 : Ensembles flous de l'erreur, la variation d'erreur et de la commande

Chacune des deux entrées linguistiques et la sortie du CF possède cinq ensembles flous qui sont définis sur l'intervalle $[-1, 1]$. Il est généralement plus facile de commencer avec un nombre restreint de valeurs linguistiques possibles, pour simplifier le design initial. Si la précision demandée est plus grande, on peut ajouter des valeurs linguistiques. Puisque un trop grand nombre d'ensembles dévoreurs d'espace mémoire et nécessite un temps de calcul plus

long lorsque le contrôleur est en fonction. Il est noté aussi qu'il existe plusieurs façons de définir les valeurs numériques de chaque fonction d'appartenance ; elles peuvent être symétriques et distribuées de manière équidistante. Elles peuvent également être symétriques et distribuées de manière non équidistante.

Les variables linguistiques sont notées comme suit : NG pour négatif grand, NP pour négatif petit, EZ pour environ zéro, PP pour positif petit, et PG pour positif grand.

III.6.2 Inférence floue

Les règles floues permettent de déterminer le signal de sortie du régulateur en fonction des signaux d'entrée. Elles relient le signal de sortie aux signaux d'entrée par des conditions linguistiques prenant en compte l'expérience ou le savoir-faire acquis par un opérateur humain. Ces relations fournissent ensuite la base des règles à partir de laquelle les décisions peuvent être prises. Comme nous l'avons introduit précédemment, le module d'inférence est constitué de deux blocs, le moteur d'inférence et la base des règles, ce dernier est de type « Si...Alors »,

Dans la littérature, il existe plusieurs types de systèmes d'inférence floue qui peuvent être mis en œuvre dans les systèmes flous [33]. Par exemple, la méthode de Mamdani qui utilise les opérateurs min et max pour l'implication et l'agrégation, ou encore la méthode de Larsen qui utilise un produit et l'opérateur max, ou celui de Sugeno [34] qui utilise une fonction linéaire ou une constante pour les signaux de sortie. La méthode d'inférence floue de type Mamdani est la méthodologie la plus couramment utilisée.

Les règles d'inférences conduisent à adopter une table de décision anti-diagonale, résumant les règles choisies; cette table qui figure dans le tableau III.I est appelée matrice de MACVICAR- WHELAN [35]. Ce tableau montre la matrice d'inférence de CF pour une partition de 5 sous-ensembles flous pour chaque variable d'entrée $E(t)$ et $\Delta E(t)$.

$\begin{matrix} E \\ \Delta E \end{matrix}$	NG	NP	EZ	PP	PG
NG	NG	NG	NG	NP	ZE
NP	NG	NP	NP	ZE	PP
EZ	NP	NP	ZE	PP	PP
PP	NP	ZE	PP	PP	PG
PG	ZE	PP	PP	PG	PG

Tableau.III.1 : Matrice d'inférence du régulateur flou pour 5 sous-ensembles Flous

La méthode d'inférence choisie est celle de Mamdani, c'est la méthodologie la plus couramment utilisée [36]. Par conséquent, l'opérateur «ET» est réalisé par le calcul du minimum, tandis que l'opérateur «OU» est réalisé par le calcul du maximum. Dans cette méthode donc, l'opérateur «ET» est représenté par la fonction Produit, l'opérateur «OU» par la fonction Somme ou Moyenne et pour la conclusion, l'opérateur «ALORS» est représenté par la fonction Produit [37]. Alors la sortie floue résultante du régulateur u est la contribution des 25 règles floues de la matrice d'inférence. Elle est donnée par :

$$u_{res}(x) = \frac{1}{25} \sum_{i=1}^{25} (u_{ri} u_{xi}(x)) \quad (III.6)$$

Tels que :

u_{ri} : est le degré de vérification de la condition de la règle (produit du degré d'appartenance de E et AE aux deux ensembles flous de la i^{eme} règle) ;

u_{xi} : est l'ensemble flou de la commande correspondant à la conclusion de la e règle et est une valeur de la commande variant dans l'univers de discours.

III.6.3 Défuzzification

Lorsque les sorties floues sont calculées, il faut les convertir en une valeur déterministe à partir de la surface totale de toutes les fonctions d'appartenance. Cette dernière étape pour ce mode de contrôle (défuzzification) se fait à l'aide de la méthode de calcul du centre de gravité, Le calcul de la Solution précise dc , d'une solution floue à l'aide de la méthode du centre de gravité est défini par (III.7) [38] Cette méthode est caractérisée par sa simplicité de calcul et sa sortie est unique.

$$dc_n = x_{Gr} = \frac{\sum_{i=1}^{25} u_{ci} x_{Gi} . Si}{\sum_{i=1}^{25} u_{ci} . Si} \quad (\text{III.7})$$

Ou S_i est la surface de l'ensemble flou de l'incrément de la commande Δ_{Cn} , correspondant à la i^{eme} règle et X_{Gr} , est l'abscisse de son centre de gravité.

III.7. Réglage des courants rotoriques de la MADA :

Nous allons maintenant reprendre le même schéma de la commande vectorielle sauf que cette fois-ci les régulateurs de courants rotoriques sont des régulateurs flous (figure (III.9)).

