



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Ahmed Draïa
Faculté Science et de la Technologie
Département Sciences et de la Technologies



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER EN ELECTROTECHNIQUE
OPTION: RESEAUX ELECTRIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité: Commande Electrique

Thème :

Réglage et commande de puissance d'un
aérogénérateur asynchrone

Présenté par :

- OUDALI SAMIRA

- ZAOUAK IMANE

Devant le jury composé de :

Encadreur : Dr. SAIDI Ahmed

Co-Encadreur : Dr. HARROUZ Abdelkader

Président : Dr. Berbaoui Brahim

Examineur : Dr. Arama Fatima Zohra

Université Ahmed Draïa. Adrar.

Université Ahmed Draïa. Adrar.

Université Ahmed Draïa. Adrar.

Université Ahmed Draïa. Adrar.

Année Universitaire 2020/2021

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne populaire et démocratique
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE AHMED DRAYA - ADRAR

BIBLIOTHÈQUE CENTRALE

Service de recherche bibliographique

N°.....B.C/S.R.B//U.A/2021



جامعة احمد دراية - ادرار

المكتبة المركزية

مصلحة البحث الببليوغرافي

الرقم.....م.م/م.ب.ب/ج.أ/2021

شهادة الترخيص بالإيداع

انا الأستاذ(ة):

حور عبد التبار

المشرف مذكرة الماستر.

Réglage et commande de puissance d'un
aérogénérateur asynchrone.

الموسومة بـ :

من إنجاز الطالب(ة): زواوي ابيحاج

والطالب(ة): عود الحبيب سميرة

كلية : العلوم والتكنولوجيا

القسم : علوم وتكنولوجيا

التخصص : تحكم كهربائي

تاريخ تقييم / مناقشة: 2021 / 06 / 20

أشهد ان الطلبة قد قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة التقييم / المناقشة، وان المطابقة بين
النسخة الورقية والإلكترونية استوفت جميع شروطها.
ويمكنهم إيداع النسخ الورقية (02) والأليكترونية (PDF).

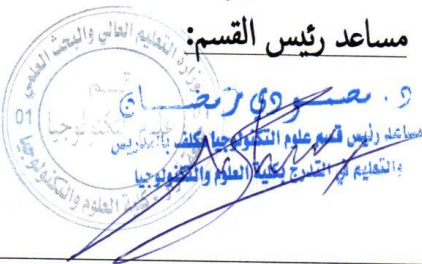
- امضاء المشرف:

A. Hamouzi

07 JUL 2021

ادرار في

مساعد رئيس القسم:



ملاحظة: لا تقبل أي شهادة بدون التوقيع والمصادقة.

Résumé

L'énergie éolienne est l'une des énergies renouvelables les plus prometteuses à développer pour remplacer les énergies non renouvelables pour la production d'électricité concepts de base de la correspondance de conversion en anneau types de turbines et diverses combinaisons de machines électriques et de transformateurs requis par le système ; cette étude présente le développement d'un stratégie de contrôle d'énergie active et réactive pour le stator d'une machine asynchrone à vitesse variable. La majorité des système à vitesse variable utilise généralement un convertisseur AC-DC-AC pour convertir l'énergie produite par la turbine d'éolienne. La concession du système est détaillée dans la mécanique et l'électromagnétique et l'échange de la relation entre le stator et le réseau afin qu'une référence soit donnée au signal de courant rotor et au signal de puissance active et réactive du stator pour extraire le maximum d'énergie disponible du vent dans la campagne éolienne et ceci en appliquant la méthode MPPT de puissance maximale de la turbine. Des simulations sont réalisées sous Matlab/Simulink à l'aide de l'unité de contrôle RLF. Des analyses et des comparaisons sont faites pour différents scénarios d'exploitation : vitesse de référence et durabilité dans des conditions de vitesse de vent caverneux.

Mots clé

Turbine, MADA, convertisseur, Réseau électrique, MPPT, Logique floue

الملخص

تعد طاقة الرياح من أكثر الطاقات المتجددة الواعدة تتطلب التطور لتحل محل الطاقة غير المتجددة لإنتاج الطاقة الكهربائية. المفاهيم الأساسية لسلسلة تحويل الطاقة أنواع التوربينات والتركيبات المختلفة للألات والمحولات الكهربائية التي يتطلبها النظام. تقدم هذه الدراسة تطوير استراتيجية التحكم في الطاقة الناشطة والردية للجزء الساكن للألة اللاتزامنية مزدوجة التغذية (MADA) وتعتبر هنا عنصر توليد الطاقة الكهربائية (GADA) في سلسلة توربينات الرياح ذات السرعة المتغيرة. تستخدم غالبية أنظمة السرعة المتغيرة عموماً محول تيار AC-DC-AC لتحويل الطاقة التي ينتجها المولد المثبت مع توربينات الرياح. تم تفصيل نمذجة النظام ميكانيكياً وكهرومغناطيسياً وتبادل الطاقة بين الجزء الساكن والشبكة بحيث يتم إعطاء مرجع لإشارة تيار الجزء الدوار وإشارة الطاقة الفعالة والنشطة للجزء الساكن لاستخراج الطاقة القصوى المتاحة من الرياح في ريش التوربينات وهذا أثناء تطبيق طريقة الحد الأقصى لطاقة التوربين . MPPT يتم تنفيذ المحاكاة تحت Matlab/ Simulink باستخدام وحدة التحكم ووحدة التحكم المنطقية الضبابية (FLC) يتم إجراء التحليلات والمقارنات لسيناريوهات التشغيل المختلفة : التتبع المرجعي والمثانة في ظل ظروف سرعة الرياح المتغيرة.

الكلمات الدلالية

توربين، MADA ، محول ، شبكة كهربائية ، MPPT ، منطق ضبابي

Dédicace

إلهي لا يطيب الليل إلا بشكرك ولا يطيب النهار إلا بطاعتك ولا تطيب اللحظات إلا بشكرك
ولا تطيب الآخرة إلا بعفوك ولا تطيب الجنة إلا برويتك فأحمدك حمداً كثير على هاته النعم.
إلى من بلغ الرسالة وأدى الأمانة ونصح الأمة إلى نبي الرحمة ونور العالمين
سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم .

إلى من شملتني في الصغر بعد الله تعالى تربيتهم وأحاطتني بعد حفظ الله تعالى في الكبر
دعواتهما.....والديّ الكريمين.....براً وإكراماً.

((إلى روح والدي الذي فارقتني قبل أسبوع من إتمام هذا العمل رحمه الله))

إلى من معهم ضحكت وبكيت عاتبت وتأنيت له صليت ودعيت إخوتي الإغزاء أسماؤكم
خطت في قلبي لأعلى الورق حفظكم المولى ورعاكم.
إلى بسمة وبراعة المنزل الرياحين الصغار خاصة "....يوسف زياد".
إلى محط زهوي واعتمادي ومكمن فخري واعتزازي. .عائلتي الكبيرة.. أدامها المولى
ذخراً وفخراً.

إلى من حبها سكن فؤادي صاحبة القلب الطيب والنوايا الصادقة...معها سرت الدرب
خطوة بخطوة أختي " سميرة " حفظها الرحمان ورعاها.

إلى من علمونا حروفاً من ذهب وكلمات من درر وصاغوا لنا علمهم حروفاً ومن فكرهم
منارة سيرة العلم والنجاح أساتذتي الكرام من الطور الابتدائي إلى غاية الدراسة الجامعية.

IMANE

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

(قل اعملوا فسيرى الله عملكم ورسوله والمؤمنون)

لك الحمد ربي على عظيم فضلك وكثير عطائك

اما بعد:

إنه لا يسعني في هذا المقام المبارك أن أهدي ثمرة هذا العمل المتواضع:
إلى من بلغ الرسالة وأدى الأمانة ونصح الأمة وكشف الغمة نبي الرحمة و معلم البشرية
ومنبع العلم سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم
إلى من كلفه الله بالهبة والوقار .. إلى من علمني العطاء بدون انتظار .. إلى من أحمل أسمه
بكل افتخار أرجو من الله أن يمد في عمرك لترى ثماراً قد حان قطافها بعد طول انتظار وستبقى
كلماتك نجوم أهدي بها اليوم وفي الغد وإلى الأبد (والدي العزيز حفظه الله وبارك في عمر).
إلى ملاكي في الحياة .. إلى معنى الحب وإلى معنى الحنان والتفاني .. إلى بسمة الحياة وسر
الوجود إلى من كان دعائها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي إلى فضاء المحبة وبحر الحنان،
ريحانة الدنيا وبهجتها (أمي الغالية حفظها الله)

إلى من حبهم يجري في عروقي ويلهج بذكرهم فؤادي الأعمدة التي أظل ارتكز عليها
للصمود : أخواني وأخواتي(عبد الجبار فايذة ياسين بوبكر وزهري الفتية ملاك راعهم الله)
إلى محمل العز والافتخار عانلتي الكبيرة من اجداد احوال و اعمام وزوجاتهم وخالات
وعمات وابنائهم

إلى رفيقات ورفقاء المشوار الذين قاسموني لحظاته راعهم الله ووفقهم اخصهم رفيقتي
ومن خطت معي الدرب في كل خطوة زميلتي ومن امنحها كل التقدير (ايمان) طيب الله
حياتها وجميع دفعة 2021

المعادلة التي ترسم منحني حياتي، اصدقائي الذين تسكن صورهم وأصواتهم أجمل
اللحظات والأيام التي عشتها

إلى من علمونا حروفاً من ذهب وكلمات من درر وعبارات من أسمى وأجلى عبارات في
العلم إلى من صاغوا لنا علمهم حروفاً ومن فكرهم منارة تنير لنا سيرة العلم والنجاح إلى
أساتذتنا الكرام.

إلى من حمل هذه الرسالة وانتفع بها بعدي .
وصلت رحلتي الجامعية إلى نهايتها بعد تعب ومشقة وها أنا ذا اختتم بحث تخرجي بكل هممة
ونشاط وامتن لكل من كان له الفضل في مسيرتي بالأخص الاساتذة المبجلين.

SAMIRA

sommaire

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre 01 : l'état de l'art de système énergétique

1.1 Introduction	3
1.2. Energie mondiale et changement climatique	3
1.3. La transition energetique	3
1.3.1. LES PRINCIPAUX ENJEUX DE LA TRANSITION ENERGETIQUE :	4
1.4. Les energies renouvelables.....	4
1.4.1. POTENTIEL ENERGETIQUE EN ALGERIE :	5
1.4.1.1. Programme de développement des energies renouvelables.....	5
1.4.3. LES TYPES DES ENERGIES RENOUVELABLES	6
1.5. Energie A Base d'eolienne.....	7
1.5.1. POTENTIEL EOLIENNE (L'ENERGIE EOLIENNE EN ALGERIE)	7
1.5.1.1. Ferme Expérimentale De l'énergie Eolienne Kabartene (Adrar)	9
1.5.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE EOLIENNE :	9
1.5.3. DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNES	10
1.5.3.1. Selon Axe :	10
1.5.3.2. Selon Vitesse :	13
1.5.4. INTERET DE LA VITESSE VARIABLE.....	15
1.5.5. CONSTITUTION D'UNE EOLIENNE	15
1.5.6. MACHINES DE CHAINE DE CONVERSIONS ELECTROMECHANIQUES :	18
1.5.6.1. Système Autonome :	18
1.5.6.2. Système Coté Réseau	19
Conclusion.....	21

Chapitre02: Modélisation de système éolienne base sur GADA

2.1. Introduction :	23
2.2. Conversion de l'energie éolienne.....	23
2.2.1. LOI DE BETZ	23
2.3. Modelisation d'un Systeme Eolienne.....	26
2.3.1.PARTIE MECANIQUE	26
2.3.2.DIFFERENT PHASES DE FONCTIONNEMENT DE L'EOLIENNE A VITESSE VARIABLE.....	28
2.3.3. METHODE DE RECHERCHE DU POINT MAXIMUM DE PUISSANCE.....	29
2.3.4. PARTIE ELECTROMAGNETIQUE.....	31
2.3.4.1. Modélisation de la machine asynchrone double alimentation(mada).....	31

sommaire

2.3.4.2.modélisation de convertisseur de puissance.....	36
Conclusion :.....	41
Chapitre 03: Commande Et Résultat De Simulation De Gada Par Pi Et Logique Floue	
3.1 Introduction	43
3.2. Strategie de la commande :	44
3.2.1.PRINCIPE DE M.P.P.T.	44
3.2.2.PROCEDE DE COMMANDE	45
3.3.commandes-en MPPT (maximum power point tracking)	46
3.3.1. COMMANDE MPPT MAXIMISATION DE LA PUISSANCE AVEC ASSERVISSEMENT DE LA VITESSE.....	47
3.3.2.GENERALITES SUR LES REGULATEURS CLASSIQUES (PI) ET LES REGULATEURS FLOUS... 48	
3.3.2.1.principaux objectifs de la commande	48
3.3.2.2. Description des régulateurs PI	49
3.3.3. COMMANDE PAR LOGIQUE FLOU(FLC) DE GADA.....	51
3.3.3.1. La Logique Floue	51
3.3.3.2 Conception Du Contrôleur Flou.....	51
3.3.3.3. Application de la logique floue a la commande de la puissance active et réactive de la gada	54
3.4. Description de systeme de conversion	57
3.5. Simulation du systeme global	58
3.6.simulation et resultat	59
3.7 interpretations des resultats	63
Conclusion.....	65
Conclusion Générale	66
BIBLIOGRAPHIQUE.....	74
ANNEXE.....	74

Liste de figure

Chapitre 01

Fig.1.1 Répartition de la consommation d'énergie primaire en France métropolitaine en 2012 (259,4 Mtep) - Représentation de l'objectif de 20% d'énergies renouvelables en 2020.

(Sources : SOES, les chiffres clés de l'énergie - édition 2013 / Infographie : Ecosources)

Fig.1.2 L'évolution de l'éolienne

Fig.1.3 Cartographique des grandes régions de vent en Algérie

Fig1.4 carte représentée les vitesses de vent en Algérie

Fig.1.5 Les éoliennes de Kabertene

Fig.1.6 Principe de la conversion d'énergie.

Fig.1.7 Éoliennes à axe vertical : turbine Savonius. Turbine Darrieur et Darrieur en H.

Fig.1.8 Eoliennes à axe vertical

Fig.1.9 les éoliennes offshores .

Fig.1.10 les éoliennes onshores

Fig.1.11 éolienne en amont et en aval

Fig.1.12 Eoliennes à axe horizontal.

Fig.1.13 Éolienne à vitesse fixe

Fig.1.14 Eolienne à vitesse variable

Fig.1.15 Variation de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.

Fig.1.16 Constitution d'une centrale éolienne

Fig.1.17 Constitution de la nacelle

Fig.1.18 Eolienne à génératrice synchrone

Fig.1.19 Structure du stator et des contacts rotoriques de la GADA

Chapitre 02

Fig.2.1 Principe de la conversion d'énergie.

Fig.2.2 Tube de courant autour d'une éolienne

Fig2.3 Coefficient de puissance pour différents types des éoliennes

Fig2.4 Schéma de la turbine éolienne

Fig. 2.5 Caractéristique $C_p=f(\lambda, \beta)$

Fig.2.6 Modèle mécanique de la turbine éolienne.

Fig. 2.7 Modèle mécanique simplifié du multiplicateur.

Fig. 2.8 Schéma bloc fonctionnel du modèle de la turbine

Liste de figure

Fig. 2.9 Caractéristique puissance vitesse quatre zones de fonctionnement de la turbine d'une éolienne .

Fig. 2.10 Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne.

Fig. 2.11 Représentation spatiale de la machine asynchrone dans le repère triphasé

Fig. 2.12 Représentation de la machine dans le repère diphasé.

Fig. 2.13 Architecture de commande du système éolien

Fig.2.14 Schéma de principe de la régulation du CCR

Fig.2.15 Schéma de principe de la commande CCM

Fig.2.16 Onduleur de tension triphasée

Fig.2.17 Principe de commande en MLI sinus-triangulaire

Chapitre 03

Fig.3.1. Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne.

Fig.3.2 Structure de l'algorithme d'optimisation du coefficient de puissance [35].

Fig.3.3. Caractéristiques d'une éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation. asservissement de la vitesse

Fig3.4. Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec

Fig3.5. Schéma fonctionnel d'un processus réglé

Fig.3.6. Réponse typique d'un procédé asservi à un échelon de consigne

Fig.3.7. Schéma de la structure interne de la mise en œuvre d'un contrôleur flou

Fig.3.8. Schéma de principe d'un contrôleur flou

Fig.3.9. Schéma synoptique d'un régulateur flou des puissances active et réactive

Fig.3.10: Ensembles flous de l'erreur, la variation d'erreur et de la commande

Fig.3.11 schéma bloc de la chaîne de conversion étudiée

Fig.3.12 Schéma MATLAB SIMULINK d'un système global

Fig.3.13 Schéma MATLAB SIMULINK d'un système global avec logique flou

Fig.3.14 courants rotorique et statorique de GADA (PI)

Fig.3.15 la tension et le courant de réseau (PI)

Fig.3.16 la tension et le courant de réseau (FLC)

Fig.3.17 les courants et les tensions statorique

Fig.3.18 Courant de la ligne après commande

Fig.3.19 Tension de la ligne

Fig.3.20 les puissances actives et réactive statorique (PI)

Fig.3.21 les puissances actives et réactive statorique (FLC)

Fig.3.22 Vdqr (PI)

Liste de figure

Fig.3.23 Vdqr (FLC)

Fig.3.24 Signal de régulateur PID (PI)

Fig.3.25 Signal de régulateur PID (FLC)

Fig.3.26 Rapport cyclique de commande MPPT floue de convertisseur

Liste de table

Liste de table

Chapitre 01

Tableau 1.1 : Les types des énergies renouvelables

Tableau 1.2 : Avantages et inconvénients des différentes éoliennes.

Tableau 1.3 : Capacité de réglage des différentes éoliennes

Chapitre 02

Tableau 2.1: différent technique de régulation de puissance

Tableau 2.2 : les différents états des interrupteurs et les tensions correspondantes

Chapitre 03

Tableau 3.1 Exemple d'une matrice d'inférence qui convient pour les systèmes de premier ordre

Tableau3.2: Les réglé

Symboles

Symboles

MADA : Machine Asynchrone à Double Alimentation.

MLI : Modulation de largeur d'impulsions.

CCR : Convertisseur côté réseau.

CCM : Convertisseur côté machine.

GADA : Générateur Asynchrone à Double Alimentation.

FLC : Fuzzy Logic Control.

RLF : Régulateur à logique floue.

MPPT : Maximum Power Point Tracking

f : Le coefficient de frottement visqueux de la GADA

p : Le nombre de paires de pôles.

g : Le glissement.

C_{em} : Le couple électromagnétique.

C_r : Le couple résistant.

J : L'inertie des parties tournantes.

w : La vitesse de rotation de l'axe de la GADA.

ω_r : Pulsations des grandeurs électriques rotoriques.

ω_s : Pulsations des grandeurs électriques statoriques.

[P] : Matrice de Park.

[P]⁻¹ : Matrice inverse de Park.

$\theta_s ; \theta_r$: Angle électrique statorique, rotorique.

$I_s ; I_r$: Les courants de phase statorique et rotorique respectivement.

I_{rd} : Composante du courant I_r selon l'axe d.

I_{rq} : Composante du courant I_s selon l'axe q.

$[V_{sabc}]$, $[V_{rabc}]$: Les vecteurs des tensions statoriques et rotoriques suivant les axes a,b,c.

$[\phi_{sabc}]$, $[\phi_{rabc}]$: Les matrices des flux statoriques et rotoriques suivant les axes a,b,c.

$V_{d,}$: La tension rotorique directe et en quadrature respectivement.

[R_s] : Matrice résistance statorique.

[L_r] : Matrice d'inductances rotoriques.

[L_s] : Matrice d'inductances statoriques.

[L_s] : Inductance propre d'une phase statorique

[L_r] : Inductance propre d'une phase rotorique.

[M_s] : Inductance mutuelle entre phases statoriques.

[M_r] : Inductance mutuelle entre phase rotoriques.

M : Mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

ϕ_{sd} : Les flux statoriques direct et en quadrature.

Symboles

φ_{rd} : Les flux rotoriques direct et en quadrature.

φ_s : Les flux statorique et rotorique respectivement.

P_s : Puissance active statorique.

Q_s : Puissance réactive statorique.

P_r : Puissance active rotorique.

Q_r : Puissance réactive rotorique.

PI : Proportionnel – Intégrale.

P : Opérateur de Laplace.

K_p : Gain de l'action proportionnel du régulateur PI.

K_i : Gain de l'action intégrale du régulateur PI.

P_{vent} : Puissance du vent.

ρ : Masse volumique du vent.

V_{vent} : Vitesse du vent.

C_p : Coefficient de puissance.

B : Angle de calage.

P_{tur} : Puissance de la turbine.

S : Surface balayée.

λ : Facteur d'avance (vitesse relative).

Ω_t : Vitesse de la turbine.

Ω_r : Vitesse de rotor de la génératrice.

G : Multiplicateur mécanique.

C_{vis} : Couple des frottements visqueux.

C_g : Couple issu de multiplicateur.

C_t : Couple de la turbine.

R : Rayon de la turbine.

$y(t)$: Signal de mesure.

$r(t)$: Signal de consigne.

$U(t)$: Signal de commande.

$e(t)$: Erreur de mesure.

$\Delta e(t)$: Variation de l'erreur.

$e(t-1)$: Erreur de l'état précédente.

E, ΔE , U : Les valeurs normalisées d'erreur, la variation de l'erreur et celle de la commande.

G_e , $G_{\Delta e}$, G_u : Gains de normalisation.

Introduction générale

Récemment, on constate que la consommation d'énergie électrique augmente dans le monde avec la perméabilité et les limitations des combustibles fossiles (charbon, gaz de pétrole) comme sources d'énergie, et cette dernière se caractérisent par des émissions gazeuses dangereuses de CO₂ avec la production de déchets qui est difficile à traiter. Ce qui a incité les chercheurs à exploiter d'autres sources d'énergie durable que sont les énergies renouvelables. Parmi ces énergies qui contribuent à la production d'électricité l'énergie éolienne a été la première à être exploitée, non pas en alternative aux sources traditionnelles, mais en complément de l'énergie nucléaire.

À l'heure actuelle, le générateur asynchrone à double alimentation GADA est le plus répandu ou utilisé dans la plupart des systèmes éoliens, en raison de son utilisation optimale des ressources éoliennes malgré les différentes conditions de vent, grâce à son fonctionnement à vitesse variable avec l'installation des convertisseurs de puissance statique associés aux systèmes de contrôle. La chaîne de conversion est divisée en deux parties. La partie mécanique, qui se compose à multiplicateur de turbine et de l'arbre de la machine, puis la partie électrique, elle est constituée de GADA. Le stator de ce dernier est directement connecté au réseau électrique et le rotor est connecté via deux axes de puissance bi-axiaux. Afin d'obtenir une plus grande production d'énergie électrique pour les éoliennes, nous appliquons différentes stratégies de contrôle dans les zones d'exploitation comme stratégie MPPT pour une extraction d'énergie maximale. Et compte tenu de l'augmentation de la production d'énergie éolienne via GADA.

L'objectif du système de contrôle est de surveiller les performances de la chaîne de conversion pour un comportement plus efficace. Malheureusement, la modélisation du système peut être difficile, ce qui rend le système de contrôle complexe. Par conséquent, plusieurs moyens ont été trouvés pour traiter le problème, tels que le contrôle du mode glissant, le contrôle non linéaire en raison de la dépendance de la conception des techniques sur le modèle du système, cela est difficile. Ceci a conduit ces dernières années au développement de techniques de contrôle sérieuses caractérisées par l'intelligence artificielle (réseaux de neurones à logique floue...) pour contrôler ces systèmes.

Le but de ce travail est de maîtriser le système de conversion d'une donnée en GADA. Ceci utilise la logique floue et sa compréhension par rapport aux tests de contrôle du transformateur traditionnel basé sur PI. Il est exécuté dans l'environnement de programme MATLAB/SIMULINK. Les résultats des différents tests effectués dans les nombreuses

Introduction générale

simulations seront présentés et interprétés. Le travail est organisé comme suit. Le chapitre 1 présente l'histoire de l'énergie en général et des énergies renouvelables en particulier, l'énergie éolienne, les types de sa chaîne de transformation et les différentes composantes de cette dernière et sa clarification. Le chapitre 2 est consacré à la description et à la modélisation du système, détaillant les stratégies de contrôle, suivi des résultats de simulation au chapitre 3. Nous terminons ce travail par une brève conclusion.