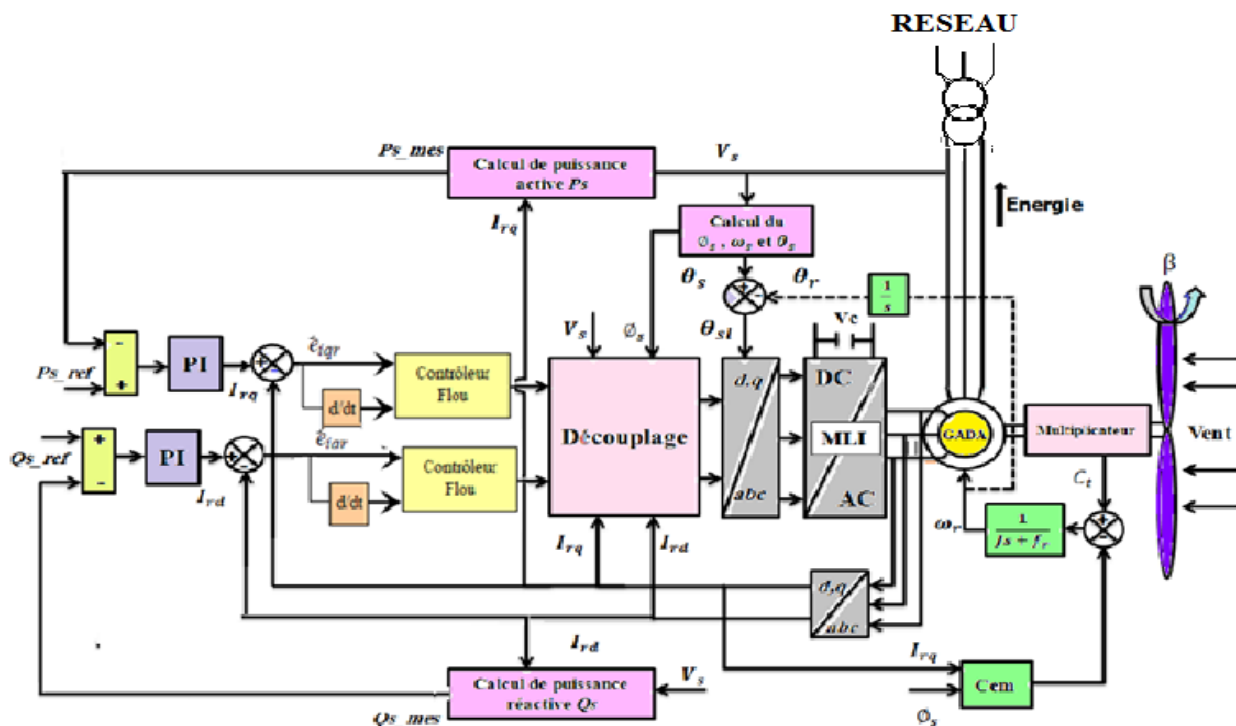


Figure . III.10. Schéma bloc global de la commande floue.

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

III.8. Résultats de simulation :

Les résultats de simulation de notre système éolien (Turbine + GADA) contrôlé par des Régulateur floue.

Le démarrage est à vide puis on applique une puissance active de référence :

- ❖ Entre t=0.2s et t=0.6 s échelon négative ($P_{\text{réf}} = -20000\text{W}$) ;
- ❖ Entre t=0.6s et t=1s ($P_{\text{réf}} = -10000\text{W}$) ;

La puissance réactive :

- ❖ Entre $t=0$ s et $t=1$ s échelon ($Q_{\text{réf}} = 0$ var) ;

Les figures ci-dessous montrent les performances de la commande floue en Puissance actives et réactives statorique appliquée à la GADA. Le régulateur PI est remplacé par un régulateur flou.

A travers les figures (III.11) à (III.12), nous observons que les composantes directes et en quadrature des courants statoriques et rotoriques suivent leurs valeurs de références, au vu de ces résultats, une meilleure poursuite du régulateur flou par rapport à celle du régulateur PI. Les régulateurs flous ne génèrent aucun dépassement, particulièrement au régime transitoire. Pour les autres performances, elles sont quasi similaires à celle du régulateur PI.

Figure (III.18) montre la forme d'onde de la tension et du courant statoriques. On peut remarquer que la tension statorique est égale à celle du réseau, alors que la forme d'onde du courant est liée à celle de la puissance active et la puissance réactive.

Le courant et la tension statoriques sont en opposition de phase, comme le montre la figure (III.18). Ceci signifie que la puissance active statorique est envoyée de la génératrice vers le réseau. Il faut noter que les formes d'onde de la tension et celle du courant statoriques sont indépendantes du profil de la vitesse du vent.