Chapitre 01

*Etat de l'art des
Systèmes énergétiques*

Chapitre 01 Etat de l'art des systèmes énergétique

1.1 .Introduction

L'énergie est un terme qui fait référence à la satisfaction des besoins fondamentaux de la vie humaine à tous égards. Car elle l'utilise sous forme de chaleur, lumière, mouvement, stockée et transmise sous plusieurs formes. Ainsi, l'émergence de l'électricité a provoqué une révolution mondiale dans la capacité de convertir toutes ces formes que l'homme utilisait (chaleur, mouvement, ...). Les ressources fossiles garantissent la production d'énergie dans le monde, et la consommation de ces sources entraîne une augmentation de la pollution de l'environnement par les gaz nocifs émis, et la solution de base ou optimal à ces problèmes est l'utilisation d'énergies renouvelable pure en raison de l'augmentation significative de l'énergie Besoins.

La croissance de la production d'électricité renouvelable devrait rester forte dans les années à venir, compte tenu de la dynamique actuelle des filières éolienne, solaire et biomasse, dont la part dans la production mondiale continue d'augmenter.

1.2. Energie mondiale et changement climatique

La demande mondiale 'énergie primaire a quasiment doublé entre 1971 et 2003 et devrait augmenter de 40% d'ici 2020. Au cours de 30 dernières années, la part du gaz naturel a augmenté, au détriment de celle du pétrole. Ainsi, en 2003, le gaz naturel représentait 21% de l'énergie primaire et 19% de l'énergie de production d'électricité dans le monde.

Utilisé pour le chauffage ou la production d'électricité, le gaz naturel génère moins d'émissions de dioxyde de carbone que le charbon ou le pétrole. Ceci explique pourquoi la courbe des émissions de dioxyde de carbone ces 30 dernières années n'a pas suivi celle de la demande d'énergie, n'atteignant que 70% des valeurs attendues. Pour autant, les gouvernements du monde entier cherchent toujours, dans le cadre de la lutte contre le réchauffement climatique, à réduire les émissions de dioxyde de carbone. Des négociations se poursuivent sous les auspices de nations unies et, en décembre 1997, au sommet de Kyoto, il a été décidé de réduire les émissions globales de gaz à effet de serre de 5% entre 1990 et 2008-2012 et des objectifs nationaux ont été fixés. Le protocole de Kyoto est entré en vigueur le 16 février 2005, après sa ratification par la Russie en novembre 2004.

L'union européenne s'est engagée à réduire ses émissions de 8% et a déterminé des objectifs spécifiques par pays. Le Royaume-Uni, par exemple, s'est engagé à réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 12,5% entre 1990 et 2008-12. En 1997, il s'était déjà fixé un objectif de réduction de 20% de ses émissions de dioxyde de carbone au cours de cette même période. [1]

1.3. La transition énergétique

Chapitre 01 Etat de l'art des systèmes énergétique

Le parc nucléaire vieillissant, la future loi sur la transition énergétique devra trancher pour résoudre la délicate équation du mix énergétique Français : faut t'il développer d'avantage les énergies renouvelables ? Construire de nouvelles centrales nucléaires ? Aller plus loin dans les économies d'énergies? A l'approche de la présentation du projet de loi sur la transition énergétique prévue pour le 18 juin, ce débat complexe reste ouvert... [2] [3]

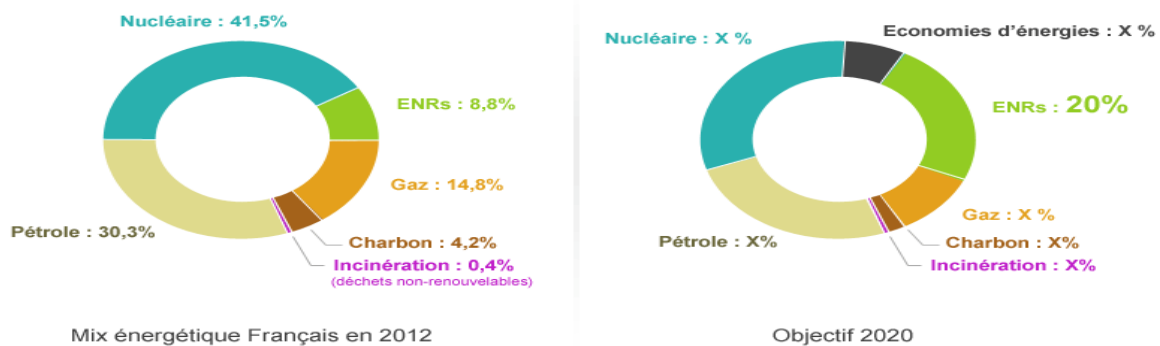


Fig.1.1. Répartition de la consommation d'énergie primaire en France métropolitaine en 2012 (259,4 Mtep) - Représentation de l'objectif de 20% d'énergies renouvelables en 2020. (Sources : SOES, les chiffres clés de l'énergie - édition 2013 / Infographie : Ecosources)

1.3.1. Les principaux enjeux de la transition énergétique :

- Réduire notre dépendance aux énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon)
- Réduire nos émissions de CO₂ pour limiter la hausse de température globale à 2°C.

Pour parvenir à ces objectifs, un consensus se dégage sur le fait qu'il faille :

- Réaliser des économies d'énergies : isolation des bâtiments, appareils basse consommation, Smart grid ...
- Développer des transports non carbonés : ferroutage, voiture électrique ou hydrogène...

Or ce dernier point va entraîner une hausse importante de nos besoins en électricité (le pétrole représentant environ 1/3 de nos apports énergétiques).

Le débat se cristallise donc autour de la question du nucléaire qui n'émet pas de CO₂ et fournit la majorité de l'électricité du pays. [3]

Quelle place pour le nucléaire à l'heure de la transition énergétique ?

1.4. Les énergies renouvelables

Ces dernières années, l'intérêt dans l'utilisation des énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne. Le développement de la technologie des aérogénérateurs a permis à celle-ci de devenir une alternative aux sources

Chapitre 01 Etat de l'art des systèmes énergétique

traditionnelles ; l'énergie éolienne est véhiculée par les vents, ceux-ci sont dus indirectement à l'énergie solaire qui, en créant des différences de température entre les régions chaudes et les régions froides, provoque des vents.

Un aérogénérateur (couramment appelé éolienne) est une machine qui utilise l'énergie éolienne (l'énergie cinétique du vent) pour produire de l'énergie électrique.

Le vent est une ressource propre et inépuisable qui peut produire de l'électricité pratiquement sans l'émission des gaz polluants.

1.4.1. Potentiel énergétique en Algérie :

L'Algérie s'est engagée sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile à travers le lancement d'un programme ambitieux pour le développement des énergies renouvelables qui a été adopté par le Gouvernement en février 2011 et révisée en mai 2015.

L'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable. Le programme des énergies renouvelables actualisé consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22.000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent [4].

1.4.1.1. Programme de développement des énergies renouvelables

A travers ce programme d'énergies renouvelables, l'Algérie compte se positionner comme un acteur majeur dans la production de l'électricité à partir des filières photovoltaïque et éolienne en intégrant la biomasse, la cogénération, la géothermie et au-delà de 2021, le solaire thermique. Ces filières énergétiques seront les moteurs d'un développement économique durable à même d'impulser un nouveau modèle de croissance économique.

37 % de la capacité installée d'ici 2030 et 27 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale, seront d'origine renouvelable.

Le potentiel national en énergies renouvelables étant fortement dominé par le solaire, l'Algérie considère cette énergie comme une opportunité et un levier de développement économique et social, notamment à travers l'implantation d'industries créatrices de richesse et d'emplois.

La stratégie de l'Algérie en la matière vise à développer une véritable industrie des énergies renouvelables associée à un programme de formation et de capitalisation des connaissances, qui permettra à terme, d'employer le génie local algérien, notamment en matière d'engineering et de management de projets. Le programme ENR, pour les besoins d'électricité du marché national, permettra la création de plusieurs milliers d'emplois directs et indirects. [5]

Chapitre 01 Etat de l'art des systèmes énergétique

1.4.3. Les types des énergies renouvelables

Dans le tableau suivant il y a types d'énergies renouvelables, produites à partir de sources différentes.

Type d'énergie	sources différentes
<i>Énergie solaire</i>	<p>Ce type d'énergie renouvelable est issu directement de la captation du rayonnement solaire. On utilise des capteurs spécifiques afin d'absorber l'énergie des rayons du soleil et de la rediffuser selon deux principaux modes de fonctionnement :</p> <ul style="list-style-type: none">• Solaire photovoltaïque (panneaux solaires photovoltaïques) : l'énergie solaire est captée en vue de la production d'électricité.• Solaire thermique (chauffe-eau solaire, chauffage, panneaux solaires thermiques) : la chaleur des rayons solaires est captée et rediffusée, et plus rarement sert à produire de l'électricité.
<i>Énergie hydraulique</i>	<p>Elle désigne les centrales ne dépassant pas 10 MW de puissance. Des turbines installées sur les cours d'eau utilisent la force motrice des chutes pour générer de l'électricité. Celle-ci est injectée dans le réseau ou alimente des sites qui n'y sont pas raccordés. Les petites centrales avec les grands barrages et les usines marémotrices forment la filière hydraulique deuxième source d'énergie renouvelable dans le monde. [7]</p>
<i>Biomasse</i>	<p>L'énergie est issue de la combustion de matériaux dont l'origine est biologique (ressources naturelles, cultures ou déchets organiques). On en distingue trois catégories principales : [6]</p> <p>Le bois énergie : représente 14% de la consommation énergétique mondiale. Issu des déchets de la forêt ou des industries du bois, il est brûlé pour produire de la chaleur.</p> <p>Le biogaz : est issu de la fermentation des déchets organiques. Sa combustion produit de la chaleur, mais également de l'électricité par cogénération.</p> <p>Les biocarburants : proviennent de plantes cultivées (tournesol, betterave, colza...). le biodiesel (ou ester méthylique d'huile végétale, EMHV), l'éthanol, et son dérivé, l'éthyle-tertio-butyle-éther,</p>

Chapitre 01 Etat de l'art des systèmes énergétique

	l'ETBE sont les plus courants. Ils sont mélangés à de l'essence ou à du gazole. [7]
<i>Géothermie</i>	L'énergie est issue de la chaleur émise par la Terre et stockée dans le sous-sol. Selon la ressource et la technologie mise en œuvre, les calories sont exploitées directement ou converties en électricité. [6]
<i>Énergie éolienne</i>	Dans le cas de l'énergie éolienne, l'énergie cinétique du vent entraîne un générateur qui produit de l'électricité. [6] Il existe fabriquent des dizaines de millions de mégawattheures. Utile dans les sites isolés, cette électricité alimente aussi les grands réseaux de distribution. Les éoliennes mécaniques servent à pomper de l'eau dans de nombreux pays. [7]

Tableau 1.1 .Les types des énergies renouvelables

1.5. Energie à base d'éolienne

La production d'électricité éolienne est une opération qui consiste à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique par l'intermédiaire d'un système mécanique appelé «turbine éolienne» entraînant une génératrice électrique. Depuis l'apparition des éoliens, ces derniers sont en progrès perpétuel. L'évolution de ce système de production d'électricité est montrée dans la figure (I.2). [16]

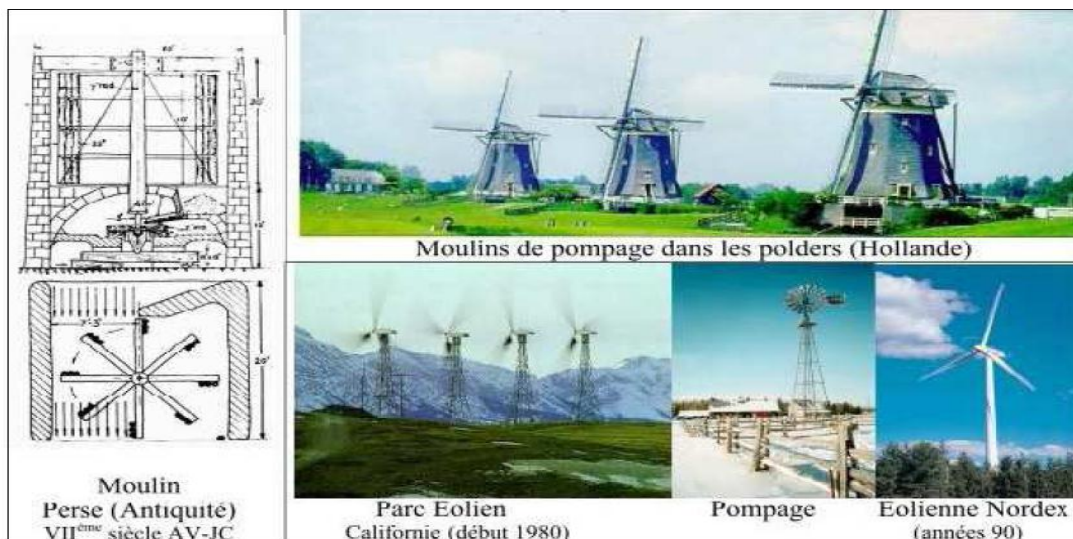


Fig.1.2.L'évolution de l'éolienne

1.5.1. Potentiel éolienne (l'énergie éolienne en Algérie)

L'Algérie à l'instar des autres pays essaye de percer dans le domaine des énergies renouvelables et l'énergie éolienne en particulier, et ce en donnant beaucoup d'importance aux études réalisées dans ce domaine notamment celles qui sont dédiées au cas Algérien

Chapitre 01 Etat de l'art des systèmes énergétique

malgré la prédominance de l'énergie solaire. Une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et annuelle des vents de l'Algérie. Cette présentation de la vitesse sous forme de carte, a deux objectifs : le premier est d'identifier les vastes régions avec des bonnes promesses d'exploitation de l'énergie éolienne. La seconde est de mettre en évidence la variation relative de la ressource à travers les pays. [8] L'Algérie présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser 4 m/s (6 m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7 m/s dans la région d'Adrar figure (1.3)

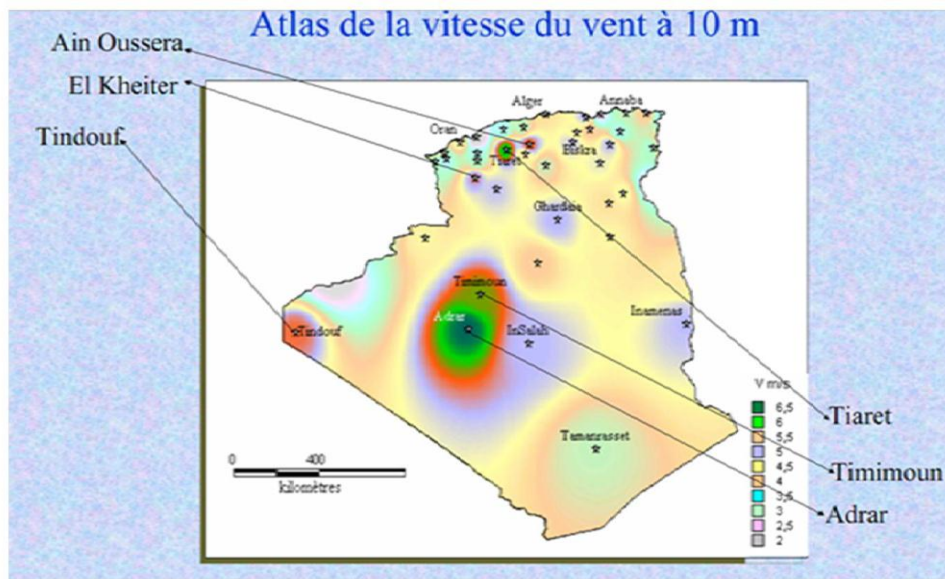


Fig.1.3. Cartographie des grandes régions de vent en Algérie [9]

Cette carte présente les zones les plus ventées pour installer des parcs éoliens qui permettent d'alimenter des régions isolées. La réalisation de la première ferme éolienne en Algérie, d'une puissance de 10 MW (à Adrar sud-ouest), a été confiée le jeudi 21/01/2010 au groupe français VERGNET. Ce dernier a été retenu par la Compagnie de l'ingénierie de l'électricité et du gaz (CEEG), filiale du groupe SONELGAZ. [10]

La carte ci-dessus représentée montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-ouest, avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar. Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. La première expérience en énergie renouvelable utilisée pour le pompage d'eau avec un éolien en Afrique a été effectuée à Adrar l'an 1957 au ksar ouled Aïssa, pour l'irrigation de 50 HEC, ce système éolien a été saboté en 1962 à la sortie des Français de l'Algérie, l'Algérie a un régime de vent modéré (2 à 9 m/s, selon la carte des vents). Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de

Chapitre 01 Etat de l'art des systèmes énergétique

l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux et la Sahara. Le potentiel énergétique est énorme sachant que les régions du sud d'Algérie se trouvent dans un couloir de vent de 6 m/s. En juillet 2014, dans le cadre de la première phase du programme de développement des ENR, l'Algérie a inauguré sa première ferme éolienne de 10 MW. Cependant, l'éolien reste peu développé en Algérie, où le potentiel est relativement faible. C'est pour cette raison que la part de l'éolien dans le nouveau mix énergétique prévu pour 2020 demeure faible. [11]

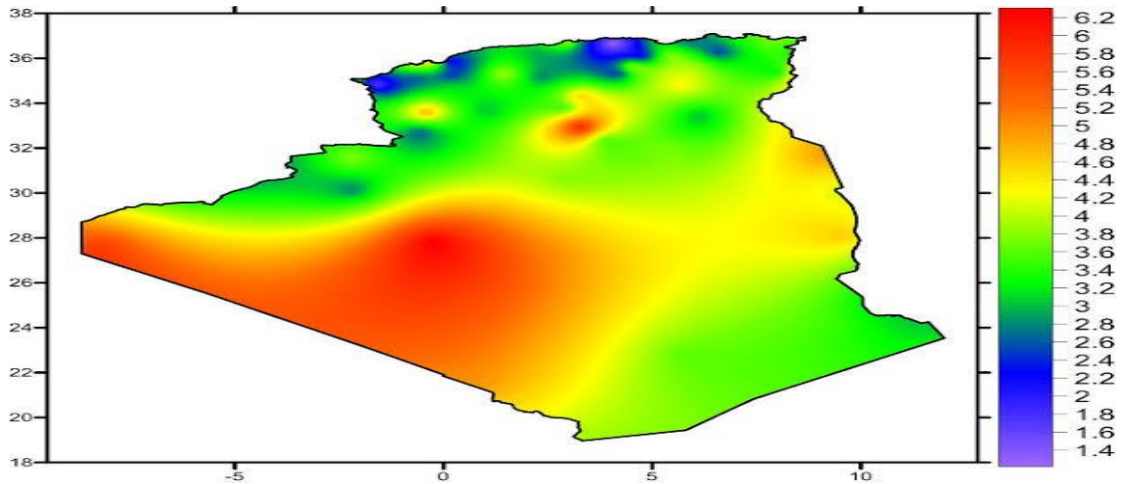


Fig.1.4. carte représentée les vitesses de vent en Algérie

1.5.1.1. Ferme expérimentale de l'énergie éolienne Kabartene (Adrar)

Le parc éolien est situé dans ksar Kabertene, à seulement 73 kilomètres au nord de la ville d'Adrar. Contient à 12 turbine d'air, la puissance totale 10 MW sur une superficie totale de 30 hectares, se caractérise par des vitesses de vent de 6 m / s à 11 m /s. figure (1.5)



Fig.1.5. Les éoliennes de Kabertene

1.5.2. Principe de fonctionnement d'une éolienne :

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passent par la surface active S de la voileure [12].

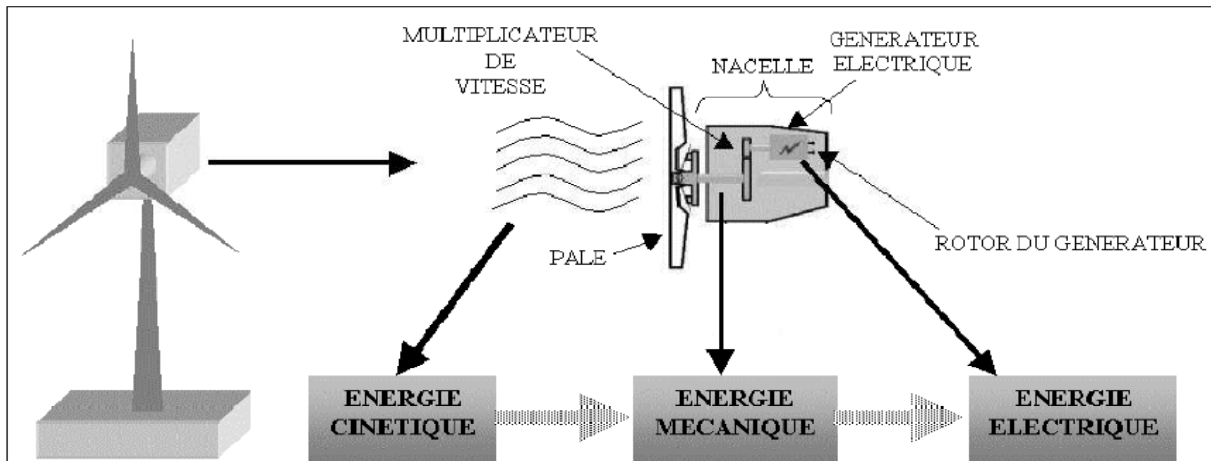


Fig.1.6 Principe de la conversion d'énergie.

1.5.3. Différents types d'éoliennes

Les génératrices éoliennes peuvent être regroupées selon différentes catégories, et un classement est proposé comme suit :

- La nature du convertisseur électromécanique (machine synchrone, machine asynchrone, machine à courant continu).
- Le type de capteur.
- Le mode de régulation (pitch ou stall régulation).
- La nature de l'accouplement mécanique (présence de multiplicateur de vitesse ou attaque directe).
- Le mode de fonctionnement (vitesse constante ou variable) [13].

1.5.3.1. Selon axe :

Il existe différents profils d'éoliennes. On distingue deux grands types : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal. Que l'éolienne soit du premier ou du deuxième type, il s'agit de générer un couple moteur pour entraîner la génératrice.

1.5.3.1.a. Eolienne à axe vertical :

Les pylônes des éoliennes à axe vertical sont courts, entre 0,1 et 0,5 fois la hauteur du rotor. Cela permet de placer tout le dispositif de conversion de l'énergie (génératrice, multiplicateur, etc.) au pied de l'éolienne, facilitant ainsi les opérations de maintenance. De plus, il n'est pas nécessaire d'utiliser un dispositif d'orientation du rotor comme pour les éoliennes à axe horizontal. Cependant, les vents sont faibles à proximité du sol, ce qui induit un moins bon rendement car l'éolienne subit les turbulences du vent. De plus, ces éoliennes doivent être

Chapitre 01 Etat de l'art des systèmes énergétique

entraînées au démarrage et le mât subit de fortes contraintes mécaniques. Pour ces raisons, de nos jours, les constructeurs d'éoliennes privilégient les éoliennes à axe horizontal.

Les deux types de structures d'éoliennes à axe vertical les plus répandues reposent sur les principes de traînée différentielle ou de la variation cyclique d'incidence :

- Le rotor de Savonius dont le fonctionnement est basé sur le principe de la traînée différentielle. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes. Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble.
- Le rotor de Darrieus est basé sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. [14]

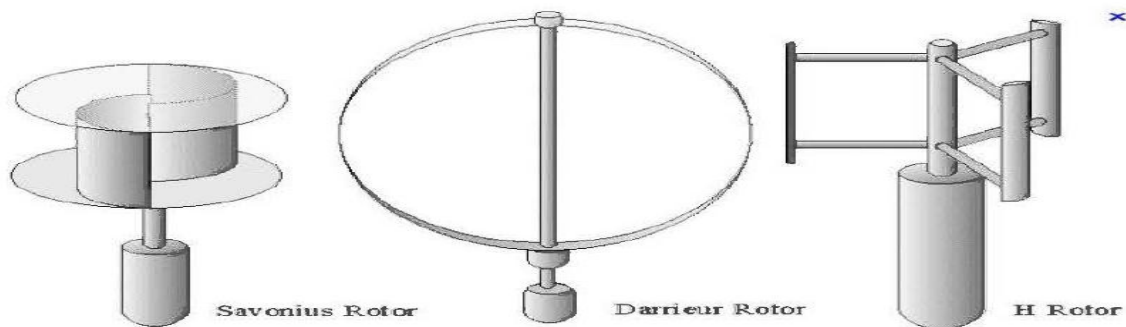


Fig.1.7 Éoliennes à axe vertical : turbine Savonius. Turbine Darrieur et Darrieur en H.