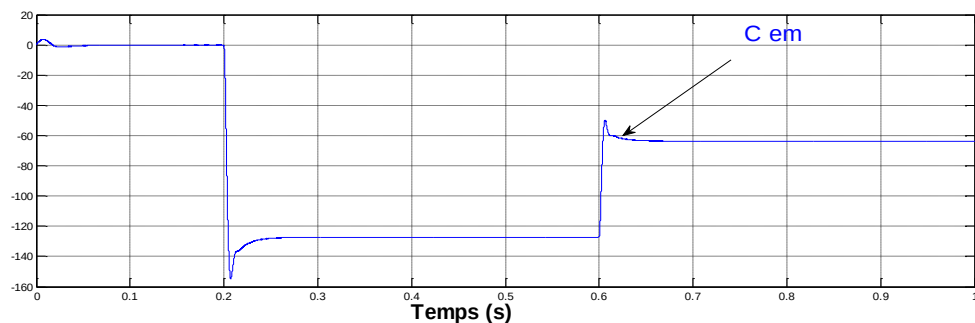


Figure. III.11. Couple électromagnétique

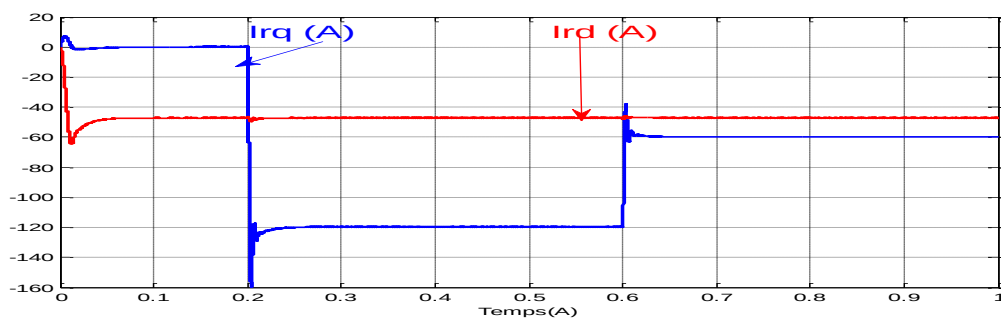


Figure. III.12. Les courants directs et quadrature rotoriques.

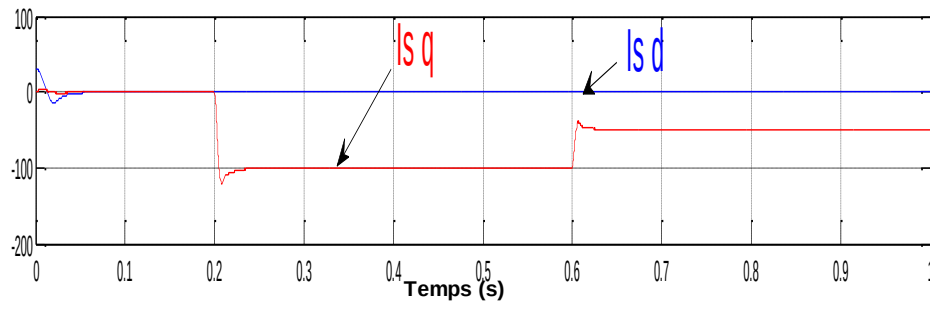


Figure. III.13. Les courants directs et quadrature statorique.

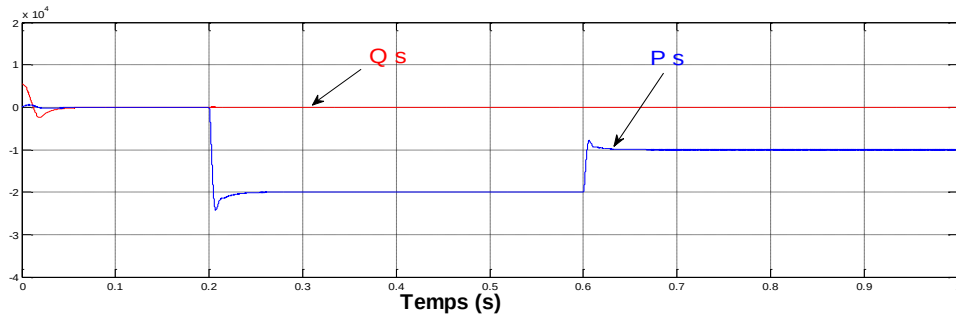


Figure. III.14. Puissance active (W) et Puissance réactive (VAR) statorique

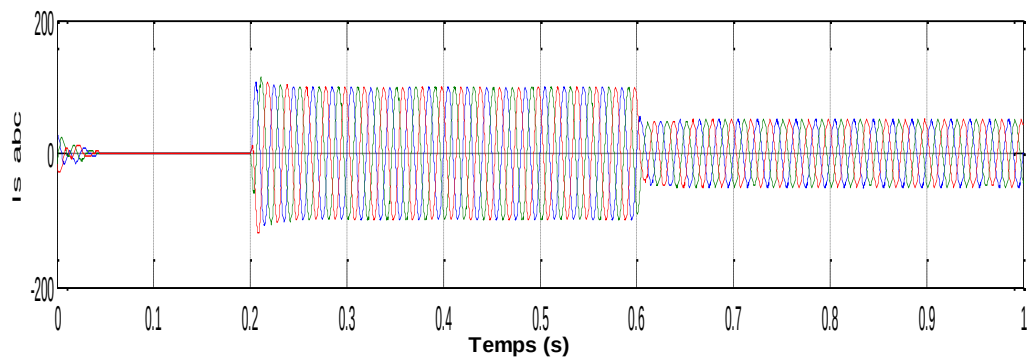


Figure. III.15. Courant triphasé statoriques

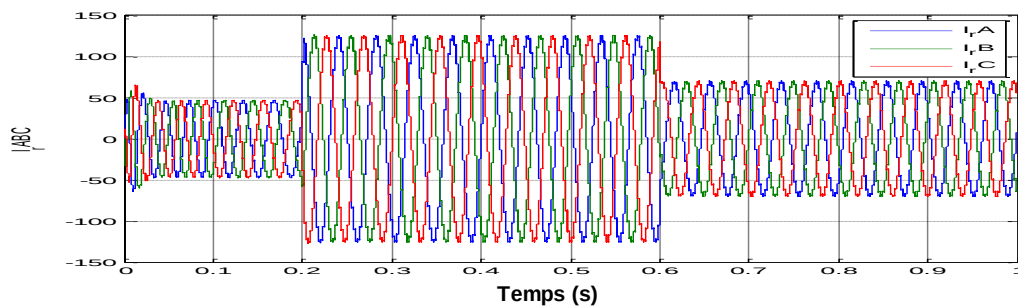


Figure. III.16. Courant triphasé rotorique

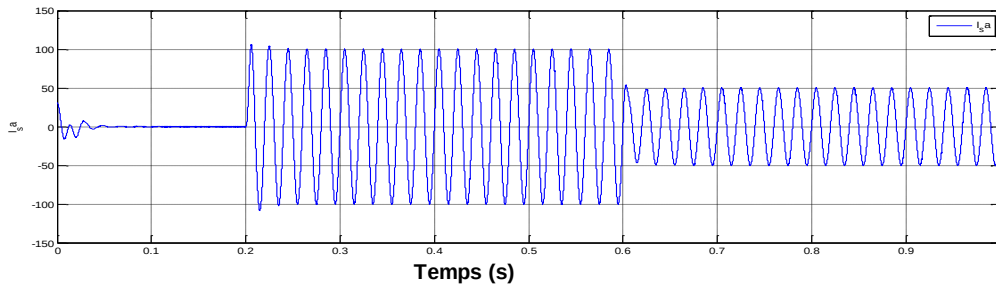


Figure. III.17. Courant par phase statoriques

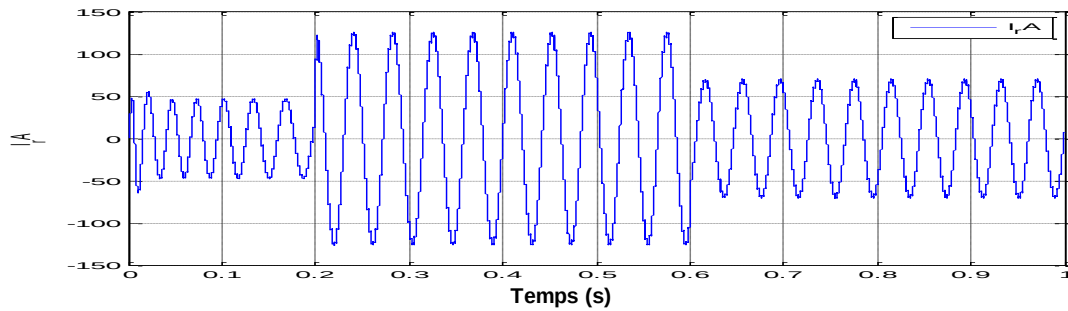


Figure. III.18. Courant par phase rotorique

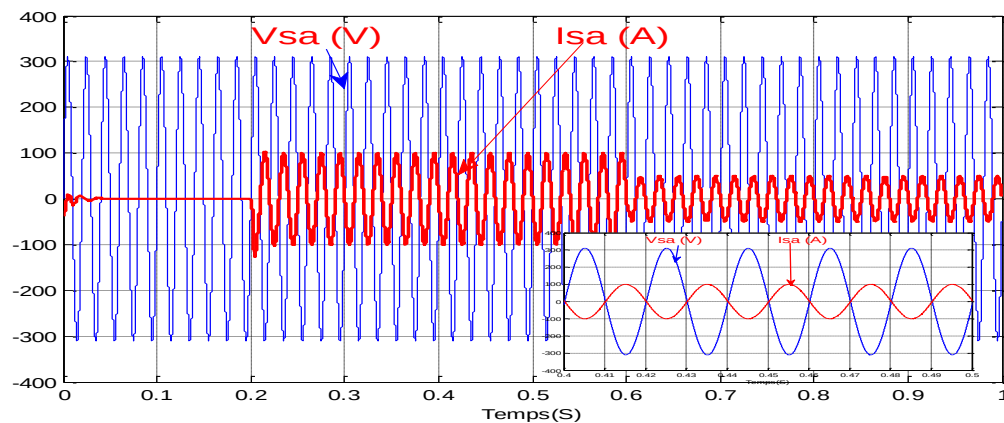


Figure. III.19. Le courant et la tension statoriques avec Zoom

III.9. Tests de robustesse :

Pour les tests de robustesse de la commande par les régulateurs flous, nous avons étudié l'influence de la variation de la résistance rotorique, inductance propres et mutuelle sur les performances de la commande.

Nous avons simulé le système pour une augmentation de 50% de la résistance rotorique (R_r) introduite à $t = 0.3s$, aussi une diminution de 25% des inductances et mutuelle (L_r , L_s et M) introduite à $t = 0.3s$. Les figures (III.19- III.25) illustrent les résultats du test de simulation.

Les figures (III.21) à (III.25) montrent respectivement que ces variations paramétriques introduites à l'instant $t = 0.3s$ n'influent carrément pas sur les performances de la commande ; aucun dépassement.

De ce qui précède, les résultats obtenus avec les tests de robustesse montrent la supériorité du régulateur flou utilisé par rapport au régulateur PI.