Fig.1.8 Eoliennes à axe vertical

1.5.3.1.b. Eolienne à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituées d'une à trois pales profilées aérodynamiquement. Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pâles constituent un bon compromis entre le coefficient de

Chapitre 01 Etat de l'art des systèmes énergétique

puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales.

Nous trouvons dans cette famille d'aéromoteurs deux catégories, « onshore » et « offshore », ces termes américains permettent de distinguer si l'éolienne est implantée sur terre ou à la surface de la mer.

- Les éoliennes terrestres dites « onshore » sont installées sur la terre.
- Les éoliennes marines dites « offshore » sont installées en mer.



Fig.1.9 les éoliennes offshore.



Fig.1.10 les éoliennes onshores

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un coût moins important.

Il existe deux catégories d'éoliennes à axe horizontal :

- **Amont** : le vent souffle sur le devant des pâles en direction de la nacelle. Les pâles sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.
- **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pâles en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable.

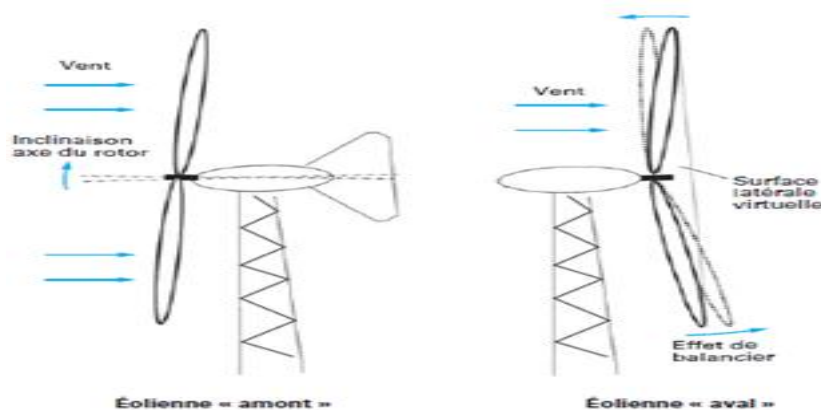


Fig.1.11 éolienne en amont et en aval

Chapitre 01 Etat de l'art des systèmes énergétique

La disposition turbine en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manoeuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité.

Les pâles des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction. Aujourd'hui, l'éolienne à axe horizontal avec un rotor du type hélice, présente un réel intérêt pour la production d'électricité à grande échelle.[14]



Fig.1.12 Eoliennes à axe horizontal.

1.5.3.2. Selon vitesse :

1.5.3.2.a. Les éoliennes à vitesse fixe :

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique (Figure 1.13). Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales (pitch control). La machine fonctionne alors en hyper synchronisme c'est-à-dire à une vitesse $(\Omega_s/1 - g)$ avec Ω_s vitesse de synchronisme et g le glissement, avec $g \leq 0$ pour un fonctionnement en génératrice avec une convention moteur

($|g| \leq 1$). La rotation des pales par des actionneurs, hydrauliques ou électriques, permet l'augmentation de l'angle de calage. La puissance peut alors être limitée à la puissance nominale de la génératrice. Lors de fort vent, cette technique permet la mise en drapeau des pales ($\beta = 90^\circ$) [12].

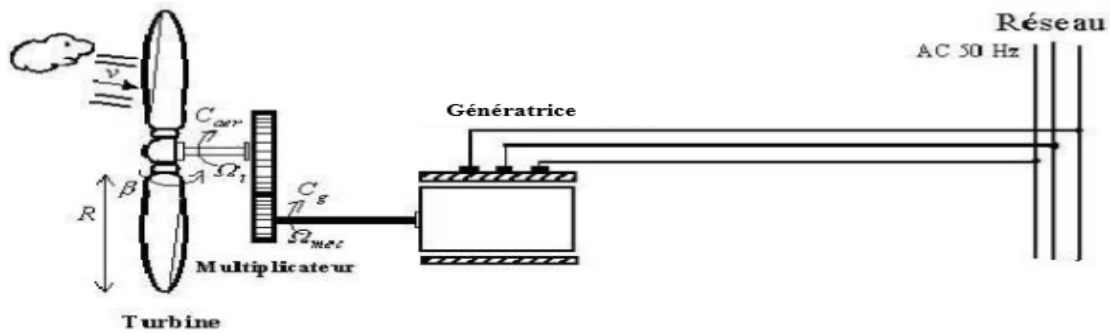


Fig.1.13 Éolienne à vitesse fixe

1.5.3.2.b. Les éoliennes a vitesse variables :

Les éoliennes à vitesse variable sont actuellement les plus utilisées dans l'industrie.

Le terme vitesse variable désigne le fait que la vitesse de la turbine est indépendante de la fréquence du réseau électrique. L'avantage principal d'opérer la turbine à vitesse variable est de maximiser la capture de l'énergie disponible dans le vent. Selon la référence, une éolienne à vitesse variable peut aller chercher de 8 à 15 % plus d'énergie dans le vent annuellement qu'une éolienne à vitesse fixe.

Dans ces systèmes, la vitesse mécanique de la turbine et la fréquence de la charge sont découplées. Pour obtenir ce découplage, on utilise une interface d'électronique de puissance.

De cette manière la turbine tourne à vitesse variable, ajustée de manière optimale à tout instant à la vitesse du vent. Ils ont une majeure efficacité car ils parviennent à maximiser la capture d'énergie du vent disponible. [12]

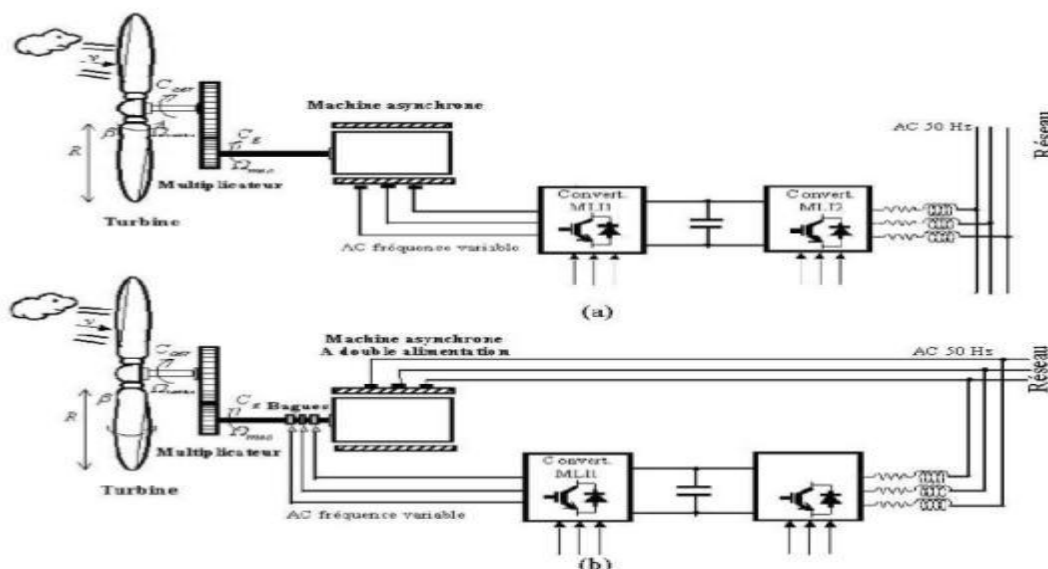


Fig.1.14 Eolienne à vitesse variable

1.5.4. Intérêt de la vitesse variable :

Si on considère les courbes du coefficient de puissance fonction de λ , il apparaît clairement l'importance d'un réglage de vitesse. En effet, si la génératrice électrique est de type synchrone ou asynchrone directement couplée à une charge, la vitesse est sensiblement constante et le rendement aérodynamique ne peut être maximal que pour une seule vitesse de vent (λ_{opt}). Un système à deux vitesses de rotation est possible mais la vitesse variable électronique apporte beaucoup plus en terme énergétique. La figure 1.18 montre que la position du maximum de la courbe puissance en fonction de la vitesse de rotation change avec la vitesse du vent. Typiquement, un réglage direct ou indirect de vitesse est nécessaire pour bien optimiser les transferts énergétiques [15].

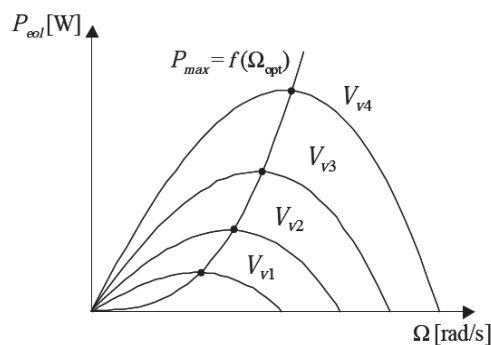


Fig.1.15 Variation de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.

1.5.5. Constitution d'une éolienne [12] :

Une centrale éolienne classique est composée essentiellement des parties suivantes

Le mat : Qui supporte la nacelle et le rotor de la turbine. Il est important que le mat soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent en hauteur. A titre d'exemple le mat d'une éolienne de 500 kW a une hauteur de 40 à 60m, il peut être plein ou tubulaire. Ce dernier est plus coûteux mais il a l'avantage de permettre un accès aisé à la nacelle pour la maintenance.

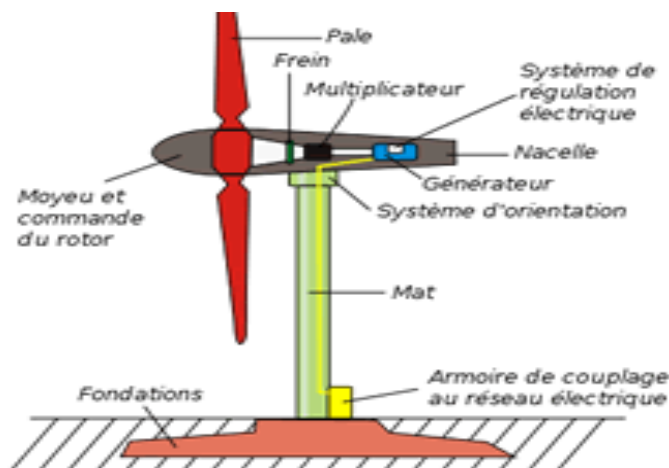


Fig.1.16 Constitution d'une centrale éolienne

Chapitre 01 Etat de l'art des systèmes énergétique

Les pales : Qui permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Le nombre de pales peut varier suivant les éoliennes. Actuellement, le système tripale est le plus utilisé car il permet de limiter les vibrations, le bruit et la fatigue du rotor par rapport à un système bipale ou mono pale et d'améliorer le coefficient de 10 % en passant d'une pale à deux et de 3% en passant de deux à trois. Enfin, un bon compromis entre le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien plus des aspects esthétiques du système tripale par rapport au système bipale constituent des atouts supplémentaires

La fondation : Une fondation solide assurant la résistance de l'ensemble par grands vent et dans des conditions de givrage.

La nacelle : Qui regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres, multiplicateur, roulement, le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela vient s'ajouter le système électronique de gestion de l'éolienne comme le montre la Figure (1.17).

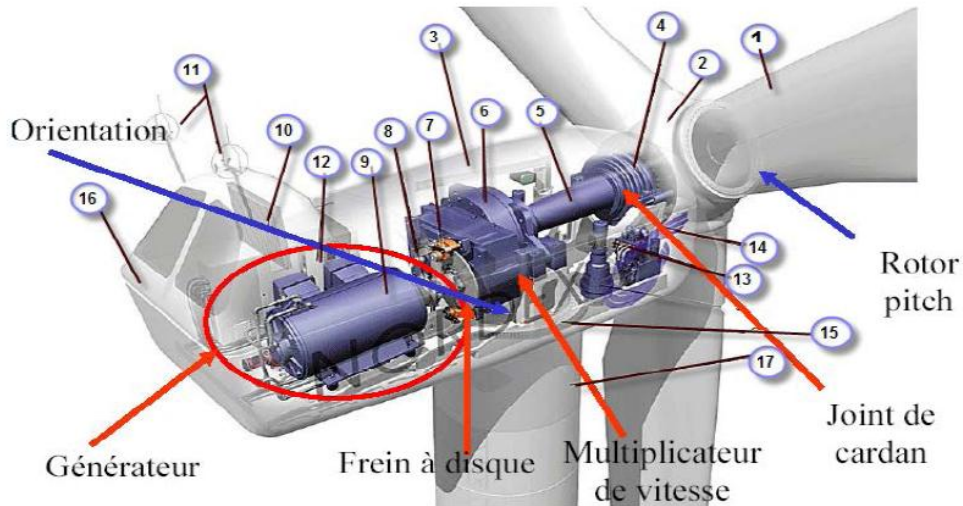


Fig.1.17 Constitution de la nacelle

- | | |
|------------------------------|--|
| 1- Pales | 9- Génératrice |
| 2- Moyeu rotor | 10- Radiateur de refroidissement |
| 3- Nacelle | 11- Centrale de mesures du vent |
| 4- Cardan | 12- Contrôle |
| 5- Transmission | 13- Centrale hydraulique |
| 6- Multiplicateur de vitesse | 14- Mécanisme d'orientation face au vent |

Chapitre 01 Etat de l'art des systèmes énergétique

- | | |
|-------------------|--|
| 7- Frein à disque | 15- Paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque |
| 8- Accouplement | 16- Capot |
| | 17- Tour |

Le Tableau 1.2 et le Tableau 1.3 rappellent les différentes caractéristiques des différentes éoliennes.[12]

Type d'éolienne	Avantage	inconvénients
MAS Vitesse fixe	<ul style="list-style-type: none"> - Machine robuste - Faible coût - Pas d'électronique puissance 	<ul style="list-style-type: none"> - Puissance extraite non optimisée - Maintenance boîte de vitesse - Magnétisation de la machine imposée par le réseau.
MADA Vitesse variable	<ul style="list-style-type: none"> - Fonctionnement à vitesse - Puissance extraite optimisée - Électronique de puissance dimensionnée à 30 % de la puissance nominale - Machine standard - Connexion de la machine plus facile à gérer - Une magnétisation de la machine en cas de défaut sur le réseau 	<ul style="list-style-type: none"> - Maintenance de boîte de vitesse - Prix de l'électronique de puissance - Contrôle-commande complexe - Contacte glissant bagues-balais
MSAP Vitesse variable	<ul style="list-style-type: none"> - Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse - Puissance extraite optimisée pour les vents faibles - Connexion de la machine facile à gérer 	<ul style="list-style-type: none"> -Prix de l'électronique de puissance -Machine spécifique - Électronique de puissance dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice

Tableau 1.2 : Avantages et inconvénients des différentes éoliennes.

Type d'éolienne	Interface réseau	Moyen de contrôle	Fonctionnement possible	Services système

Chapitre 01 Etat de l'art des systèmes énergétique

MAS Vitesse fixe	- (Facultatif) - Gradateur -Bancs de condensateurs	-Pitch control	- Contrôle de P Approximatif -Contrôle deQ Approximatif Si condensateur	NON
MADA Vitesse variable	- Convertisseur électronique AC/AC au rotor (AC/DC puis DC/AC)	-Pitch control - Couple génératrice	- Contrôle de P - Contrôle de Q	-Participation limitée au: - Réglage de la fréquence - Réglage de la tension tant qu'il y'a de vent
MSAP Vitesse variable	-Convertisseur électronique AC/AC au stator (AC/DC puis DC/AC)	-Pitch control (ou stall) -Couple Génératrice	- Contrôle de P - Contrôle de Q -Fonctionnement en isolé	- Réglage de la Fréquence - Réglage de la Tension - Ilotage tant qu'il y'a de vent

Tableau 1.3 : Capacité de réglage des différentes éoliennes

1.5.6. Machines de Chaîne de conversions électromécaniques :

1.5.6.1. Système autonome :

Pour les réseaux de petites puissances en site isolé, une solution couramment employée consiste à associer les aérogénérateurs à un ou des groupes électrogènes, souvent diesel. Dans la version la plus rudimentaire, la génératrice est de type asynchrone à cage et est auto amorcée par condensateurs. Pour éviter des démarrages trop fréquents du groupe électrogène, ou pour assurer les transitions, des batteries électrochimiques, voir des accumulateurs inertiels, peuvent également être associés via un convertisseur électronique.

Les inconvénients principaux de ce type de chaîne sont dus à la rigidité (vitesse faiblement variable par glissement de la GAS), l'absence d'optimisation de puissance et la nécessité d'un multiplicateur de vitesse.

Une autre solution couramment employée consiste à utiliser un bus continu intermédiaire avant de transformer l'énergie en courant alternatif. Dans le cas des très petites

puissances, l'énergie est directement consommée en courant continu. Le bus continu présente l'avantage d'interconnecter plus aisément divers systèmes de production (éolien, photovoltaïque, pile à combustible...) et des batteries électrochimiques qui peuvent se trouver directement en tampon sur de tels bus.[14]

1.5.6.2. Système coté réseau

Les deux types de machines utilisées dans les systèmes éoliens sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes.

1.5.7.2.a. Génératrice synchrones :

Les machines asynchrones présentent le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et Un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur les voilures éoliennes .Par contre [16], les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes. Les systèmes de ce type possèdent aussi leurs défauts. Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier de système des bagues et balais. Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines Synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Ces machines sont à grand nombres de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanent dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) aux génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur.

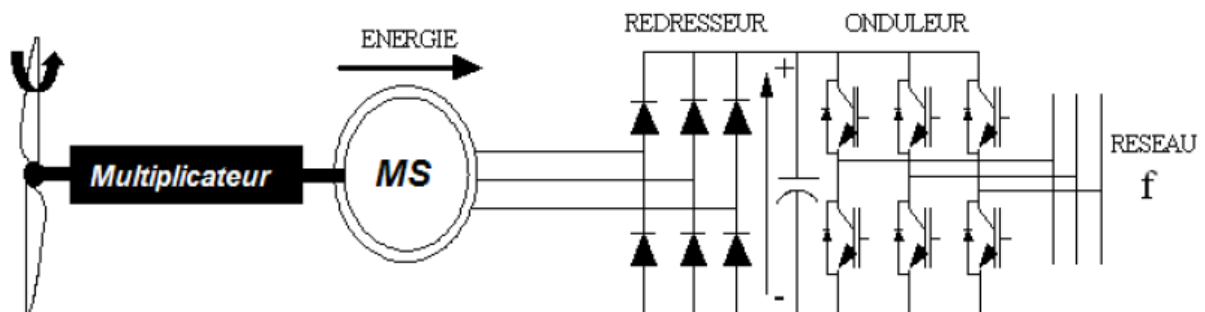


Fig.1.18 Eolienne à génératrice synchrone

1.5.6.2.b. Génératrice asynchrone a cage :

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et

présentent un taux de défaillance très peu élevé. Dans les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Or, il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse. [16]

1.5.6.2.c. Génératrice asynchrone double alimentation (MADA)

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter d'un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants (Vestas, Gamesa) utilisent ce type de machines. Le stator de la génératrice est directement couplé au réseau le plus souvent par un transformateur. A la place du rotor à cage d'écureuil, ces machines asynchrones ont un rotor bobiné dont le réglage électronique assure la variation du glissement. La chaîne rotor permet ainsi à l'ensemble de fonctionner à vitesse variable sur une plage de vitesse qui dépend du type et du dimensionnement de la chaîne rotor. [16]

A. Description de la machine asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone), il est constitué le plus souvent de tôles magnétique empilées, munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer des enroulements décalées de 120° dans l'espace. Son rotor n'est pas contre plus une cage d'écureuil, mais il est constitué de trois bobinages dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne. [17]

Ce type de machines nécessite une seule source d'alimentation qui peut être alimentée les deux côtés de la machine et ceci constitue un avantage principal surtout dans les domaines d'application à vitesse variable, où le glissement de la machine à double alimentation peut être contrôlé par l'association des convertisseurs de puissance du coté statorique ou rotorique ou bien des deux à la fois. Ceci dépend essentiellement du facteur techno-économique de construction .figure (I.19) [18]

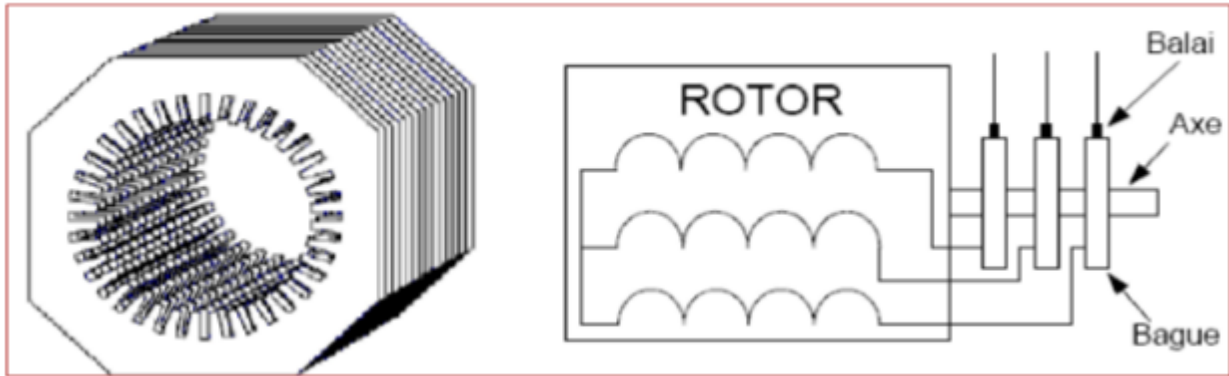


Fig.1.19 Structure du stator et des contacts rotoriques de la GADA [18]

B. Application

Tel qu'il a été illustré dans la partie portant sur la conversion de l'énergie éolienne, il a été montré que la puissance produite par la turbine dépend de sa vitesse de rotation et de la vitesse du vent. Sachant que la cette dernière n'est guère constante dans la nature, une utilisation à vitesse variable est imposée pour positionner le fonctionnement sur le point optimale de production de la puissance. La GADA devient la solution adaptée à ce genre d'application vu sa capacité à fonctionner dans une large gamme de vitesse. Elle est d'autant plus intéressante dans le cas où la puissance produite n'est pas écrêtée en atteignant la puissance nominale de la machine. Pour les éoliennes utilisant la GADA, le stator de celle-ci est directement couplé au réseau alors que son rotor est connecté au réseau à travers une interface composée de deux convertisseurs statique (convertisseur côté GADA et convertisseurs coté réseau). [19]

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un aperçu de l'histoire de l'énergie en général renouvelables. Nous avons abordé les différents types d'énergies renouvelables, en particulier l'énergie éolienne, qui est le principe de notre travail. Ensuite, le potentiel éolien de l'Alger est présent. L'état de l'énergie éolienne dans le monde pendant ces dernières années a été présent aussi. Ainsi que la description d'éolienne, et leurs composants. La stratégie consiste à le faire fonctionner à une vitesse fixe ou variable.

Les éoliennes à vitesse fixe permettent un réglage simple et sont considérées comme des générateurs passifs. Quant aux éoliennes à vitesse variable, elles ont plus de possibilités de réglage, mais à un cout plus élevé. Nous avons également évoqué les avantages et les inconvénients des éoliennes. Enfin, nous avons parlé sur les machines électriques ou bien les différents générateurs utilisés dans les systèmes éoliens coté au réseau ou autonomes.

Chapitre 01 Etat de l'art des systèmes énergétique

L'éolienne à base de génératrice asynchrone à double alimentation offre des capacités qui pourraient lui faire permettre de participer aux réglages du réseau avec une commande bien adaptée. Ce type d'éolienne est à la base de ce travail.

La modélisation et la commande de le système éolienne est traitée dans le deuxième chapitre.

Chapitre 02 :

*Modilisation d'un système
éolienne basé sur GADA*

2.1. Introduction :

De nos jours, on constate que les éoliennes à vitesse variable sont plus utilisées que les éoliennes à vitesse fixe, et la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) dans les unités de production à grande échelle car c'est la machine à vitesse variable la plus adaptée. Il se caractérise par la fourniture de puissance active au réseau par le stator et par le rotor. On voit que lors de la production ou l'absorption par le rotor de MADA contrôle la puissance réactive. On sait que le courant circulant depuis le stator a la même fréquence que le courant vers le réseau, il faut donc adapter la fréquence du courant du rotor à celle du réseau pour que le fournisse de la puissance active au réseau.

Cette stratégie se concrétise par l'ajout de deux convertisseurs de puissance (redresseur et onduleur MLI).