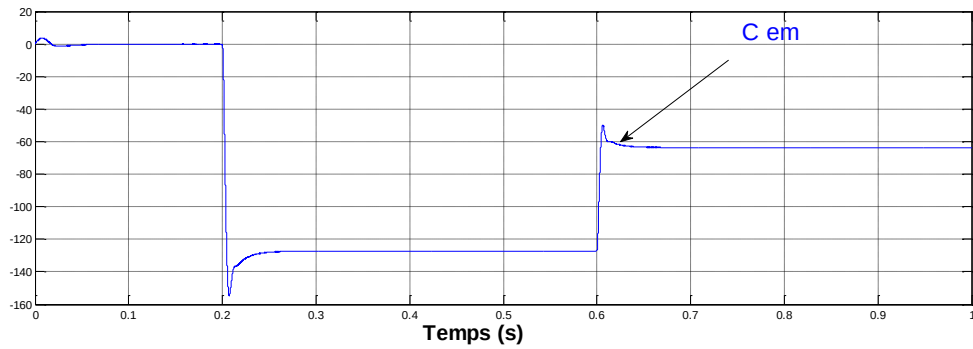


Figure. III.20. Couple électromagnétique

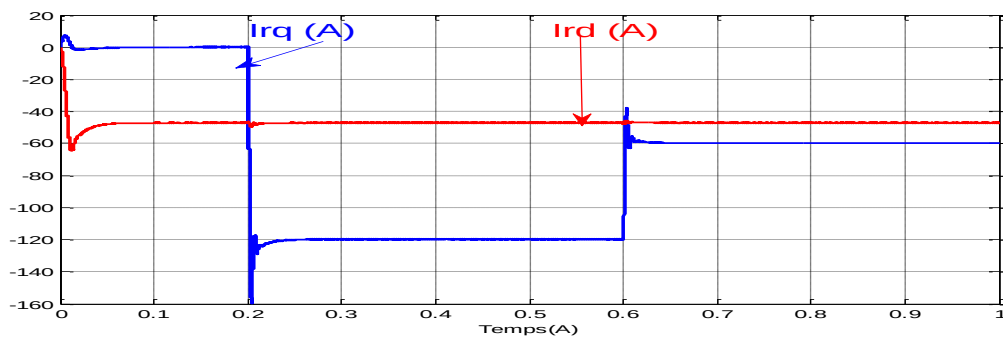


Figure. III.21. Les courants direct et quadrature rotoriques.

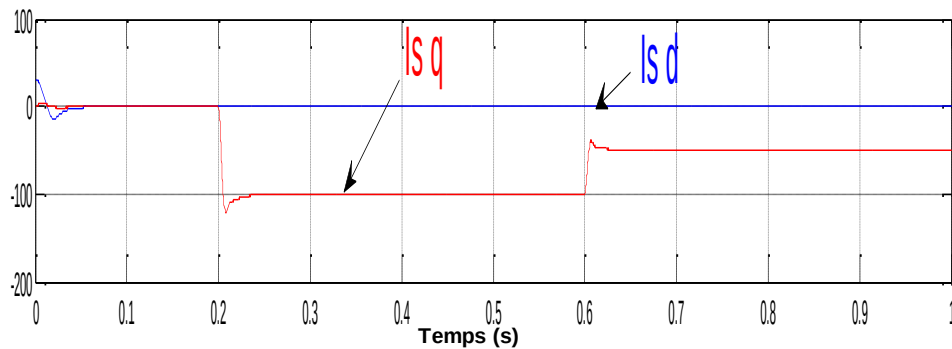


Figure. III.22. Les courants direct et quadrature statorique .

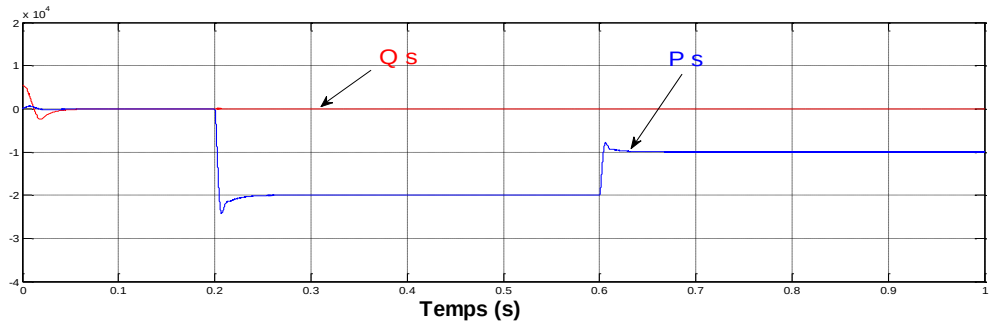


Figure. III.23. Puissance active (W) et Puissance réactive (VAR) statorique

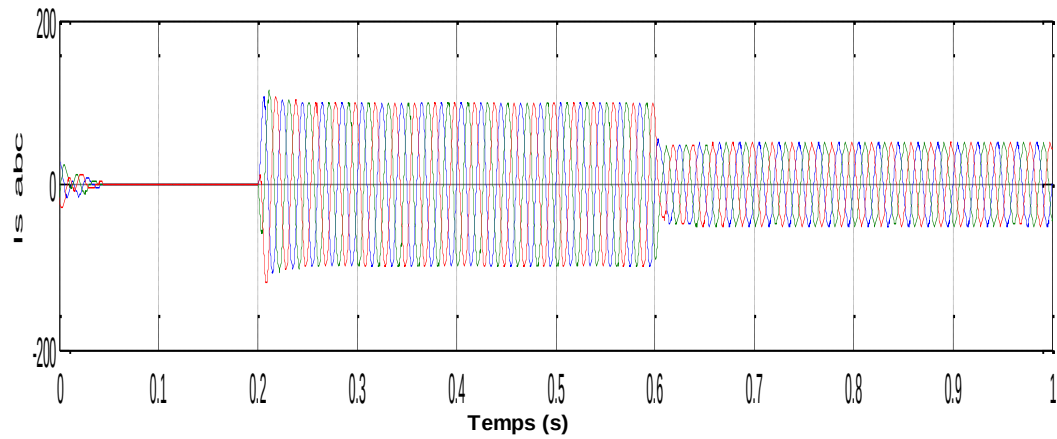


Figure. III.24. Courant triphasé statoriques

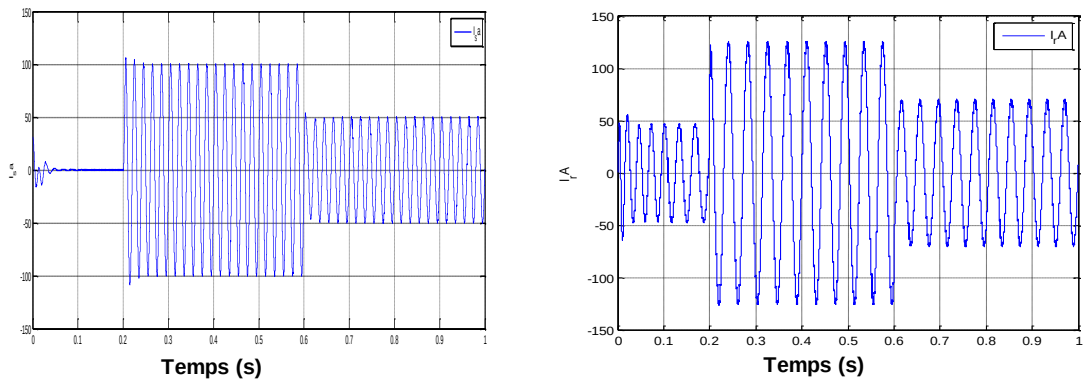


Figure. III.25. Courant par phase statoriques et rotorique

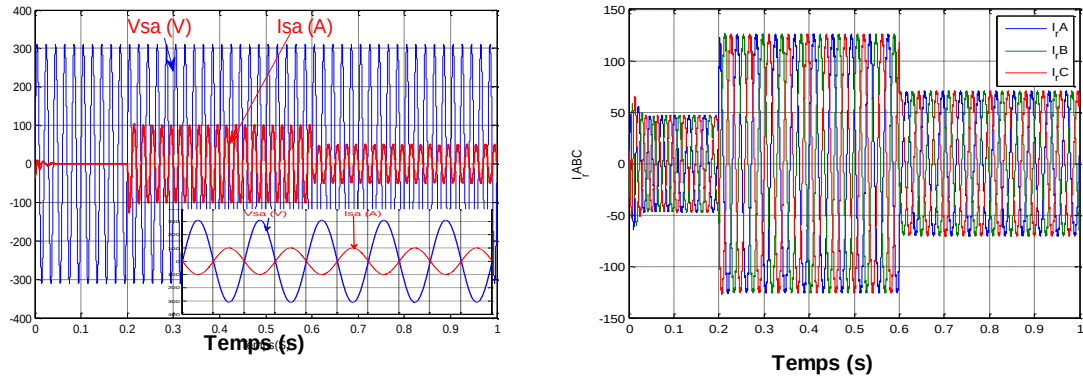


Figure. III.26. Le courant et la tension statoriques et rotorique

III.10. Conclusion :

Dans ce chapitre, la technique de la logique floue a été exposée. Un contrôleur à logique floue utilisant la notion de table de décision hors ligne est implantée dans la commande vectorielle pour la machine asynchrone à double alimentation (DFAM). Ce choix de la commande a été justifié par la capacité de la logique floue à traiter l'imprécis, l'incertain et le vague.

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

Cependant, un système flou est difficile à appréhender. Sa commande et son réglage peuvent être relativement long. Il s'agit parfois beaucoup de tâtonnement que d'une réelle réflexion. Il manque donc à la logique floue un moyen d'apprentissage performant pour régler un système flou.

CONCLUSION GENERALE

Le travail effectué dans ce mémoire a comme objectif la modélisation de différents composants de la production décentralisée de l'énergie éolienne, et l'étude de différents systèmes de contrôle de la génératrice.

Pour ce faire, on a présenté l'état de l'art sur les différents types d'éoliennes existantes, les différentes génératrices utilisées, notre étude a été orientée vers un système éolien d'axe horizontal de puissance fonctionnant à vitesse variable à base d'une MADA pilotée au le rotor, par un convertisseur MLI.

Il est noté que l'utilisation de la MADA dans les éoliennes connaît une évolution très rapide à cause de ses performances vis-à-vis des autres machines, et aussi grâce aux progrès technologiques. Néanmoins, il en demeure quelques problèmes notamment liés aux contacts mécaniques (bagues). Ainsi la majeure partie des éoliennes modernes industrielles est constituée de génératrice asynchrone à double alimentation car elle apporte non seulement des solutions aux variations incessantes du vent, mais aussi permet un transfert optimal de la puissance au réseau.

Afin de contrôler l'échange de puissances active et réactive entre la machine et le réseau on a utilisée Une commande vectorielle. Nous avons effectué une synthèse du régulateur la logique floue et testé et comparé ses performances en suivi de consigne, face aux perturbations et aux variations de paramètres. le modèle servant de base au calcul du régulateur est simplifié et, même si la précision statique est meilleure, les performances transitoires du régulateur sont moins bonnes que dans le cas du contrôle indirect.

Difficultés rencontrées

Au cours de notre travail nous n'avons pas échappés à quelques problèmes :

Le choix des paramètres du correcteur de type proportionnel-intégral a été fait par plusieurs essais, ceci réside dans le fait de chercher les paramètres qui donnent le réglage le plus optimal, tout en simulant pour avoir réponse plus rapide sans qu'il y ait de dépassement.