Nous modélisons ce système ou la turbine éolienne pour évoquer le coefficient de puissance C_p , nous le connectons au système de contrôle pour former un système complet. De plus nous expliquerons l'intérêt multiplicateur (ou boîte de vitesse) ainsi que l'arbre de l'éolienne. Et introduisons diverses techniques de la stratégie de commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), technique permettant à l'éolienne de toujours fonctionner à une vitesse tendant à sa vitesse nominale en fonction de la vitesse du vent. Enfin nous modéliserons la machine asynchrone en expliquant pourquoi il est nécessaire de changer de repère pour pouvoir simplifier les équations et ainsi permettre la réalisation des commandes.

2.2. Conversion de l'énergie éolienne

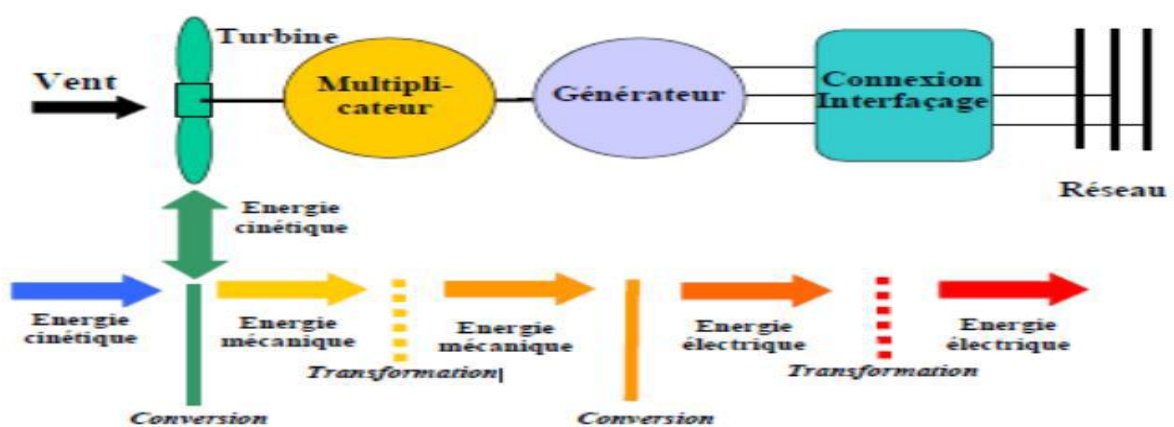


Fig.2.1 Principe de la conversion d'énergie.

2.2.1. Loi de Betz [16]

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure 2.2 sur lequel on a représenté la vitesse du V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval en supposant

Chapitre 02 Modilisation d'un système éolienne basé sur GADA

que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit: $\frac{V_1+V_2}{2}$ la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une

seconde est :

$$m = \frac{\rho S(V_1+V_2)}{2} \quad (2.1)$$

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

$$P_m = \frac{m(V_1^2-V_2^2)}{2} \quad (2.2)$$

Soit en remplaçant m par son expression :

$$P_m = \frac{\rho S(V_1+V_2)(V_1^2-V_2^2)}{4} \quad (2.3)$$

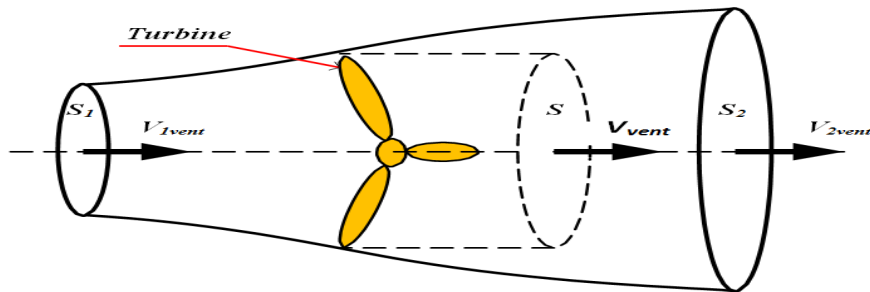


Fig.2.2 Tube de courant autour d'une éolienne

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

$$P_m = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (2.4)$$

La relation entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible et alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad (2.5)$$

Le ratio $\frac{P_m}{P_{mt}}$ appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de $\left(\frac{27}{16}\right)$ soit 0.59 c'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport

Chapitre 02 Modilisation d'un système éolienne basé sur GADA

entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent. Selon la loi de Betz, la puissance maximale est :

$$P_{max} = \frac{16}{27} P_{mt} = 0.59 P_{mt} \quad (2.6)$$

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde ; de cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini :

$$C_p^{opt} = \frac{P_{max}}{P_{mt}} = \frac{2P_{max}}{\rho s V_1^3} = 0.59 \quad (2.7)$$

En combinant les équations présidant la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} P_{mt} = C_p P_{mt} = \frac{1}{2} C_p (\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (2.8)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_1 R}{V_1} \quad (2.9)$$

Ω_1 : Vitesse de rotation avant le multiplicateur de vitesse G

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

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_2 R}{G V_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (2.10)$$

Avec Ω_2 : vitesse de rotation après multiplicateur.

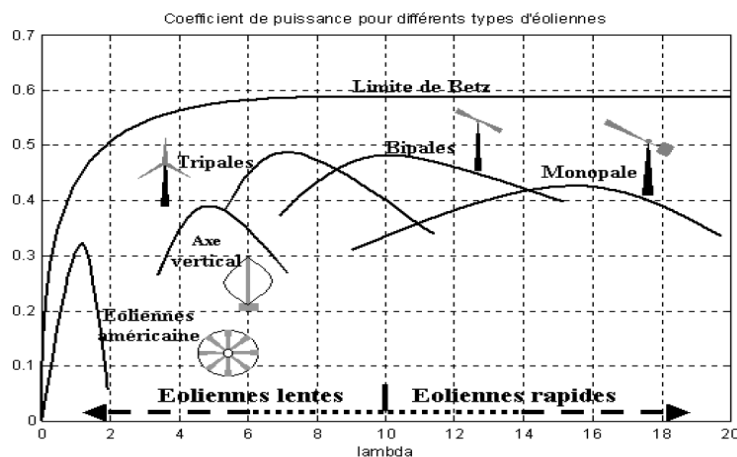


Fig.2.3 Coefficient de puissance pour différents types des éoliennes

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au-dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s.

2.3. Modélisation d'un système éolienne

2.3.1. Partie mécanique

➤ **Modèle de turbine :**

La modélisation de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales de longueur R. Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement, tournant à une vitesse Ω , relié à un multiplicateur de gain G. Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique Figure(2.4) [20].

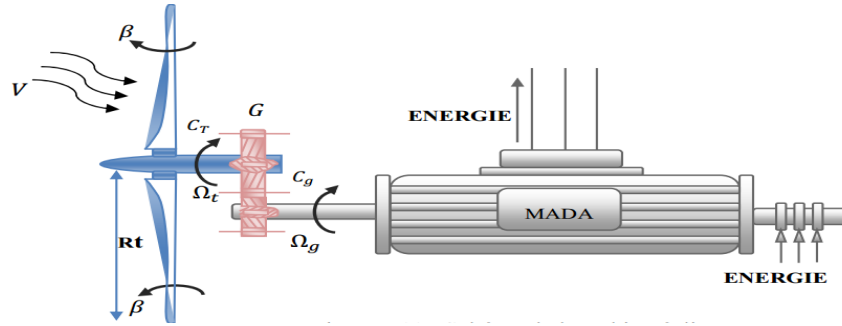


Fig.2.4 Schéma de la turbine éolienne

Le vent de vitesse V, appliqué sur les pales de l'éolienne, entraîne sa mise en rotation et crée une puissance aérodynamique P_m [21], extraite par le rotor en fonction du coefficient de puissance C_p est donnée par :

$$P_m = \frac{1}{2} * \rho * S * V^3 * C_p \quad (2.11).$$

Le coefficient de puissance désigne un paramètre caractéristique de chaque éolienne. Il dépend du nombre de pales, de la vitesse spécifique λ et du calage β .

$$\lambda = \frac{R * \Omega_{turb}}{V} \quad (2.12).$$

$R * \Omega_{turb}$: désigne la vitesse tangentielle du bout de la pale, R étant le rayon de l'aire balayée par le rotor.

V: Vitesse de vent.

L'expression du coefficient de puissance est donnée par l'équation suivante [19]:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_p = 0.22 * \left(\frac{116}{\Gamma} - 0.4 * \beta - 5 \right) * \exp\left(\frac{-21}{\Gamma}\right) + 0.0068\lambda \\ \text{Avec} \\ \Gamma = \frac{1}{\lambda + 0.08 * \beta} \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{array} \right. \quad (2.13).$$

La puissance aérodynamique est ainsi une fonction non linéaire de la vitesse du vent, de la vitesse de rotation du rotor (arbre lent) et de l'angle de calage :

$$P_m = \frac{1}{2} * C_p(\lambda, \beta) * \rho * S * V^3 \quad (2.14).$$

Avec:

Chapitre 02 Modélisation d'un système éolienne basé sur GADA

$S = \pi * R^2$, l'aire de la surface balayée par le rotor.

ρ , densité de l'air qui est égale à 1.225 Kg/m^3 à la pression atmosphérique de 15°C .

La figure suivante représente la variation de coefficient C_p en fonction du ratio du vitesse λ et l'angle de calage de la pale β [19]

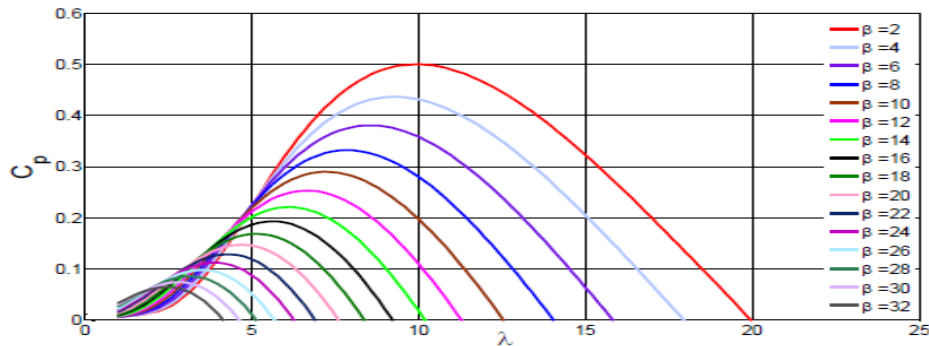


Fig. 2.5 Caractéristique $cp=f(\lambda,\beta)$

Les expressions de la puissance et la vitesse étant connues, on peut déduire l'expression du couple aérodynamique est déterminé par la relation suivante :

$$C_{a\text{ér}} = \frac{P_m}{\Omega_{\text{turb}}} = C_p(\lambda, \beta) * \frac{\rho}{2} * S * V^3 * \frac{1}{\Omega_{\text{turb}}} \quad (2.15).$$

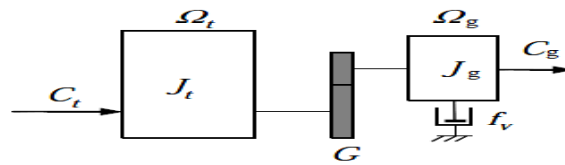


Fig.2.6 Modèle mécanique de la turbine éolienne.

➤ Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice et le couple aérodynamique en couple du multiplicateur. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

Les vitesses mécaniques de la turbine et celle de la génératrice sont liées par la relation suivante :

$$\Omega_{\text{turb}} = \frac{\Omega_g}{G} \quad (2.16)$$

Le couple sur l'arbre lent C turbine et ce sur l'arbre rapide Cg sont exprimés par la relation suivante :

$$C_g = \frac{C_{\text{turb}}}{G} \quad (2.19)$$

Avec G : le coefficient de multiplication.[16]

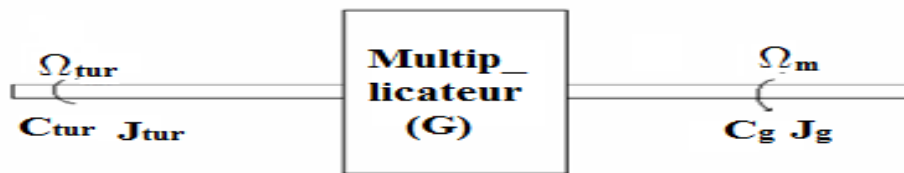


Fig.2.7 Modèle mécanique simplifié du multiplicateur.

➤ **Équation mécanique de l'arbre :**

Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (2.20)$$

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

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum \text{couple} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (2.21)$$

Le couple visqueux étant proportionnel à la vitesse, nous aurons:

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (2.22)$$

Avec :

J : L'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice

C_{em} : Le couple électromagnétique produit par la génératrice;

C_{vis} : Le couple de frottement visqueux;

C_g : le couple issu du multiplicateur.

f : Coefficient de frottements visqueux dans la génératrice.

Remarque : le coefficient de frottement visqueux de la turbine est négligeable. [16]

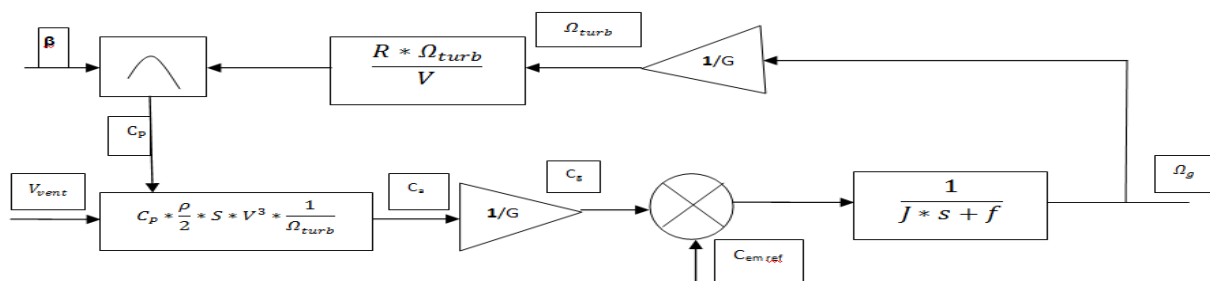


Fig.2.8 Schéma bloc fonctionnel du modèle de la turbine

2.3.2. Différent phases de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable

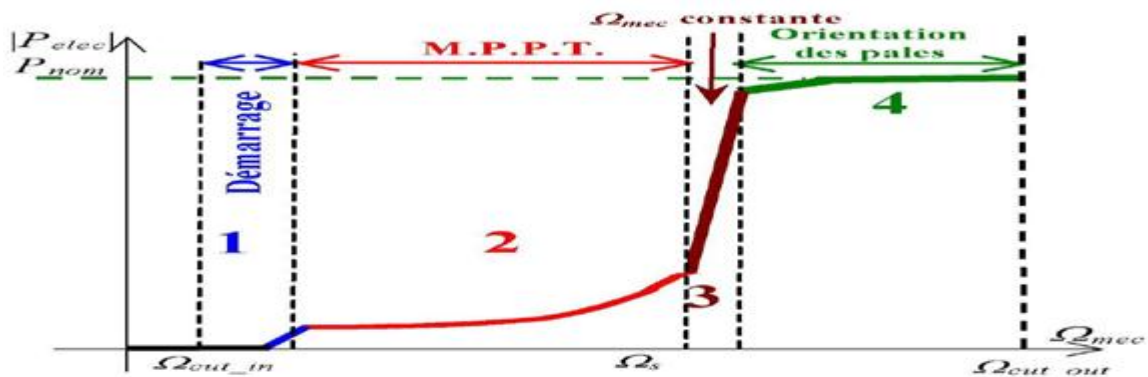


Fig.2.9 Caractéristique puissance vitesse quatre zones de fonctionnement de la turbine d'une éolienne.

Les vitesses V_D , V_n et V_M définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent :

- La zone **I**, où $P = 0$ (la turbine ne fonctionne pas)
- La zone **II**, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent V .
- La zone **III**, où la vitesse de rotation est maintenue constante où la puissance P fournie reste égale à P_n .
- la zone **IV**, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête le transfert de l'énergie [16]. Il existe les techniques principales pour les deux régulations de puissance dans le tableau 2.1 (voir Annexe A).

2.3.3. Méthode de recherche du point maximum de puissance

Après modélisation de la chaîne de conversion, le control optimal de L'énergie captée par les éoliennes, qui est équilibrée par l'équation (2.23), est essentiellement maximisée en ajustant le coefficient C_p car il dépend de la vitesse du générateur. Nous avons utilisé une éolienne à vitesse variable car elle a la capacité d'augmenter l'énergie pour l'étendue maximale, et cela nous oblige à concevoir des stratégies de contrôle qui maximisent l'énergie électrique Le générateur règle la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence, en ignorant la vitesse du vent, considérée comme grandeur perturbatrice. Et tout cela est matérialisé par le bloc de recherche power point ultime de MPPT.

$$P_{éle} = P_m - pertes \quad (2.23)$$

➤ Principe de MPPT :

La MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une méthode de contrôle très fiable, robuste et simple à implanter. Elle consiste à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée [27]. L'MPPT peut être définie comme étant une stratégie de gestion permettant de suivre le point de puissance maximale d'un générateur électrique non

linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs éoliens à travers une électronique de puissance permettant de maximiser l'efficacité énergétique du système à travers la variation de la vitesse du vent [28].

Les caractéristiques de la figure(2.10) représentent les allures des puissances théoriquement disponibles au niveau d'une turbine éolienne de grande puissance en fonction de la vitesse de rotation de la génératrice pour différentes vitesses du vent. La machine devra pouvoir fonctionner entre 1200 et 2000tr/min pour cet exemple (courbe de réglage MPPT) [29].

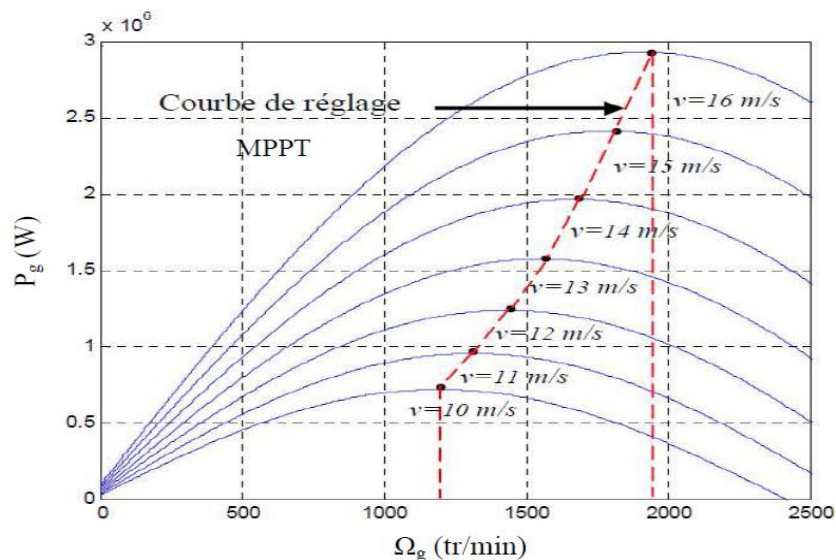


Fig.2.10 Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne.

Donc, l'objectif de cette stratégie est double, d'une part de protéger l'éolienne contre le vent fort et d'autre part de délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale P_n à une vitesse de vent nominale v_n , au-delà de cette vitesse les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au-delà d'une vitesse maximale v_m qui pourrait endommager la turbine.

➤ Maximisation de la puissance

L'énergie éolienne, même si abondante, varie continuellement et comme les changements de vitesse du vent dans la journée. Le montant de la puissance du moteur à partir d'un système de conversion d'énergie éolienne (SCEE) dépend de l'exactitude avec laquelle les points de puissance de pointe sont suivis par la recherche de point de puissance maximale (MPPT) de commande du système de commande quel que soit le type de générateur utilisé.

Dans ce qui suit, on donne un aperçu de quelques contrôleurs MPPT utilisés pour l'extraction de la puissance maximale des SCEE. [14]

➤ Différentes méthodes de MPPT :

Au cours des dernières décennies, de nombreuses méthodes pour trouver le MPP ont été développés. Ces techniques diffèrent dans de nombreux aspects tels que les capteurs nécessaires, la complexité, le coût, la gamme de l'efficacité, la vitesse de convergence, suivi correct lorsque l'irradiation/température change voir aussi le matériel nécessaire à la mise en œuvre.

Certaines des techniques les plus populaires MPPT sont:

- La méthode de lambda optimal (TSR)
- La méthode de HCS
- La méthode de contrôle optimale de couple (OTC)
- La méthode de perturbation et observation (P&O)
- La Méthode de maximisation par la méthode d'asservissement du signal de la puissance (PSF)
- La méthode Incremental Conductance (INC)
- La méthode de gradient
- Méthode base logique floue
- Méthode base Réseaux de neurones artificiels

2.3.4. Partie Electromagnétique

2.3.4.1. Modélisation de la Machine Asynchrone Double Alimentation(MADA)

Pour faire une étude du comportement dynamique des machines électrique selon la transformation de Park de différents référentiels, la référence doit être choisie en fonction du phénomène à étudier et de la simplification apportée par cette sélection. Il existe trois types de référentiels intéressants dans l'application :

- Référentiel lie au stator est appelé aussi système d'axes (α, β) . Ce référentiel est utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines électriques [30] [31].

$$\theta = \theta_s - \theta_r ; \frac{d\theta_s}{dt} = 0 ; \omega_r = -\frac{d\theta_r}{dt} ; \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_r \quad (2.24)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_r$$

- Référentiel lie au rotor. Dans ce cas, le système d'axes (dq) est immobile par rapport au rotor et tourne avec lui $\frac{d\theta}{dt} = 0$ [31]. Ce système d'axes est utile pour étudier les processus transitoires dans les machines synchrones et asynchrones avec une connexion non symétrique des circuits du rotor.

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \quad \text{Donc} \quad \frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s \quad (2.25)$$

- Référentiel lie au champ tournant est appelé aussi système d'axes (X,Y), il tourne avec la vitesse du champ tournant [30]

$$\frac{d\theta_r}{dt} = g\omega_s, \quad \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad (2.26)$$

La mise de la MADA sous forme d'un modèle mathématique nous facilite largement sa commande dans les différents régimes de fonctionnement. Nous devons procéder à quelques simplifications classiques pour pouvoir la modéliser (ces modifications n'altèrent pas le fonctionnement de la MADA) .

- entrefer constant,
- effet des encoches négligé,
- distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer,
- influences de l'effet de peau et de l'échauffement non prises en compte,
- circuit magnétique ne pas saturé (perméabilité constante),
- perte ferromagnétique négligeable.[26]

a) Modèle mathématique de la GADA dans le référentiel générale

La machine asynchrone à double alimentation « GADA » comporte trois bobines statoriques (As,Bs,Cs) décalées entres elles par un angle de $(2\pi/3)$ et aussi trois bobines rotorique (Ar, Br, Cr) identique de répartition et similaire à celles du stator. Les équations des tensions des phases statoriques et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} [V_{sabc}] = -R_s[i_{sabc}] + \frac{d}{dt}[\phi_{sabc}] \\ [V_{rabc}] = R_r[i_{rabc}] + \frac{d}{dt}[\phi_{rabc}] \end{cases} \quad (2.27)$$

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}; [V_{rabc}] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}$$

$[V_{sabc}] ; [V_{rabc}]$: Sont respectivement les vecteurs des tensions statoriques et rotoriques

$$[I_{sabc}] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}; [I_{rabc}] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}; [\phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix}; [\phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix}$$

$[I_{sabc}] ; [I_{rabc}]$:Sont respectivement les vecteurs des courants statoriques et rotoriques.

$[\phi_{sabc}] ; [\phi_{rabc}]$:Sont les matrices des flux statoriques et rotoriques suivant les axes a,b,c.

$$\text{Avec } : [R_s] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix}$$

$[R_s] ; [R_r]$:Sont respectivement les vecteurs des courants statoriques et rotoriques.

b) Équations magnétiques de GADA

Nous devons exprimer les grandeurs magnétiques au stator et au rotor, toujours dans le repère a, b, c :

$$[\Phi_{sabc}] = [L_s][-I_{sabc}] + [M_{sr}][I_{rabc}] \quad (2.28)$$

$$[\Phi_{rabc}] = [L_r][I_{rabc}] + [M_{sr}][I_{sabc}] \quad (2.29)$$

Pour l'écriture condensée, on met :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}; \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

[L_{ss}] : Matrice d'inductances statoriques.

[L_{rr}] : Matrice d'inductances rotoriques.

[L_s] : Matrice Inductance propre d'une phase statorique.

[L_r] : Matrice Inductance propre d'une phase rotorique.

[M_s] : Matrice Inductance mutuelle entre phases statoriques.

[M_r] : Matrice Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = [M] \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Avec :

[M_{sr}] = [M_{rs}]^t: Est la matrice d'inductance mutuelle stator-rotor.

[M]: Est Mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique[26].

c) La transformée de Park

Appelée souvent transformation des deux axes , cette transformation a été présenté par PARK en 1929 lors de l'étude de la machine asynchrone comme moyen de simplifier les équations de celle-ci . fait correspondre aux variables réelles leurs composantes :

- D'axes directs (indice d)
- D'axes en quadrature (indice q) [32].

Deux axes, fait correspondre aux variables réelles leurs composantes : **d** : Indice de la composante directe, **q** : en quadrature et **o** : Indice composante homopolaire. La transformation du modèle d'un enroulement triphasé en un modèle d'un enroulement biphasée, en prenant en compte la conservation permis par la matrice de Park Donnée ci-après [32]

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

$$[P]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

: Est l'angle de rotation du repère , .

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = [P] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \text{ et } \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P]^T \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix}$$

En appliquant, la transformation de Park [P] sur les équations. D'après simplification, les équations électriques et magnétiques modélisant la machine dans le repère biphasé (d,q) , sont déduites voir figure (2.11)

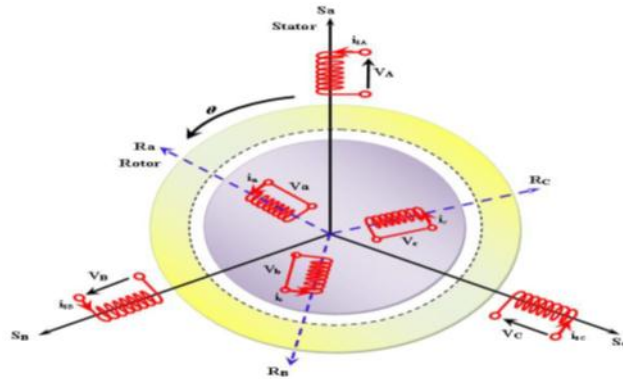


Fig.2.11 Représentation spatiale de la machine asynchrone dans le repère triphasé

d) Modèle de GADA dans le référentiel (d,q)

La théorie de la génératrice asynchrone à double alimentation est basée sur la transformation de Park qui rapporte les équations statoriques et rotoriques triphasé a des axes perpendiculaires (biphasés), appelés l'axe direct d et axe quadrature q.

❖ Equations électriques et l'équation mécanique de la GADA

Les équations générales de la machine asynchrone classique dans un repère diphasé lié au champ tournant s'écrivent sous la forme suivante :

$$\text{On a: } \theta_s = \theta_r + \theta \quad (2.33)$$

$$\theta_r = \theta_s - \theta \quad (2.34)$$

$$\text{Alors : } \frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \quad (2.35)$$

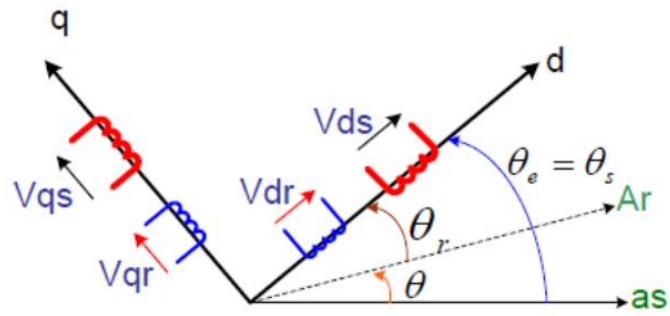


Fig.2.12 Représentation de la machine dans le repère diphasé.

$$\begin{cases} V_{sd} = -R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = -R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (2.36)$$

Avec respectivement :

V_{sd} , V_{sq} , V_{rd} et V_{rq} : Les tensions statoriques et rotoriques directes et en quadrature du système diphasé.

ω_r et ω_s : Les pulsations des grandeurs électriques statoriques et rotoriques.

φ_{sq} , φ_{sd} , φ_{rq} et φ_{rd} : Les flux statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système diphasé leurs Expressions sont données par :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = -L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = -L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} - M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} - M I_{sq} \end{cases} \quad (2.37)$$

L'équation mécanique de la machine est donnée comme suit :

$$C_{em} = C_r + f\Omega + J \frac{d\Omega}{dt} \quad (2.38)$$

Avec respectivement :

C_{em} : Le couple électromagnétique.

: Le couple résistant ;

: Le coefficient de frottement visqueux de la GADA.

: L'inertie des parties tournantes.

Ω : La vitesse de rotation de l'axe de la GADA.

Les puissances actives et réactives statoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = -V_{sd}I_{sd} - V_{sq}I_{sq} \\ Q_s = -V_{sq}I_{sd} + V_{sd}I_{sq} \end{cases} \quad (2.39)$$

PS : La puissance active statoriques.

QS : La puissance réactive statoriques.

Les puissances actives et réactives rotoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} P_r = V_{rd}I_{rd} + V_{rq}I_{rq} \\ Q_r = V_{rq}I_{rd} - V_{rd}I_{rq} \end{cases} \quad (2.40)$$

Pr : La puissance active rotoriques.

Qr : La puissance réactive rotoriques [32].

2.3.4.2. Modélisation de convertisseur de puissance [33]

A. Fonctionnement générateur avec convertisseur MLI

On peut considérer que la chaîne de conversion électronique est composée un ensemble redresseur (CCR)-onduleur (CCM) séparé par un étage à courant continu comme montré sur la figure (2.13). Le Convertisseur Coté Réseau (CCR) fonctionne en redresseur dans un régime hypo synchrone, il est commandé en MLI de façon à assurer une tension du bus continue constante et un facteur de puissance désiré. Le Convertisseur Coté Machine (CCM) fonctionne en onduleur dans un régime hypo synchrone, il est commandé en MLI de façon à fournir une puissance active et réactive données au stator. Cette cascade de convertisseurs permet un transfert bidirectionnel de la puissance rotorique ; c'est-à-dire qu'en régime hyper-synchrone le CCM fonctionnera en redresseur et le CCR en onduleur. Les convertisseurs CCR et CCM sont à simple niveau ; c'est-à-dire que chacun est composé de six interrupteurs (IGBT + une diode en antiparallèle) commandés par une seule porteuse.

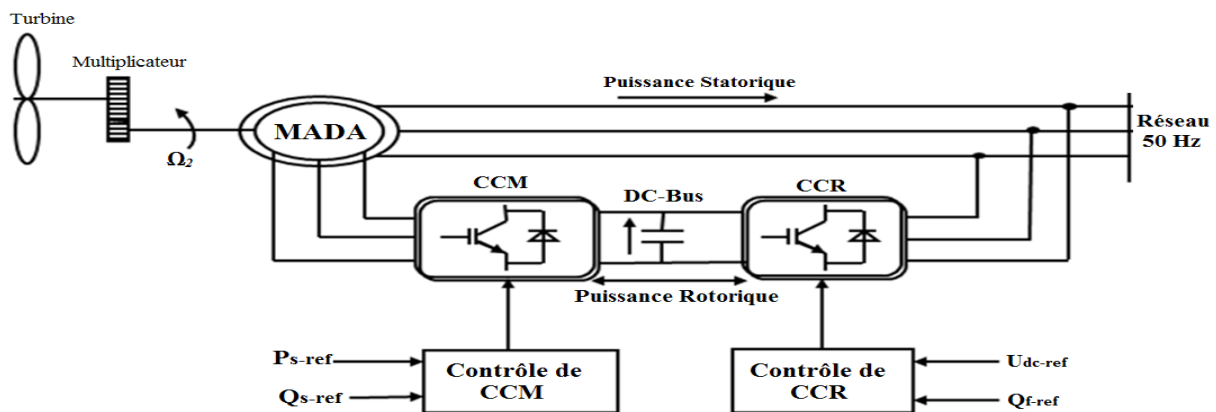


Fig.2.13 Architecture de commande du système éolien

Pour simplifier les modèles, certaines hypothèses simplificatrices ont été émises : [33]

- Les interrupteurs sont considérés comme parfaits (résistance de valeur nulle à l'état passant, infinie à l'ouverture et les commutations sont instantanées).

- Les cellules d'interrupteurs placées en série ou en parallèles et commandées par les mêmes signaux sont considérées comme un seul interrupteur.
- La source est considérée comme parfaite et indépendante des autres contraintes électriques. Par exemple, une source de tension sera indépendante du courant et de la fréquence.
- Les éléments passifs sont considérés comme linéaires et invariants dans le temps, c'est-à-dire que les valeurs qui les caractérisent (résistance, inductance et capacité,...) ne change pas dans le temps, ne dépendent pas des autres contraintes électriques et ne peuvent pas se saturés.

B. Modèle de convertisseur coté réseau (redresseur) :

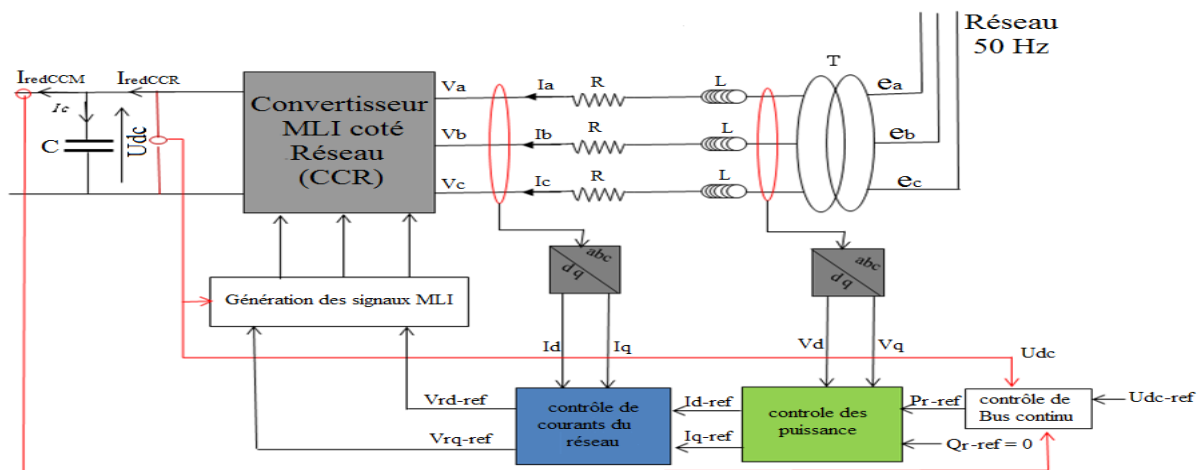


Fig.2.14 Schéma de principe de la régulation du CCR

❖ Calcul des courants et tensions d'entrée du redresseur :

$$\begin{cases} e_a = e_{amax} \sin \theta \\ e_b = e_{bmax} \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ e_c = e_{cmax} \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (2.41)$$

Avec :

e : L'amplitude maximale de la tension de source

En appliquant la loi du Kirchhoff côté alternatif, on obtient :

$$\begin{cases} -e_a - R I_a - L \frac{d}{dt} I_a + V_a = 0 \\ -e_b - R I_b - L \frac{d}{dt} I_b + V_b = 0 \\ -e_c - R I_c - L \frac{d}{dt} I_c + V_c = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{R}{L} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_a - V_a \\ e_b - V_b \\ e_c - V_c \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

Où V_a, V_b et V_c sont les tensions simples à l'entrée du convertisseur

Après avoir calculé les courants d'entrée au convertisseur (CCR) maintenant on cherche les tensions d'entrée :

Chapitre 02 Modilisation d'un système éolienne basé sur GADA

$$\begin{cases} U_{ab} = V_a - V_b \\ U_{bc} = V_b - V_c \\ U_{ca} = V_c - V_a \end{cases} \quad \text{Alors} \quad V_a + V_b + V_c = 0 \quad (2.43)$$

A partir l'équation on trouve :

$$\begin{cases} V_a = \frac{U_{ab} - U_{ca}}{3} \\ V_b = \frac{U_{bc} - U_{ab}}{3} \\ V_c = \frac{U_{ca} - U_{bc}}{3} \end{cases} \iff \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

Dans notre application, Le redresseur est commandé par des fonctions de commutations ($CR1$, $CR2$ et $CR3$) prenant les valeurs de 0 ou +1. Chaque interrupteur peut être commandé en ouverture ou en fermeture, c'est-à-dire si un interrupteur du bras haut est bloqué $CRi = 0$ et s'il est passant alors $CRi = 1$ (avec $i = 1, 2$ ou 3). De plus, lorsque $CRi = 1$, alors son complément, pour ne pas court-circuiter un bras du redresseur ou l'ouverture brusque, $CRi = 0$. Les tensions d'entrée (V_a, V_b, V_c) sont en fonction des états de ces interrupteurs. Le tableau suivant donne les huit états possibles de ces interrupteurs.

K	$CR1$	$CR2$	$CR3$	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}
0	1	0	0	U_{dc}	0	$-U_{dc}$
1	1	1	0	0	U_{dc}	$-U_{dc}$
2	0	1	0	$-U_{dc}$	U_{dc}	0
3	0	1	1	$-U_{dc}$	0	U_{dc}
4	0	0	1	0	$-U_{dc}$	U_{dc}
5	1	0	1	U_{dc}	$-U_{dc}$	0
6	0	0	0	0	0	0
7	1	1	1	0	0	0

Tableau 2.2 les différents états des interrupteurs et les tensions correspondantes

De cette table, On cherchera alors une expression reliant la tension U_{dc} aux tensions V_a, V_b, V_c qui soit une fonction de l'état des interrupteurs. On commencera d'abord par trouver l'expression des tensions composées en fonction de l'état des interrupteurs.

$$\begin{cases} U_{ab} = U_{dc}(C_{01} - C_{02}) \\ U_{bc} = U_{dc}(C_{02} - C_{03}) \\ U_{ca} = U_{dc}(C_{03} - C_{01}) \end{cases} \quad (2.45)$$

On remplace (2.45) dans (2.43) on trouve :

$$\begin{cases} V_a = U_{dc} \left[\frac{2C_{R1} - (C_{R2} + C_{R3})}{3} \right] \\ V_b = U_{dc} \left[\frac{2C_{R2} - (C_{R3} + C_{R1})}{3} \right] \\ V_c = U_{dc} \left[\frac{2C_{R3} - (C_{R1} + C_{R2})}{3} \right] \end{cases} \quad (2.46)$$

Le système d'équations peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

❖ Calcul des courants et tensions de sortie du redresseur :

On dit que l'état ouvert ou fermé est le passage direct des courants d'entrée I_a, I_b, I_c à travers les courants d'interrupteurs $I_{k11}, I_{k21}, I_{k31}$ jusqu'au le courant de sortie I_{dc}

Avec :

$$\begin{cases} I_{k11} = I_a C_{R1} \\ I_{k21} = I_b C_{R2} \\ I_{k31} = I_c C_{R3} \end{cases} \quad (2.48)$$

$$I_{dc} = I_{k11} + I_{k21} + I_{k31} \quad (2.49)$$

Pour compléter le modèle du redresseur dans le repère triphasé (a b c), on rajoute l'équation traduisant la charge de la capacité C qui est donnée par :

$$\frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} I_c \rightarrow \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} (I_{redCCR} - I_{redCCM}) \quad (2.50)$$

C. Modèle du convertisseur coté Machine (CCM) :

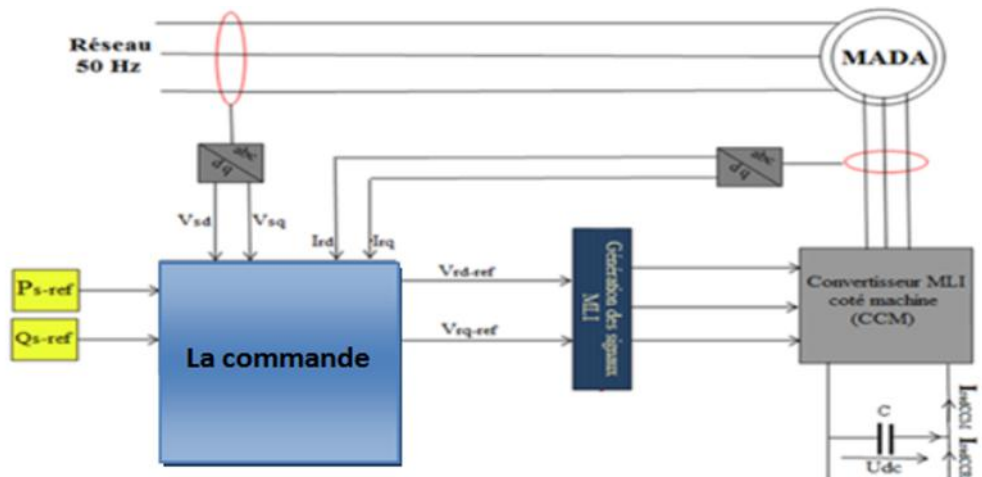


Fig.2.15 Schéma de principe de la commande CCM

❖ Calcul des tensions de sortie du CCM :

Nous pouvons remplacer les bras du CCM par des interrupteurs à deux positions modélisées par une fonction logique décrit l'état de chaque interrupteur, sa valeur vaut 1 si l'interrupteur est fermé, et 0 s'il est ouvert.

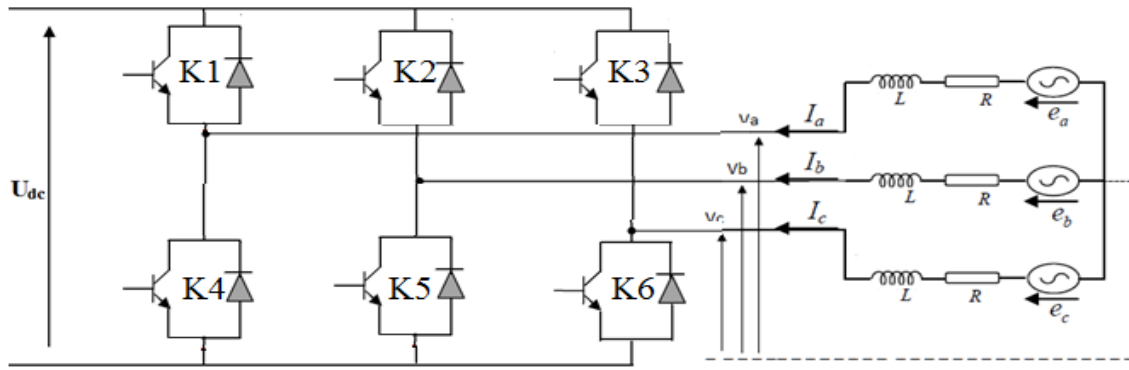


Fig.2.16 Onduleur de tension triphasée

Les interrupteurs (K1, K4), (K2, K5), (K3, K6) sont contrôlés de manière complémentaire pour éviter le court-circuit. Les tensions composées à la sortie du convertisseur (CCM) s'expriment par :

$$\begin{cases} U_{ab} = U_{dc}(C_{01} - C_{02}) \\ U_{bc} = U_{dc}(C_{02} - C_{03}) \\ U_{ca} = U_{dc}(C_{03} - C_{01}) \end{cases} \quad (2.51)$$

Si on prend en compte l'équilibre des tensions :

$$V_a + V_b + V_c = 0$$

On déduit les expressions des tensions simples par rapport aux tensions composées comme suit:

$$\begin{cases} V_a = \frac{1}{3} (U_{ab} - U_{ca}) \\ V_b = \frac{1}{3} (U_{bc} - U_{ab}) \\ V_c = \frac{1}{3} (U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (2.52)$$

On remplace (2.51) dans (2.52) on trouve :

$$\begin{cases} V_a = \frac{U_{dc}}{3} (2C_{01} - C_{02} - C_{03}) \\ V_b = \frac{U_{dc}}{3} (2C_{02} - C_{03} - C_{01}) \\ V_c = \frac{U_{dc}}{3} (2C_{03} - C_{01} - C_{02}) \end{cases} \quad (2.53)$$

Le système d'équations (2.53) peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{01} \\ C_{02} \\ C_{03} \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

La tension de sortie de l'onduleur est contrôlée par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) triangulo-sinusoïdale qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la valeur efficace de tension de sortie.

❖ Principe de la MLI :

Chapitre 02 Modélisation d'un système éolienne basé sur GADA

La modulation triangulo-sinusoïdale est appelée également modulation de largeur d'impulsion intersective puisque son principe repose sur l'intersection d'une onde modulante basse fréquence, dite tension de référence, généralement sinusoïdale, avec une onde porteuse haute fréquence de forme, généralement, triangulaire, d'où l'appellation triangulo-sinusoïdale.

Le résultat de la comparaison de ces deux signaux sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance.

Deux paramètres caractérisent cette commande si la référence est sinusoïdale :

- L'indice de modulation m qui définit le rapport entre la fréquence f_p de la porteuse et la fréquence f de la référence : $m = f_p / f$
- Le taux de modulation r (ou coefficient de réglage en tension ou encore rapport cyclique) qui donne le rapport de l'amplitude de la modulante V_r à la valeur crête V_p de la porteuse: $r = V_r / V_p$.

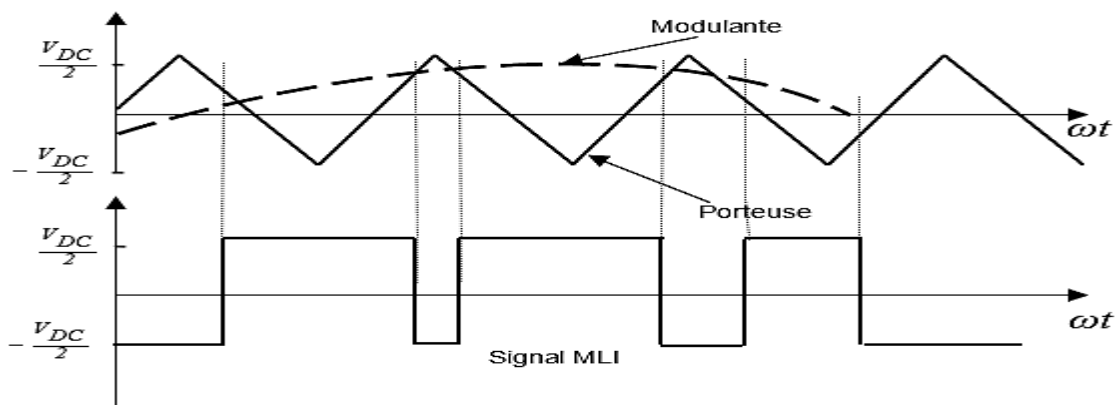


Fig.2.17 Principe de commande en MLI sinus-triangulaire.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons abordé la modélisation de notre chaîne de conversion mécaniquement (turbine) permettant la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique grâce au modèle de la turbine en précisant l'utilité du multiplicateur et l'utilité de l'orientation des pales. Et d'obtenir un système de conversion de puissance plus efficace grâce au développement de la puissance par la stratégie d'optimisation MPPT (Maximum Power Point Tracking), avec différentes techniques afin électriquement (générateur et convertisseur de puissance), nous avons déduit ses équations permettant la réalisation des commandes des convertisseurs. Nous avons utilisé la transformation de PARK pour simplifier les équations de la machine asynchrone. C'est le dernier pilotée par le rotor via les deux convertisseurs (CCR et CCM) de puissances contrôlés par la commande MLI et reliés au réseau via un bus continu.

Chapitre 02 Modilisation d'un système éolienne basé sur GADA

C'est cette structure qui sera étudiée dans le prochain chapitre. Des stratégies de commande seront établies pour contrôler maximum de la puissance mécanique fournir à la turbine et l'échange de puissance entre la machine et le réseau auquel elle est connectée et différents types de régulateurs seront testés en simulation. Dans le chapitre suivant, on va analyser également le comportement dynamique de la MADA avec trois commandes différentes (PI classique, à logique floue).

Chapitre 03

**Commande et résultat de
Simulation de GADA par PI
et logique floue**

Chapitre 03 Commande et résultat de Simulation de GADA par PI et logique floue

3.1 Introduction

les techniques de la recherche permanente de ce maximum qui est notre but. Un fonctionnement idéal du système éolien nécessite un suivi parfait de ce contrôle. Pour approcher ce but, une commande spécifique connue sous la terminologie : Maximum Power Point Tracking (MPPT) correspondant à la zone II doit être utilisée. Cette technique consiste à contrôler le couple électromagnétique (la puissance active) afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée.

Les travaux de recherche publiés jusqu'à présent sur la commande à vitesse variable pour optimiser le transfert d'énergie dans les systèmes éoliens sont généralement consacrés aux systèmes de très forte puissance reliés aux réseaux électriques [21]. Ces travaux montrent que les éoliennes qui fonctionnent à vitesse variable fournissent un rendement énergétique de 10-35% plus élevé comparés aux éoliennes qui fonctionnent à vitesse constante avec un moindre effort mécanique et moins de fluctuations de puissance [22]. Différentes méthodes MPPT ont été utilisées afin d'obtenir un fonctionnement optimal. Nous présenterons une étude théorique sur la commande Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse.