Suggestions et perspectives

Suite aux résultats obtenus dans cette étude, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement de la MADA sont envisageables:

- Etablissement d'un modèle de la MADA prenant en compte la résistance de phase statorique et la saturation magnétique.
- Utilisation d'autres types de régulateurs plus performants dans la commande du dispositif.
- Utilisation d'un algorithme de maximisation de la puissance captée par différentes techniques : Logique floue, réseau de neurones.

L'étude des perturbations de la production de l'énergie éolienne vis à vis des déséquilibres du réseau.

Références bibliographiques

- [1] Poitiers. F, “Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l’Utilisation de l’Energie Eolienne”, Thèse de l’Ecole Polytechnique de l’Université de Nantes, Nantes, France, 2003.
- [2] Drid. S, “Contribution à la Modélisation et à la Commande Robuste d’une Machine à Induction Double Alimentée à Flux Orienté avec Optimisation de la Structure d’Alimentation: Théorie & Expérimentation”, thèse de doctorat en sciences, université de Batna, 2005.
- [3] Panda. D, Benedict. E. L. Venkataramanan. G and Lipo. T. A, “A Novel Control Strategy for the Rotor Side Control of a Doubly-Fed Induction Machine”, Proceedings of Thirty-Sixth IAS Annual Meeting Conference IEEE, Vol.3, pp. 1695-1702, Oct 2001.
- [4] Heller. M and W. Schumacher, “Stability analysis of doubly-fed induction machines in stator flux reference frame”, Proc. EPE (Trondheim), vol. 2, p. 707-710, 1997.
- [5] Morel. L, Godfroid. M, Kauffmann. J.M, „„Application and Optimal Design of Double Fed Induction Machines in Generator and Motor Operating”, Cigre, Moscou, Russia, 1995.
- [6] Morel. L, Godfroid. M, Kauffmann. J.M, „„Optimal Design of Double Fed Induction Machines in Motor Operating”, ICEM Proceedings, Spain, 1996.
- [7] Morel. L, Godfroid. M, Mirzaian. A, Kauffmann. J.M, „„Double-Fed Induction Machine : Converter Optimization and Field Oriented Control Without Position Sensor”, IEEE Proc. Electr Power Appl. 145, No. 4, pp. 360-368, July 1998.
- [8] Lecocq. D, Lataire. P.H, „„The Indirect Controlled Double Fed Asynchronous Motor for Variable Speed Drives”, EPE Conference, Vol. 3, pp. 405-410, Sevilla, 19-21 September. 1995.
- [9] Lecocq. D, Lataire. P.H, „„Study of a Variable Speed, Double Fed Induction Motor Drive System with Both Stator and Rotor Voltages”, Controllable Proc. EPE, pp. 337-339, Firenze, 1991.
- [10] Vidal. P. E, „„Commande non Linéaire d’une Machine Asynchrone à Double Alimentation”, Thèse de Doctorat de l’Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.

- [11] Masmoudi. A, Toumi. A, Kamoun. M, ,,,Power on Analysis and Efficiency Optimization of a Doubly Fed Synchronous Machine"", Proceedings Electric Machines and Power Systems 21, pp. 473-491, 1993.
- [12] Drid. S, Nait-Said. M.S, Tadjine. M, ,,,Double Flux Oriented Control for the Doubly Fed Induction Motor Electric Power Components and Systems"", Taylor & Francis Inc., 33:1081-1095, 2005.
- [13] Hansen. L. H, L. Heller, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H. Bindner, P. Sørensen, and B. Bak-Jensen, ,,,Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines"", Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, Tech. Rep. Risø-R-1205(EN), ISBN 87- 550-2743-8, 2001.
- [14] L. Xu and C. Wei, ,,,Torque and reactive power control of a doubly fed induction machine by position sensor less scheme"", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 31, no. 3, pp. 636-642, May/June. 1995.
- [15] Petersson .A and S. Lundberg, ,,,Energy efficiency comparison of electrical systems for wind turbines"", in IEEE Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NOR pie/2002), Stockholm, Sweden,12-14 Aug. 2002.
- [16] Peresada. S, A. Tilli and A. Tonielli, "Robust output feedback control of a doubly fed induction machine"", Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE'99 (Bled Slovenia), p.1256-1260, 1999.
- [17]LATRECHE Mohammed Tahar «Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien», Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2012
- [18]TOUAL BELKACEM « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable» mémoire de magister Université de Batna, 2010.
- [19] S. EL-AIMANI, «Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension», Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Centrale de Lille (ECL), 2004.