Dernières années les méthodes classiques de l'automatique ont été largement appliquées dans de nombreux problèmes de régulation industrielle et des techniques basées sur l'intelligence artificielle. Parmi ces dernières techniques, on peut citer le réseau neuronal, les algorithmes génétiques et la logique floue. La commande par logique floue est à l'heure actuelle une des préoccupations des chercheurs dans le monde. Les systèmes d'inférence flous possèdent deux points forts: le premier est qu'ils sont généralement construits à partir de la connaissance humaine et le deuxième réside dans leur capacité descriptive due à l'utilisation des variables linguistiques.

Dans ce chapitre on va présenter en bref un rappel sur les deux régulateurs PI classique et flous. Une méthodologie de contrôleurs combinant l'approche PI et l'approche floue sera présentée aussi, cette approche associant le régulateur PI et le superviseur composé de règles floues. Enfin et dans le but de comparer les approches proposées, nous terminons cette étude et découvrons la validité de ce contrôle en simulant le système par des tests de simulation sur la commande des puissances active et réactive dans le stator de la MADA. Pour vérifier la validité des algorithmes de contrôle présentés dans l'étude théorique et absolue sur le système, nous l'implémentons dans le cadre de Matlab-Simulink pour transformer les équations qui composent le système de processus en blocs graphique. Après

Chapitre 03 Commande et résultat de Simulation de GADA par PI et logique floue

avoir entré les modèles dans Matlab-Simulink , les résultats de la simulation pour le comportement exact des éoliennes apparaîtront dans ce chapitre.

3.2. Stratégie de la commande :

3.2.1.Principe de M.P.P.T.

Les éoliennes utilisées pour la production d'électricité doivent permettre de produire un maximum de puissance en exploitation au mieux l'énergie disponible dans le vent. C'est pour cela que de nombreux systèmes de commande de l'éolienne, agissant au niveau de la partie mécanique ou électrique, sont développés pour maximiser la conversion d'énergie. On parle alors de recherche du point de fonctionnement à puissance maximum (*MPPT en anglais Maximum Power Point Tracking*). Il est possible de modifier l'angle de calage des pales, ou la vitesse de rotation de l'hélice ou bien encore jouer sur la commande de la génératrice. La recherche du maximum se fait en permanence et l'éolienne s'adapte donc à chaque variation de vent pour être dans une configuration d'extraction maximale de puissance [34].

Plusieurs configurations sont réalisables, avec des machines synchrones ou asynchrones et c'est ici que le domaine des asservissements des machines électriques prend sa place. Il y a déjà quelques d'années que cette discipline a développé différentes formes de commande de vitesse parmi lesquelles plusieurs sont applicables aux systèmes de conversion éoliens [27].

Pour cela, et afin de pouvoir optimiser le point de fonctionnement en terme de puissance extraite, il y a lieu de pouvoir ajuster la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice en fonction de la vitesse du vent.

L'MPPT peut être définie comme étant une stratégie de gestion permettant de suivre le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs éoliens à travers une électronique de puissance permettant de maximiser l'efficacité énergétique du système à travers la variation de la vitesse du vent [28].

Les caractéristiques de la figure(3.1) représentent les allures des puissances théoriquement disponibles au niveau d'une turbine éolienne de grande puissance en fonction de la vitesse de rotation de la génératrice pour différentes vitesses du vent. La machine devra pouvoir fonctionner entre 1200 et 2000tr/min pour cet exemple (courbe de réglage MPPT) [29].

Chapitre 03 Commande et résultat de Simulation de GADA par PI et logique floue

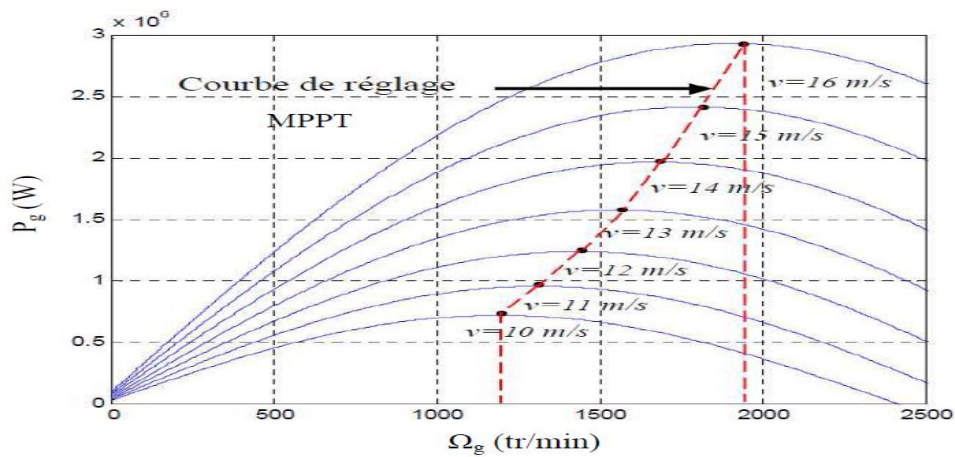


Fig.3.1. Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne.

Donc, l'objectif de cette stratégie est double, d'une part de protéger l'éolienne contre le vent fort et d'autre part de délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale P_n à une vitesse de vent nominale v_n , au-delà de cette vitesse les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au-delà d'une vitesse maximale v_m qui pourrait endommager la turbine.

3.2.2. Procédé de commande

L'algorithme de contrôle a pour principal objectif de maintenir le ratio vitesse de pointe, toujours à l'intérieur d'une faible bande passante à proximité de la valeur maximale, indépendamment de l'existence du dispositif de commande de pas « pitch Controller », car il a une faible constante de temps. Ainsi, l'action sur le contrôle de la vitesse est rotation de la turbine et de son comportement dans le temps en raison de l'équilibre entre l'aérodynamique couple, l'énergie du vent et le couple électrique produits par la machine électrique, l'énergie extraite de l'arbre de la turbine.

L'algorithme de contrôle de la figure (3.2) est basé sur un contrôleur global qui reçoit toutes les informations, il prépare les entrées variables et il les envoie à son système de commande floue. Ce module traite le comportement des entrées variables et trouve la bonne solution à appliquer dans la vitesse de la turbine éolienne pour atteindre l'objectif principal maximiser le point de fonctionnement pour atteindre une valeur maximale du coefficient de puissance, ce qui augmente la puissance d'extraction. Le procédé commence avec une valeur pour la vitesse du vent.

Chapitre 03 Commande et résultat de Simulation de GADA par PI et logique floue

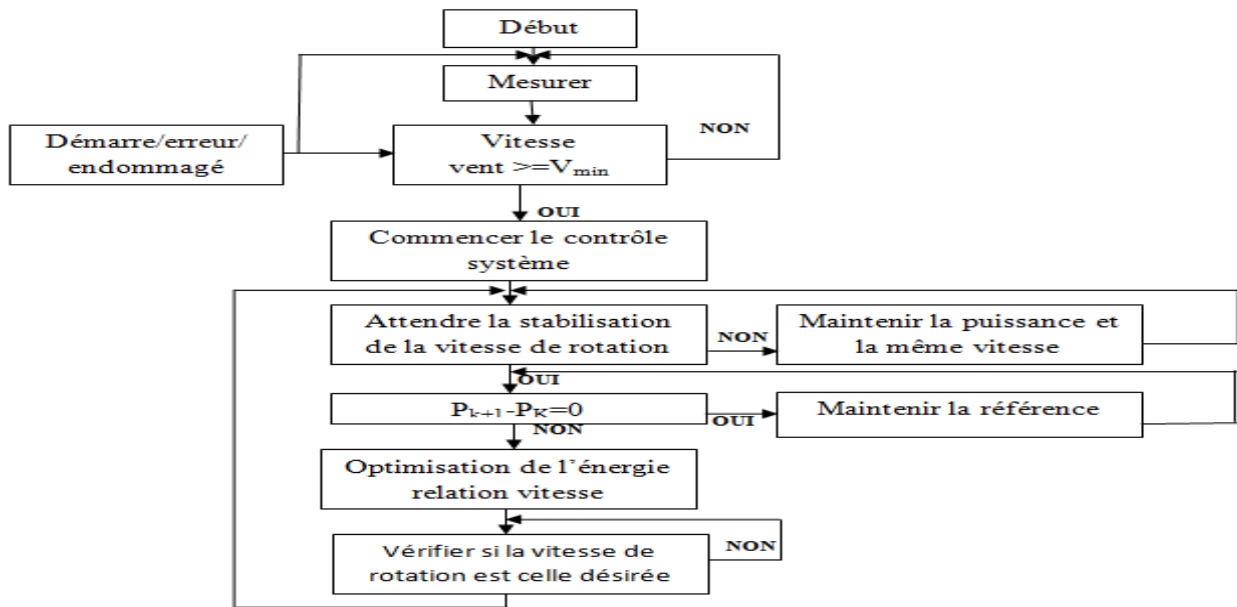


Fig.3.2 Structure de l'algorithme d'optimisation du coefficient de puissance [35].

❖ Inconvénient

Les méthodes probabilistes telles que celles basées sur les réseaux de neurones ou la logique floue, elles demandent une longue période d'apprentissage « off-line », ce qui les rend peu pratiques pour être employées dans les applications temps réel [36].

3.3. Commandes-en MPPT (Maximum Power Point Tracking) : [37]

L'algorithme de contrôle selon la méthode MPPT permet de rechercher le maximum de puissance électrique générée pour chaque vitesse de vent. La vitesse d'opération de la génératrice asynchrone à double alimentation est ainsi ajustée afin de produire un maximum de puissance en tout temps. Pour atteindre ce but, il faut estimer la position et la direction du point d'opération sur la courbe de puissance en fonction de la vitesse. La figure 3.3 présente l'évolution de la puissance en fonction de la vitesse de rotation de la machine pour différentes valeurs de la vitesse du vent, et pour un angle de calage $\beta = 0$. Sur la même figure, on a présenté l'évolution de la puissance maximale générée en fonction de la vitesse de rotation. Il est observé que la puissance maximale que la turbine peut produire pour chaque vitesse de vent, correspond à une vitesse optimale. Cette vitesse optimale est atteinte lorsque le coefficient de puissance C_p est maximal. Pour chaque valeur de la vitesse de rotation, On peut déduire la puissance maximale qu'on peut obtenir :

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{w_m^3}{\lambda^3} C_p \quad (2.51)$$

Chapitre 03 Commande et résultat de Simulation de GADA par PI et logique floue

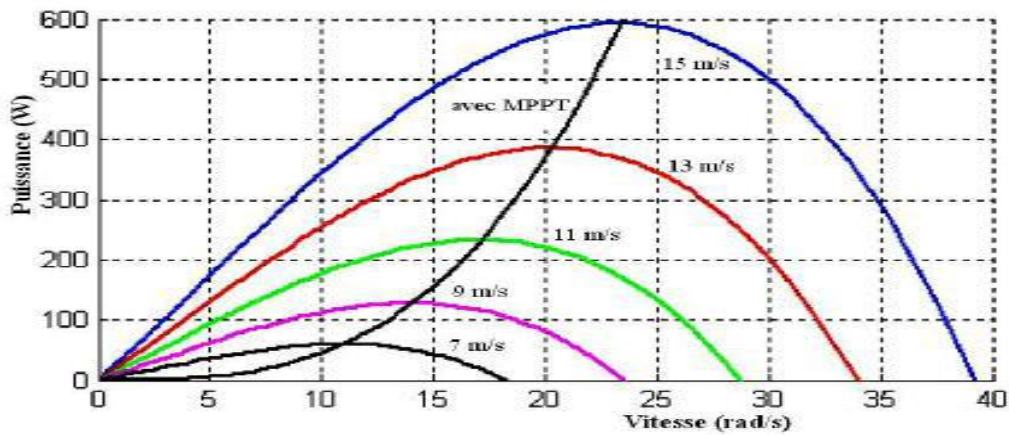


Fig.3.3. Caractéristiques d'une éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation.

L'application de l'algorithme MPPT pour extraire la puissance maximale dans une éolienne à vitesse variable a pour effet de régler la vitesse de changement d'un générateur et ainsi on cherche à améliorer l'énergie extraite de la machine en adaptant la vitesse de la turbine à la vitesse du vent tout en maintenant un angle de calage nul.

Grâce à la technologie MPPT, le problème de l'optimisation de la puissance d'énergie électrique maximale extraite de l'énergie cinétique éolienne disponible a été résolu par plusieurs travaux qui varient en fonction du type d'informations dont ils ont besoin pour fournir une référence de vitesse. Ces techniques peuvent être classées comme classiques et intelligence artificielle selon que la vitesse du vent et les caractéristiques aérodynamiques sont nécessaires ou non pour générer la référence.

3.3.1. Commande MPPT Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse

La nature fluctuante du vent engendre des perturbations dans le système de conversion éolien et crée des variations continues de puissance. De cet effet, on suppose que le couple électromagnétique développé par la machine est égal à sa valeur de référence, quelque soit la puissance générée [45] :

$$C_m = C_{m-ref} \quad (3.1)$$

Selon l'équation fondamentale de la dynamique permettant de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total appliqué au rotor, on peut régler cette vitesse à une référence. Ceci est obtenu en utilisant un asservissement adéquat de vitesse pour avoir un couple électromagnétique de référence.

$$C_{m-ref} = PI(\Omega_{ref} - \Omega_r) \quad (3.2)$$

Chapitre 03 Commande et résultat de Simulation de GADA par PI et logique floue

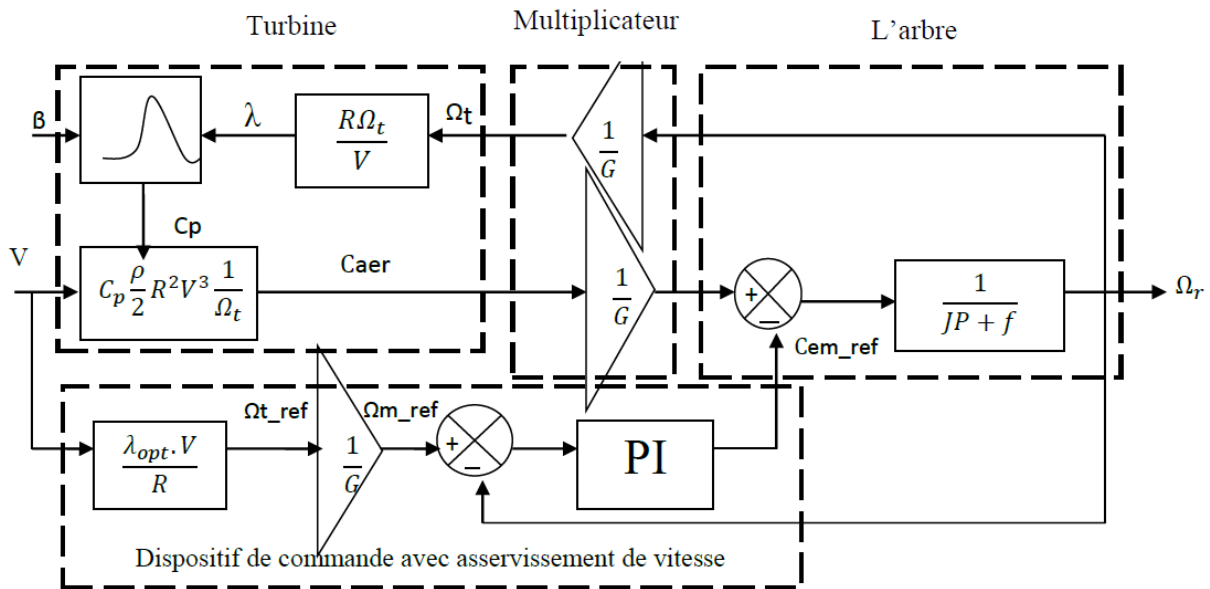


Fig3.4. Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse

3.3.2. Généralités sur les régulateurs classiques (PI) et les régulateurs flous

On appelle régulateur ou (contrôleur) la partie d'un système de commande comparant le signal de mesure $y(t)$ avec le signal de consigne $r(t)$ afin de générer un signal de commande $u(t)$ (Figure 3.5).

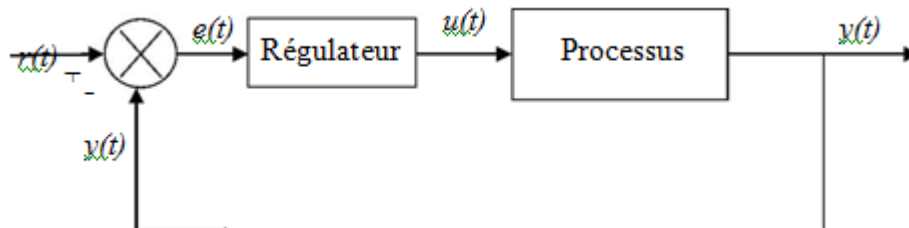


Fig3.5. Schéma fonctionnel d'un processus réglé

On peut classer les contrôleurs selon deux grandes familles: les contrôleurs classiques et les contrôleurs avancés.

- **Contrôleurs classiques**

Les contrôleurs de type classique sont constitués d'une seule variable d'entrée et d'une seule variable de sortie, exemple; les contrôleurs PI. Les contrôleurs à avance-retard de phase.

- **Contrôleurs avancés**

Les contrôleurs de type avancé ou dits à méthode moderne sont constitués de plusieurs variables d'entrée et de plusieurs variables de sortie [46].

3.3.2.1. Principaux objectifs de la commande

Chapitre 03 Commande et résultat de Simulation de GADA par PI et logique floue

- **Précision en poursuite:**

On quantifie la précision en comparant le signal de sortie au signal d'entrée. Le signal résultant est souvent noté $e(t)$. Cette grandeur représente donc la différence entre la consigne et la mesure. En régime permanent, on parlera de la précision statique ou encore de l'erreur statique (Figure 3.6).

- **Précision en régulation:**

On peut juger ce critère par la rapidité d'un système en mesurant sur sa réponse indicielle, soit le temps de réponse (à 5% ou 10%), soit le temps de montée ou encore on considérant ces deux grandeurs à la fois. Le dépassement est un facteur que l'on peut prendre aussi en compte.

- **Robustesse:**

La robustesse représente la capacité d'une commande à garder ses performances malgré les variations des paramètres du système à commander et les perturbations qui l'affectent.

En général on se fixe un cahier de charges pour les critères de performances suivants: le dépassement, le temps de réponse et l'erreur statique suite à un changement de consigne ou de perturbations.

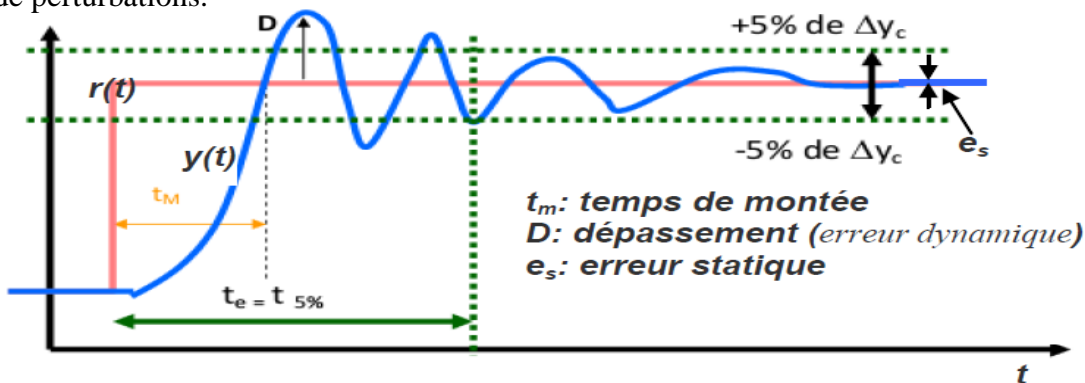


Fig.3.6. Réponse typique d'un procédé asservi à un échelon de consigne

3.3.2.2. Description des régulateurs PI

Le régulateur PI classique relie directement le signal de commande $u(t)$ au signal d'écart $e(t)$. Sa description temporelle est la suivante:

$$u(t) = k_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right) \quad (3.3)$$

avec l'écart défini comme suit:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (3.4)$$

Où k_p et T_i ($k_i = 1/T_i$) sont les paramètres à régler du régulateur. Sa fonction de transfert H

Chapitre 03 Commande et résultat de Simulation de GADA par PI et logique floue

s'écrit:

$$H(p) = \frac{U}{E} = k_p \left(1 + \frac{1}{pT_i} \right) \quad (3.5)$$

E , U sont les signaux d'entrée et de sortie du contrôleur.

Les performances d'un contrôleur PI classique sont déterminées par ses paramètres (proportionnelle et intégrale (k_p et k_i)). Une augmentation de k_p accélère la réponse du procédé, provoque une diminution de l'écart résiduel (l'erreur statique e), mais rend la mesure de plus en plus oscillatoire. La valeur optimale de k est celle qui donne la réponse la plus rapide, avec un bon amortissement. Le rôle de l'action intégrale est d'éliminer l'erreur du système de contrôle en régime permanent. Comme dans le cas de l'action proportionnelle, une augmentation excessive de l'action intégrale k_i (diminution de T_i) peut être source d'instabilité.

Nous pouvons facilement remarquer que la combinaison P + I permet, en général, de garder l'effet bénéfique de l'action intégrale en ce qui concerne l'erreur statique et d'en éviter les inconvénients en ce qui concerne la stabilité. En effet, en examinant les courbes de *Bode* relatives au régulateur PI, on remarque que la présence du zéro supprime l'effet néfaste de l'intégrateur dans le domaine des hautes fréquences.

1) Méthodes d'optimisation pour le réglage de contrôleurs PI

A ce propos, une étude de 1993, rapporte que sur plus de 2000 boucles de régulation, 95 % de celles-ci utilisaient des structures de type PID, la majorité de ces dernières étant en fait de type PI. Seulement 20 % de ces boucles de régulation fonctionnèrent correctement. Une des causes majeures de ces faibles performances consistait en un mauvais choix des paramètres du régulateur. Malgré l'emploi étendu du contrôleur PI, il n'existe pas de méthode de design universellement acceptée [47].

➤ Méthodes de réglage des actions

Il existe différentes méthodes de réglage ou d'optimisation des actions d'un régulateur PI. Suivant le type de procédé et les contraintes de fabrication on choisira l'une des méthodes.

➤ Méthode par approches successives

Elle consiste à modifier les actions du régulateur et à observer les effets sur la mesure enregistrée, jusqu'à obtenir la réponse optimale. On règle l'action proportionnelle, puis l'action dérivée ou intégrale.

➤ Méthode nécessitant l'identification du procédé

Chapitre 03 Commande et résultat de Simulation de GADA par PI et logique floue

Si l'on connaît les paramètres du procédé, suite à une modélisation de sa fonction de transfert, il est alors possible de calculer rapidement les paramètres de réglage qu'on pourra affiner suite à des essais, afin d'obtenir la réponse souhaitée. Cette méthode nécessite un enregistreur à déroulement rapide. Elle est de préférence utilisée sur des procédés à grande inertie.

➤ **Méthode de Ziegler et Nichols**

Elle nécessite l'observation de la réponse du procédé et la connaissance de la structure du régulateur. C'est une méthode qui permet le calcul des actions, sans la détermination des paramètres du procédé. Nous pouvons utiliser cette méthode décrite en annexe afin d'estimer les paramètres du régulateur PI.

Les contrôleurs de type PI classique ont atteint le maximum de leur possibilité. En effet, ceux-ci sont souvent mal réglés ou tout simplement utilisés à défaut d'autres choix, ce qui occasionne, entre autres, une diminution des performances [48].

3.3.3. Commande par logique flou(FLC) de GADA

3.3.3.1. La logique floue

La maximisation de l'extraction de l'énergie éolienne peut être obtenue en utilisant des générateurs électriques à vitesse variable, en collaboration avec des algorithmes de contrôle non linéaires. Cet article présente une méthode de contrôle de vitesse supplémentaire qui est indépendante de mesure de la vitesse du vent et des caractéristiques des systèmes.

L'algorithme est basé sur le comportement dynamique du générateur électrique et utilise la logique floue en tant que non linéaire outil de raisonnement. Cette méthode montre qu'il est possible d'augmenter l'efficacité de la conversion de l'énergie éolienne à vitesse variable et le couple [35]

3.3.3.2 Conception du contrôleur flou

La logique floue se base sur un certain nombre d'actions: d'abord la fuzzification des grandeurs d'entrée du contrôleur flou, puis la déduction des décisions appropriées de la commande floue en fonction de règles d'inférence définies. Enfin, la sortie du FLC qui consiste en la prise de décision, via la défuzzification des grandeurs floues. Ainsi, les principaux processus de conception du FLC sont la fuzzification, les règles de base et l'inférence et enfin la défuzzification [38].

Chapitre 03 Commande et résultat de Simulation de GADA par PI et logique floue

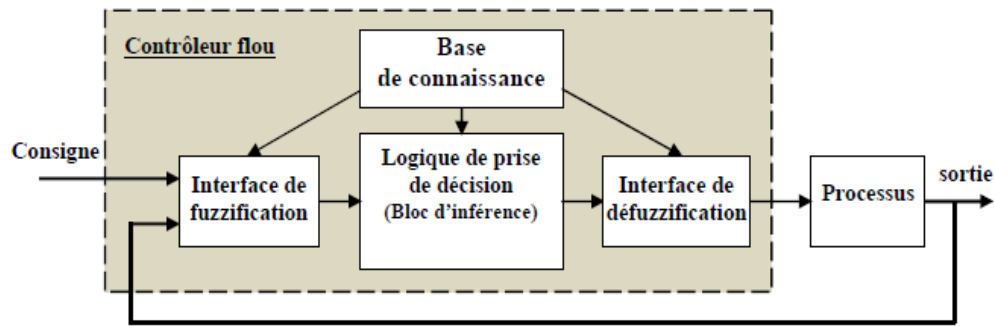


Fig.3.7. Schéma de la structure interne de la mise en œuvre d'un contrôleur flou

❖ Phase de fuzzification

La phase de fuzzification consiste en la définition de fonctions d'appartenance pour les différentes variables linguistiques. En effet, il est nécessaire de convertir les grandeurs physiques présentes à l'entrée après leur normalisation, en des variables linguistiques qui sont des règles sémantiques définies par un opérateur expert. Ceci permet une meilleure classification de ces grandeurs physiques sur les ensembles flous définissant cette variable.

Cette action permet de déterminer avec une meilleure précision, le degré d'appartenance de la variable d'entrée en fonction de la valeur réelle, par rapport à chaque ensemble flou. Généralement, le FLC reçoit comme variables d'entrée, l'erreur entre la sortie du processus à commander et le signal de référence, ainsi que la variation de cette erreur [39,40]. La loi de commande d'un contrôleur peut être représentée par la figure suivante:

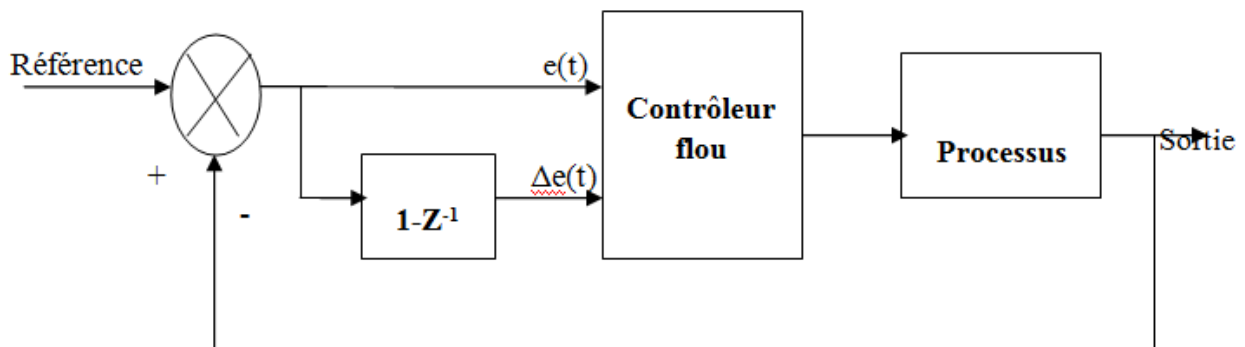


Fig.3.8. Schéma de principe d'un contrôleur flou

Il n'existe pas de règles évidentes dans le choix du nombre des ensembles flous ainsi que le type des fonctions d'appartenance et la répartition de l'univers du discours de chaque variable [40]. Souvent, l'utilisation de plus de sept ensembles flous n'améliore pas les performances d'un contrôleur flou en termes de dynamique [41].

❖ Phase d'inférence

Chapitre 03 Commande et résultat de Simulation de GADA par PI et logique floue

L'inférence floue est une relation floue définie entre deux sous-ensembles. C'est une action qui consiste en l'agrégation des règles (Si Alors) qui sont établies sur la base des connaissances de l'expertise humaine. L'intersection des multiples règles précédentes, est calculée en utilisant un opérateur *t-norme* tandis que l'union de plusieurs règles est calculée en utilisant l'opérateur *t-norme* [42]. La définition de la relation peut théoriquement faire intervenir n'importe quel opérateur flou. La mise en place de la table d'inférence est basée sur une analyse qualitative du fonctionnement du système. Généralement ce sont les inférences floues définies par Mamdani et Sugeno qui sont les plus utilisées:

- ✚ Méthode d'inférence Max-Min (méthode Mamdani);
- ✚ Méthode d'inférence Max-Produit;
- ✚ Méthode d'inférence Somme-Produit.

Sortie		$\Delta e(t)$				
		GN	N	Z	P	GP
e(t)	GN	Z	Z	GN	Z	Z
	N	Z	Z	N	Z	Z
	Z	N	N	Z	P	P
	P	Z	Z	P	Z	Z
	GP	Z	Z	GP	Z	Z

Tableau 3.1 Exemple d'une matrice d'inférence qui convient pour les systèmes de premier ordre [43]

Ainsi, l'inférence se fait sur la base de la matrice construite, où on peut activer uniquement une partie des règles, comme le montre le tableau 3.1 où juste les cases en bleu sont activées. Dans ce cas, on parle de matrice incomplète.

❖ Phase de défuzzification

La défuzzification qui est la dernière étape dans la conception du contrôleur flou, consiste en la conversion du résultat de l'inférence, qui est une fonction d'appartenance, en une grandeur physique en sortie. Il existe plusieurs méthodes pour la défuzzification des contrôleurs flous [44, 42]:

- défuzzification par centre de gravité;
- défuzzification par centre maximum;
- défuzzification par valeur de maximum.

Chapitre 03 Commande et résultat de Simulation de GADA par PI et logique floue

Ainsi, avec la méthode du centre de gravité qui est la plus utilisée dans la littérature, la valeur de sortie du contrôleur flou à l'instant k peut s'exprimer comme suit [40]:

$$Y_k = \frac{\int x \mu_R(x) dx}{\int \mu_R(x) dx} \quad (3.6)$$

Avec x la variable floue et $\mu_R(x)$ le degré d'appartenance de x à l'ensemble flou R .

3.3.3.3. Application de la logique floue à la commande de la puissance active et réactive de la GADA

Nous allons suivre les étapes indiquées de régulateurs par de type mamdani pour la boucle de commande des courants et des puissance, dans l'objectif d'améliorer les performances de la commande. Ce contrôleur possède deux entrées et une seule sortie. Des fonctions d'appartenance triangulaires symétriques sont utilisées sur un univers de discours normalisé dans l'intervalle $[-1 \ 1]$ pour chaque variable.

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 , Q).

Comme il est représenté sur la figure (3.9), dans le contrôleur flou 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 $\Delta e(t)$.

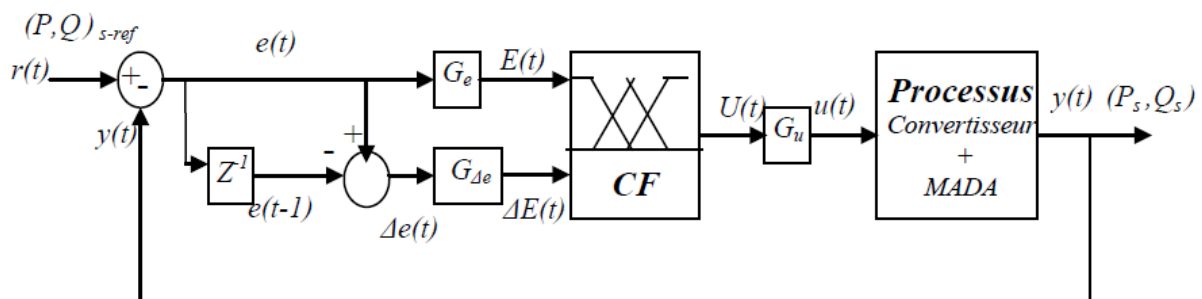


Fig.3.9. Schéma synoptique d'un régulateur flou des puissances active et réactive

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

$$E = G_e e, \Delta E = G_{\Delta e} \Delta e, u = G_u u \quad (3.7)$$

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

Chapitre 03 Commande et résultat de Simulation de GADA par PI et logique floue

grandeurs normalisées à l'entrée et à la sortie du CF.

D'après [49], 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:

$$E(t) = G_e[r(t) - y(t)]$$
$$\Delta E(t) = G_{\Delta e}[e(t) - e(t - 1)] \quad (3.8)$$

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.

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:

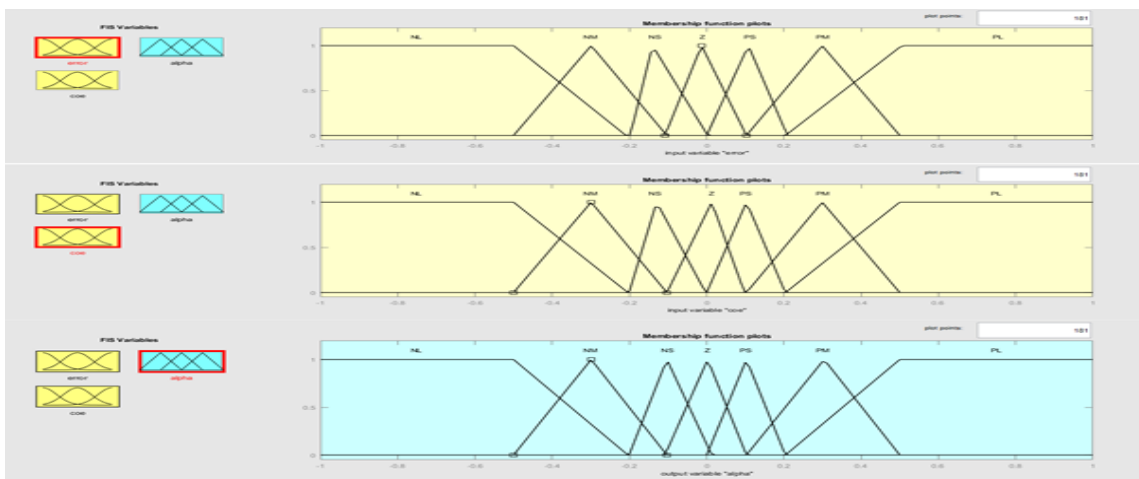


Fig.3.10: Ensembles flous de l'erreur, la variation d'erreur et de la commande

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

Chapitre 03 Commande et résultat de Simulation de GADA par PI et logique floue

d'appartenance; elles peuvent être symétriques et distribuées de manière équidistante. Elles peuvent également être symétriques et distribuées de manière non équidistante.

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 [50]. 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* [51] 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.

Une méthode, proposée par *King* et *Mamdani*, pour élaborer les règles d'inférence du contrôleur flou, consiste à se servir des connaissances pragmatiques du réglage d'un contrôleur PI classique.

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.1 est appelée matrice de *MACVICAR- WHELAN* [52]. Ce tableau montre la matrice d'inférence de CF pour une partition de 7 sous ensembles flous pour chaque variable d'entrée $E(t)$ et $\Delta E(t)$.

	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
NL	PL	PL	PL	PL	NM	Z	Z
NM	PL	PL	PL	PM	PS	Z	Z
NS	PL	PM	PS	PS	PS	Z	Z
Z	PL	PM	PS	Z	NS	NM	NL
PS	Z	Z	NM	NS	NS	NM	NL
PM	Z	Z	NS	NM	NL	NL	NL
PL	Z	Z	NM	NL	NL	NL	NL

Tableau3.2: Les règle

Chapitre 03 Commande et résultat de Simulation de GADA par PI et logique floue

La méthode d'inférence choisie est celle de *Mamdani*, c'est la méthodologie la plus couramment utilisée [52]. 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* [53]. Alors la sortie floue résultante du régulateur μ est la contribution des 49 règles floues de la matrice d'inférence.

Elle est donnée par:

$$\mu_{rés}(x) = \frac{1}{49} \sum_{i=1}^{49} \mu_{ri} \mu_{xi}(x) \quad (3.9)$$

Tels que:

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

μ_{xi} : est l'ensemble flou de la commande correspondant à la conclusion de la $i^{ème}$ règle et est une valeur de la commande variant dans l'univers de discours.

3. Defuzzification

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 (*defuzzification*) 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(3.10) [54] Cette méthode est caractérisée par sa simplicité de calcul et sa sortie est unique.

$$dc_n = x_{Gr} = \frac{\sum_{i=1}^{49} \mu_{ci} x_{Gi} S_i}{\sum_{i=1}^{49} \mu_{ci} S_i} \quad (3.10)$$

Où S est la surface de l'ensemble flou de l'incrément de la commande Δc correspondant à la $i^{ème}$ règle et x_{Gr} est l'abscisse de son centre de gravité.

3.4. Description de système de conversion

La chaîne de conversion électrique est composée de turbine, machine asynchrone à double alimentation, deux convertisseurs (redresseur et onduleur triphasé) couplés sur un bus continu. Le redresseur est connecté au réseau électrique. La cascade et sa commande est indiquée dans la (figure 3.11). Le bloc MPPT génère la puissance optimale de référence en fonction de la vitesse de rotation de la machine, suivant une relation prédéfinie.

Chapitre 03 Commande et résultat de Simulation de GADA par PI et logique floue

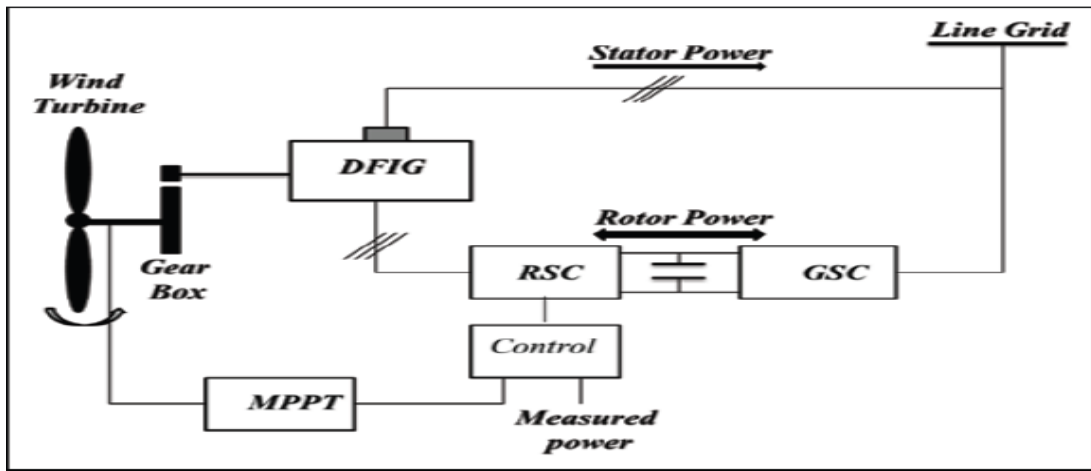


Fig.3.11 schéma bloc de la chaîne de conversion étudiée

3.5. Simulation du système global

Nous avons procédé à la simulation du système expliqué ci-après

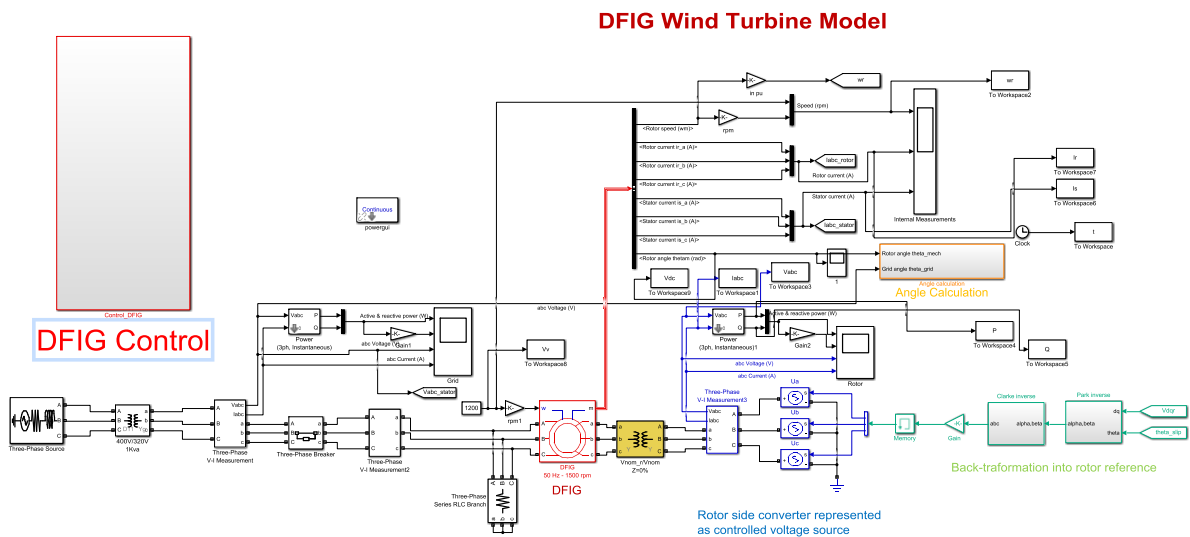


Fig.3.12 Schéma MATLAB SIMULINK d'un système global

Chapitre 03 Commande et résultat de Simulation de GADA par PI et logique floue

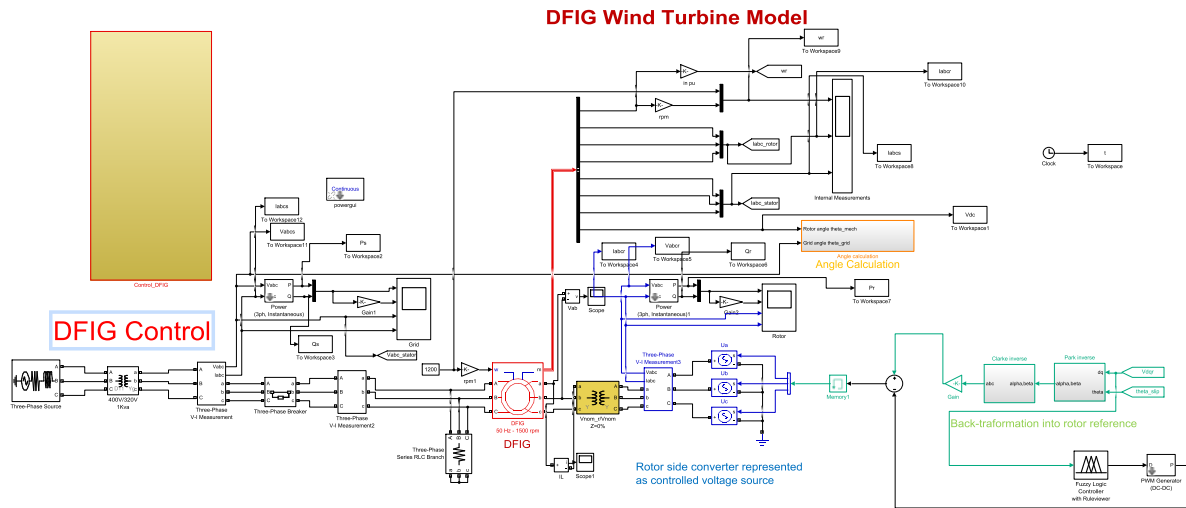


Fig.3.13 Schéma MATLAB SIMULINK d'un système global avec logique flou

3.6.Simulation et résultat

Dans cette section, les résultats de simulation sont présentés pour le système étudié. Le modèle proposé est implémenté dans MATLAB/Simulink. Pour montrer la performance des stratégies de contrôle étudiées dans ce travail, à savoir FLC et contrôleur PI. Pour mieux apprécier les différences entre les contrôles proposés, les premières séries de simulations sont effectuées pour tester les performances dans le suivi de référence.

Les puissances statoriques sont représentées dans les figures (3.22-3.23). Les contrôleurs suivent sur la base des résultats de simulation, la méthode FLC atteint un état stationnaire avec une erreur négligée. Les contrôleurs PI présentent des oscillations remarquables en régime permanent.

D'après les figures, le temps de réponse des contrôleurs FLC est meilleur que la méthode PI.

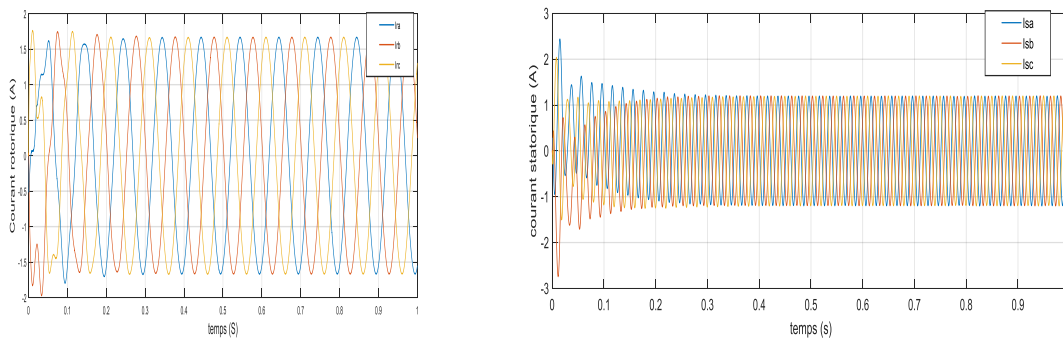


Fig.3.14 courants rotorique et statorique de GADA (PI)

Chapitre 03 Commande et résultat de Simulation de GADA par PI et logique floue

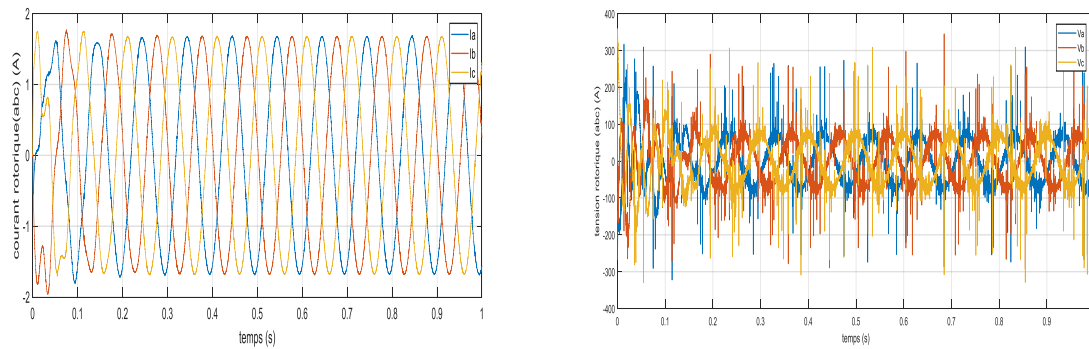


Fig.3.15 la tension et le courant de réseau (PI)

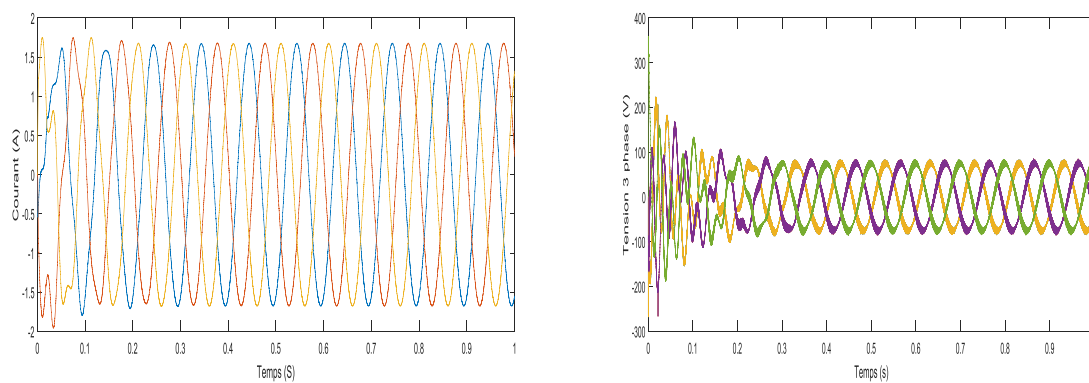


Fig.3.16 la tension et le courant de réseau (FLC)