- [20] H. CAMBLONG, «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable», thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Arts et Métiers de Bordeaux, Décembre 2003.
- [21] A. BOYETTE, «Contrôle-Commande d'un Générateur Asynchrone à Double Alimentation avec un système de stockage pour la production Eolienne Thèse de Doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.
- [22] V. ROGEZ, «Modélisation Simplifiée de Sources de Production Décentralisée pour des Etudes de Dynamique des Réseaux. Application à l'Intégration d'une Production Eolienne dans un Réseau de Distribution Insulaire.», Thèse de Doctorat, Université d'Artois décembre 2004, France
- [23] F. MERRAHI, «Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne)», Mémoire de Magistère, Ecole Nationale polytechnique, Département du Génie Electrique, Laboratoire de commande des processus, ENP d'Alger 2007.
- [24] Y. A. BENCHERIF, «Modélisation et commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la production de l'énergie éolienne», Projet de Fin d'Etude, Ecole Nationale Polytechnique, Département du Génie Electrique, El Harrach, Alger, 2008.
- [25] Kristiansson, B., et B. Lennartson « Evaluation and simple tuning of PID controllers with high-frequency robustness». Journal of Process Control, vol. 16, n° 2, p. 91-102. 2006.
- [26] F. Chevie, F. Guély « La logique floue » Cahier technique n° 191. CT 191 edition mars 1998 une stratégie de regulation.
- [27] J. M. Flaus, « La régulation industrielle, régulateur PID, prédictif et flou », Hermès, 1994.
- [28] A. Kandel, Y. Luo and Y.-Q. Zhang. «Stability Analysis of Fuzzy Control Systems». Fuzzy Sets and Systems, Vol. 105, 1999, pp 33-48.
- [29] N. Muskinja B.Tovornik and D. Donlagic «How to Design a Discrete Supervisory Controller for Real-Time Fuzzy Control Systems» IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol.5, n°2, May 1997, pp 161-166.
- [30] Kouider Laroussi «Développement d'un superviseur flou appliqué à la commande d'un moteur à induction» Thèse de Doctorat. Université M'hamed Bougara-Boumerdes. 2013/2014.

- [31] AZEDDINE CHAIBA «Commande de la machine asynchrone à double alimentation par des technique de l'intelligence artificielle» Thèse de Doctorat. Université de Batna. 2010.
- [31] [32] Dobritoiu, Manue la Carmen «Stabilisateur de réseaux électriques à base de logique floue» M.Sc.A., École Polytechnique, Montréal (Canada). 2003.
- [33] [33]Yen, John, Reza Langari, Lotfi Asker Zadehet IEEE Neural Networks Council. "Industrial applications of fuzzy logic and intelligent Systems". New York. 1995.
- [34] Takagi. T, T. Yamaguchi et M. Sugeno «Conceptual fuzzy sets» In Fuzzy Engineering To ward Human Friendly Systems, 13-15 Nov.1991 (Yokohama, Japan). p.261-72. IOS Press. 1992.
- [35] N. Hamrouni, M. Jraidi, "Measurements and Simulation of PV Pumping Systems Parameters using MPPT and PWM Control Strategies" IEEE MELECON 2006, May 16- 19, Benalmádena (Málaga), Spain 2006
- [36] R.K. Gupta, Bhanu Pant, P.P. Sinha, Rama Mehta, Vijaya Agarwala "Study on Ductility of Ti Aluminides Using Mamdani Fuzzy Inference System" Proceedings of the International Conference on SocPros 2011, AISC 130, pp. 11-22.
- [37] M. TA CAO «Commande numérique de machine asynchrone par logique floue » Université Laval, Ph.D, 1997.
- [38] Laroussi Kouider « Développement d'un superviseur flou appliqué à la commande d'un moteur à induction » Thèse de Doctorat de l'Université de Boumerdès. 2014.

Annexe

Paramètres utilisés

A.1. Les valeurs nominales :

4 kW ; 220/380 V ; 50 Hz ; 15/8.6 A ; 1455 tr /min

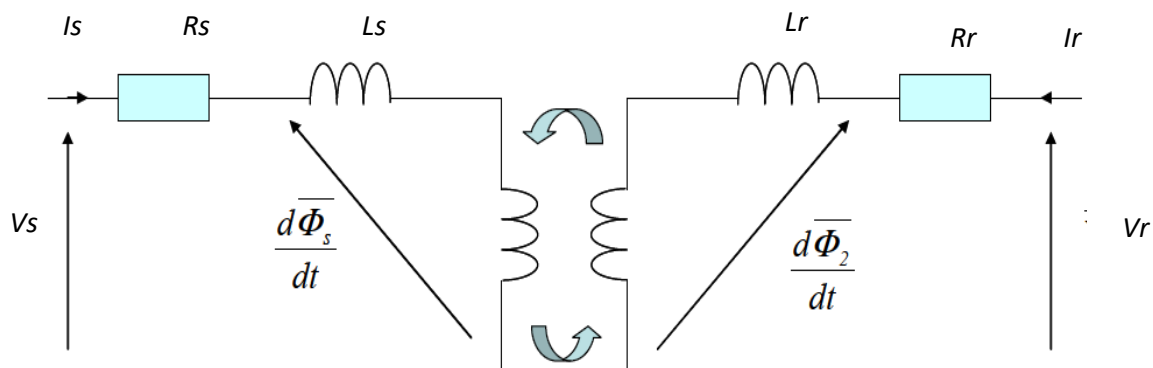
A.2. Paramètres de la turbine éolienne utilisée :

- Nombre de pales = 3.
- Rayon de la surface balayée par les pales : $R = 3\text{m}$.
- Gain du multiplicateur : $G = 5.4$.
- Densité de l'air à 15°C : $\rho = 1.225 \text{ kg. m}^{-3}$

A.3. Constantes mécaniques :

- Moment d'inertie de la turbine $J_{\text{turbine}} = 0.2 \text{ kg.m}^2$.
- Coefficient de frottement visqueux : $f = 0.001 \text{ N.m.s/rd}$.

A.4. Données de la machine à double alimentation (MADA)



- R_s (Résistance du stator) = 1.2Ω
- R_r (Résistance du rotor) = 1.8Ω
- L_s (Inductance du stator) = 0.1554 H
- L_r (Inductance du rotor) = 0.1568 H
- M (Inductance mutuelle) = 0.15
- P (Nombre de paire de pole) = 2