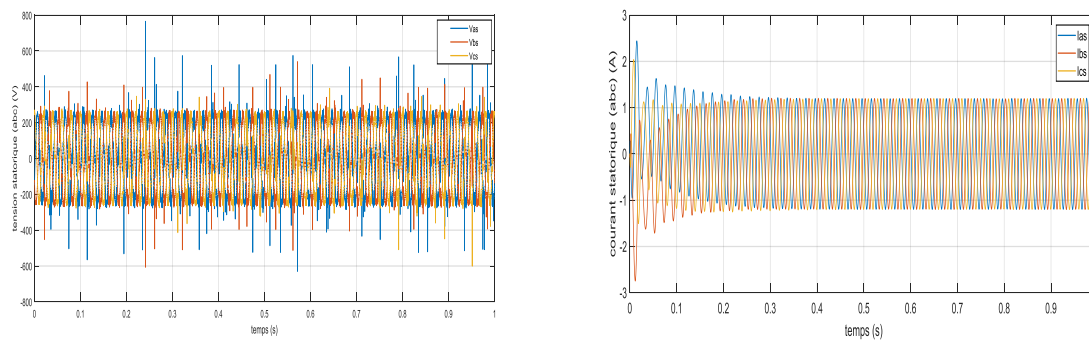
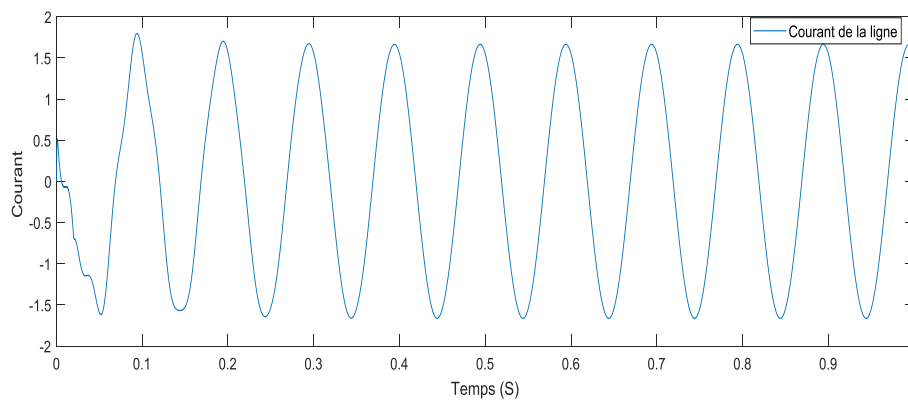


Fig.3.17 les courants et les tensions statorique



Chapitre 03 Commande et résultat de Simulation de GADA par PI et logique floue

Fig.3.18 Courant de la ligne après commande

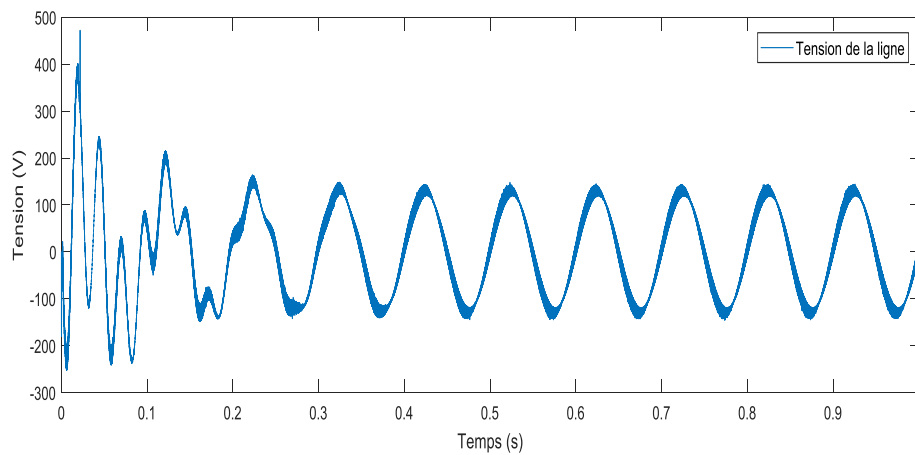


Fig.3.19 Tension de la ligne

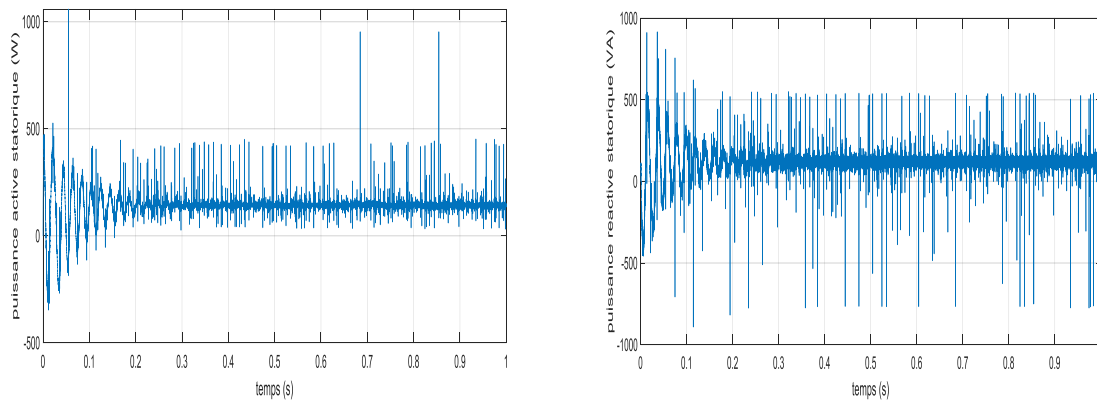


Fig.3.20 les puissances actives et réactive statorique (PI)

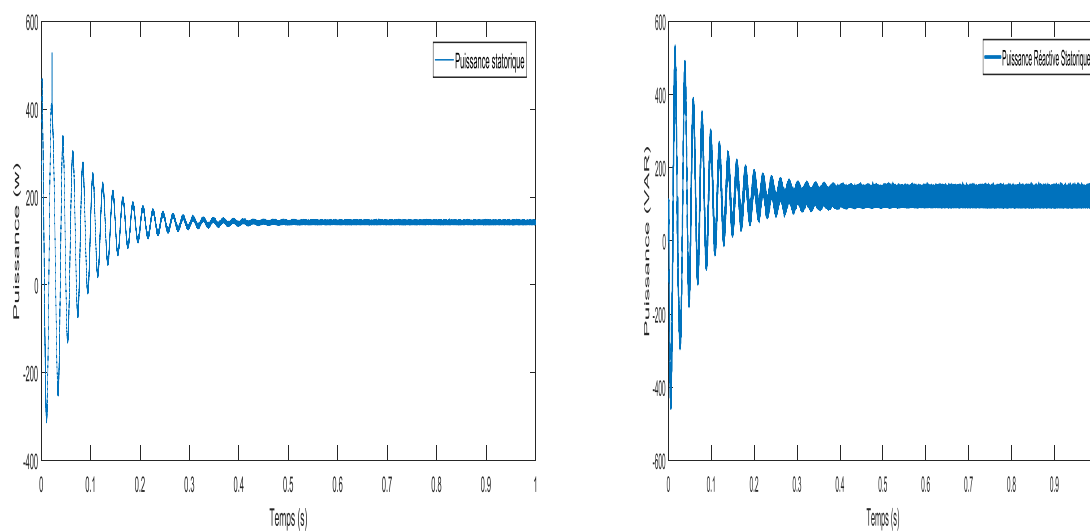


Fig.3.21 les puissances actives et réactive statorique (FLC)

Chapitre 03 Commande et résultat de Simulation de GADA par PI et logique floue

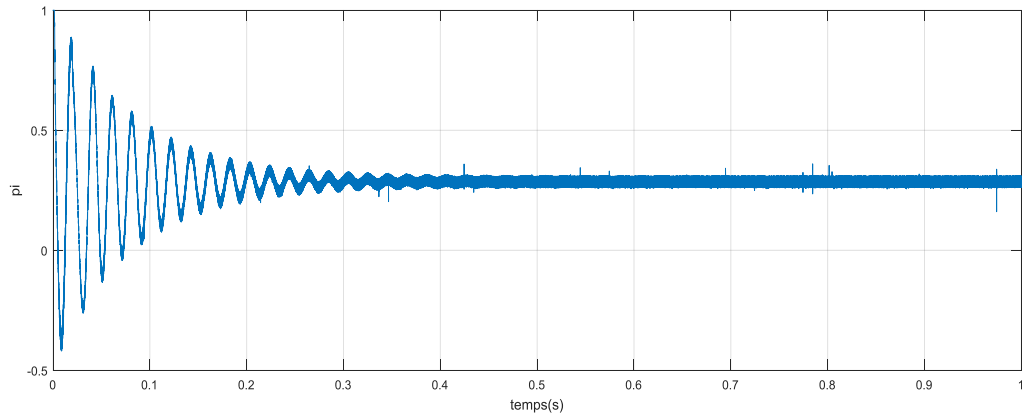


Fig.3.22 V_{dqr} (PI)

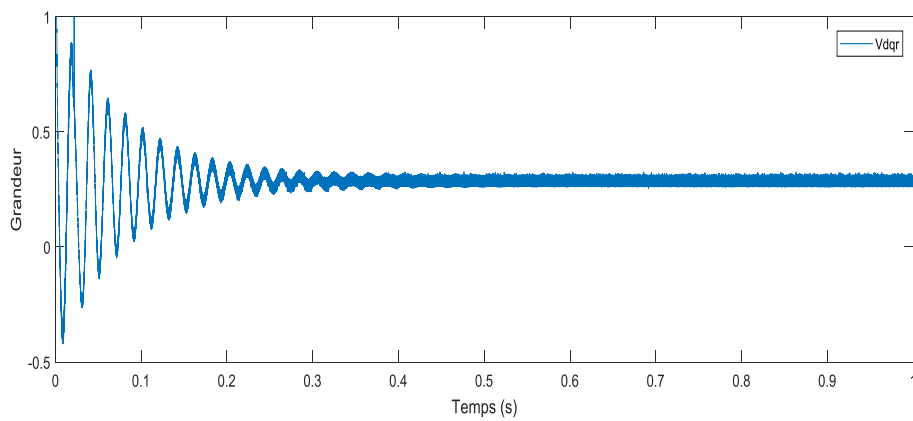


Fig.3.23 V_{dqr} (FLC)

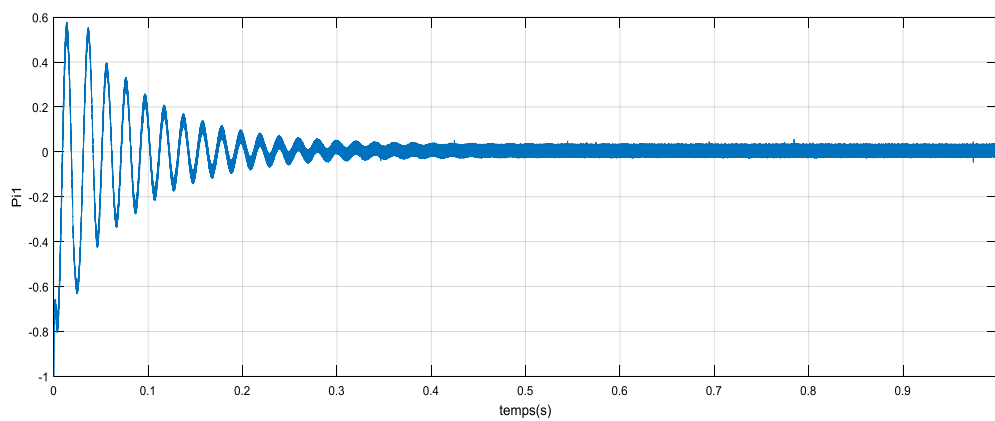


Fig.3.24 Signal de régulateur PID (PI)

Chapitre 03 Commande et résultat de Simulation de GADA par PI et logique floue

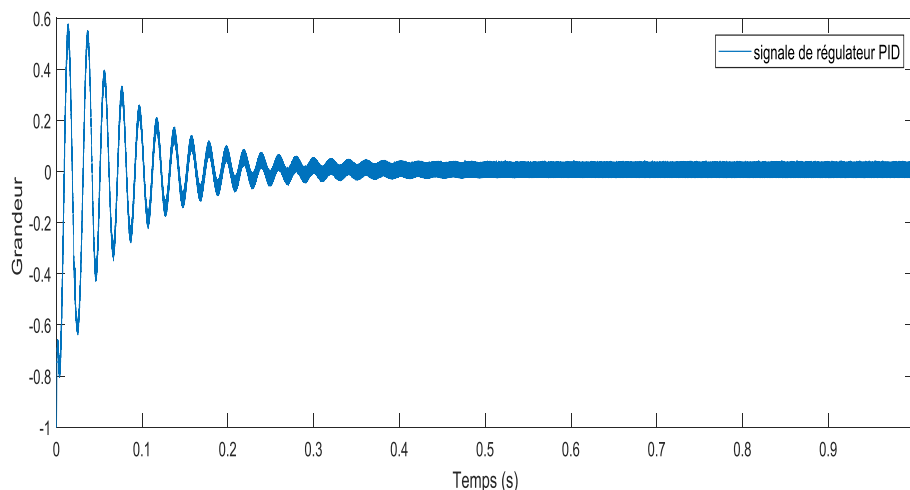


Fig.3.25 Signal de régulateur PID (FLC)

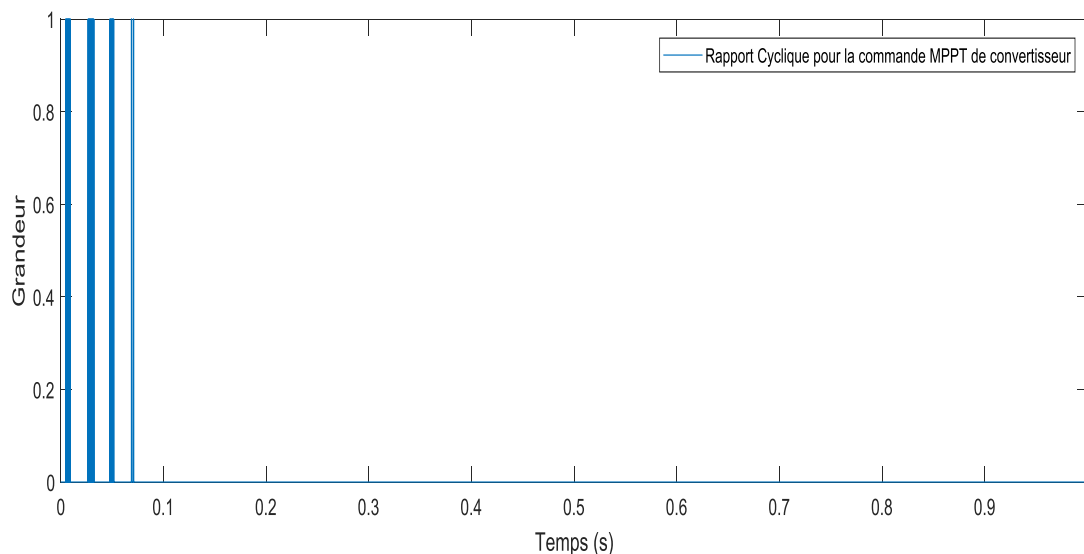


Fig.3.26 Rapport cyclique de commande MPPT floue de convertisseur

3.7 Interprétations des résultats

Tester la robustesse des stratégies de contrôle proposées et sa sensibilité aux variations paramétriques de la machine. Les résultats de la figure (3.23) montrent que le FLC est moins sensible aux variations paramétriques par rapport au PI voir figure (3.22). On peut voir que les puissances statoriques suivent toujours leurs références. Cependant, une augmentation des fluctuations de puissance, comme le montre la figure (3.22), est observée dans le cas du contrôleur PI.

D'après les résultats, le contrôleur flou a un net avantage : Moins d'oscillations aux démarrages et lors des changements de consigne. Les pics de perturbations sont beaucoup moins importants avec le FLC en particulier.

Chapitre 03 Commande et résultat de Simulation de GADA par PI et logique floue

Les figures (3.18) et (3.20) montrent la forme d'onde des courants pour le FLC. Le courant a une forme d'onde sinusoïdale, dans le circuit du stator et du rotor. Une très bonne qualité des courants sous le contrôle proposé peut également être observée.

En cas d'une anomalie du réseau, la commande peut contribuer significativement à maintenir la connexion de la machine au réseau. Toutefois, elle est malheureusement limitée par les valeurs maximales de la puissance réactive permises par la GADA. En contrepartie, des mécanismes matériels additionnels peuvent être ajoutés pour protéger la machine. L'objectif est d'assurer la continuité du service de génération, particulièrement pour les grandes génératrices. Or, l'inconvénient majeur du matériel additionnel est la complexité ajoutée au système.

Pendant le régime perturbé de la machine, la commande peut contribuer à maintenir le fonctionnement de la machine. Cependant, on constate une petite diminution de la vitesse accompagnant la période du creux de tension pour un fonctionnement à grande vitesse. Également, on remarque le transitoire des courants (rotorique et statorique) qui accompagne le creux de tension. Ces transitoires peuvent atteindre de grandes valeurs et devenir donc dangereux pour la machine et les deux convertisseurs associés. Pour cette raison, et dans ce genre de situation de creux de tension, les chercheurs s'intéressent principalement à deux aspects essentiels, la protection matérielle du système et la technique à utiliser pour limiter une consommation massive de puissance réactive par la GADA.

Chapitre 03 Commande et résultat de Simulation de GADA par PI et logique floue

Conclusion

Ce travail a été consacré à l'étude, la modélisation et la recherche de lois de commande robustes pour un système de conversion et de production d'énergie éolienne basé sur DFIG. Pour cette raison, les différentes composantes de notre système a été étudié et modélisé. Les lois de commande et les stratégies de commande, à savoir la logique floue contrôle, et le contrôle PI classique ont été conçus pour s'assurer que l'éolienne peut fonctionner sur une large plage de vitesses de vent et d'en tirer le maximum de puissance possible.

Les résultats montrent que le FLC présente une meilleure performance par rapport au PI conventionnel contrôleurs, ce qui fait du contrôleur flou un choix acceptable pour les systèmes de conversion d'énergie éolienne nécessitant un réglage précis et moins sensible aux perturbations externes et aux variations paramétriques. Le principal

L'intérêt de la commande en logique floue réside dans sa capacité à contrôler un système sans dépendre de ses paramètres.

Son efficacité est prouvée lorsque la modélisation d'un système est difficile, ce qui est le cas de notre système étudié.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire on a étudié et simulé sur Matlab Simulink un système de conversion d'énergie basé sur l'énergie du vent pour l'obtenir d'une énergie durable.

Ce système est basé sur une génératrice asynchrone à double alimentation pour la production de l'électricité commandé par un convertisseur AC-DC-AC. On commence avec une étude théorique sur les énergies éolienne et nous exposons le principe de la conversion de l'énergie du vent a une énergie mécanique après a une énergie électrique. On choisit de travailler avec la commande de régulateur PI et la commande par logique floue dans le but de commande les puissances active et réactive.

La modélisation mathématique de la MADA a été faite dans le repère d-q-o de Park. Ce qui a contribué à développer les lois de commande vectorielle à flux statorique orienté pour le CCR. La modélisation de CCG dans un repère biphasé dq en rotation synchrone a été aussi présentée.

On a commencé par la compréhension et la modélisation de la chaîne de conversion éolienne afin de maximiser son rendement énergétique assurant le MPPT. Le principe de fonctionnement de la MADA en hypo et hyper synchrone, ainsi que le principe de fonctionnement de ses convertisseurs de puissance ont été présentés en détail par la suite.

On a exprimé les modèles de ce système par une simulation à partir d'un modèle mathématique, on a présenté le modèle de la turbine de la machine asynchrone à double alimentation et les deux commandes président après on fait comparée par la commande de régulateur PI et la commande par logique floue (FLC).

On a aussi remarqué que les résultats du système complet avec la commande par logique floue donnée un bon signal par rapport au système avec la commande de régulateur PI. Alors, à partir de cette expérience on peut dire que si on augmente la logique floue on obtient une qualité des signaux meilleurs à cause de la minimisation des harmoniques.

Principalement, on peut conclure que la loi de commande par la logique floue est avantageuse en termes d'atténuation des dépassements au niveau des régimes transitoires, de robustesse et de la simplicité lors de la conception.

Ces résultats concluants peuvent être utilisés pour poursuivre les études et envisager d'autres aspects de recherche liés au bon fonctionnement de la GADA. Le présent travail nous a permis d'approfondir nos connaissances et de mesurer combien la problématique est riche en perspectives qui feront l'objet de futurs travaux. Il reste néanmoins que cette étude n'a pas davantage approfondi la problématique de connexion au réseau. Cet aspect sera la suite

Conclusion générale

évidente de nos travaux. L'intégration des GADA au réseau est un sujet vaste, particulièrement en ce qui concerne la validation expérimentale de machines de puissance de plus de quelques kW. Nous nous intéresserons à l'étude des performances de la machine vis-à-vis d'autres types de régimes perturbés et nous explorerons d'autres techniques de contrôle

Bibliographie

Bibliographie

Bibliographique

- [1] Fox, Brendan, « énergie éolienne et intégration au réseau »-2009.
- [2] www.ecosources.info
- [3] www.irena.org
- [4] <https://era.dz>
- [5] <https://energy.gov.dz>
- [6] <https://youmatter.world/fr/definitient/energies-renouvelables-definition/>
- [7] observatoire des énergies renouvelables (observ'ER)
- [8] **N.Cherfia** ,« Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens » mémoire Magister. Univ.Constantine. juin2007.
- [9] [Http://www.ewea.org](http://www.ewea.org)."Wind Energy. European Wind Energy Association"
- [10] **A.BenAmar** ,« Etude de la commande d'un système éolienne base sur une GADA ».mémoire magister. Univ Batna. Avril 2016.
- [11]:**H. Bachir, B. Mohammed** « étude d'une centrale photovoltaïque alimente un réseau intelligent » . Mémoire de master uni-ADRAR 06-2018.
- [12]:**S. Mokran** « Modélisation et Commande d'un aérogénérateur à machine Asynchrone à Double Alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération ». Mémoire de exigence partielle de la maîtrise en Ingénierie, univ- Québec en Abitibi-Temiscamingue, Aout 2013.
- [13] **J. Martain**, « Energie éolienne », Technique de l'ingénieur, Vol. B1360, 1990, rapport ECRIN, 2002.
- [14] **A. Miloud, A. Lyes** ,« Etude et maximisation d'un système éolien » Mémoire de fin d'études Master, Université Abderrahmane MIRA de Bejaïa 2013
- [15] **A. Abdelli**, « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive », thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, France, 2007.
- [16] **A. rabah, A. Rezki**, «Modélisation et Commande d'un Aérogénérateur Synchrones à Aimants Permanents à Attaque Directe » ,Mémoire de fin d'études Master Académique, Université Mouloud MAMMERI de Tizi Ouzou , 2013.
- [17]**C.benoudjit** ,« étude pour a conception d'un banc d'essais pour énergie Renouvelable », Mémoire magister juin 2004.
- [18] **M.A HASSAD**, « Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques », Mémoire de Magister, université Sétif 1 (Algérie).2012.

Bibliographie

- [19] **N.Cherfia** ,« Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens »,mémoire Magister. Univ.Constantine. juin2007.
- [20] **M.K.Touati**, « Étude D'une Génératrice Éolienne Connectée Au Réseau Électrique », mémoire magister. Univ Batna. Janvier 2015
- [21] **E.Elmodjebber**, « modélisation et commande de la MADA dans l'utilisation dans la production dans l'énergie éolienne », mémoire Master. Univ. Sidi Mohammed Ben Abdellah. Juin 2013
- [22] **M. Machmoum, F. Poitiers, C. Darengosse, A. Queric** « Dynamic performances of a doubly-fed induction machine for a variable-speed wind energy generation power System Technology», Proceedings International Power Conference 2002. Vol. 4, pp. 2431-2436, 13-17. Oct. 2002.
- [23] **E. Muljadi, C. P. Butterfield**, « Pitch-controlled variable-speed wind turbine generationI»,EEE Trans. Ind. Applicat., vol. 37, pp. 240-246, Jan./Feb. 2001.
- [24] **N.Mekkaoui** « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée »,Mémoire de Magister, l'université de Batna, 2004.
- [25] **A. MIRECKI**, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse Doctorat .Institut Nationale Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [26] **Mr. REGUIG Bilal**, « Modélisation et commande floue d'une génératrice asynchrone à double alimentation (Application à l'énergie éolienne) » ,mémoire de fin d'étude, univ Mohamed Boudiaf, M'sila
- [24] **T. Belkacem** « Modélisation et Commande Floue optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation , Application à système eolienne à vitesse variable » ; Mémoire de Magister, l'université de Batna 2010.
- [27] **M. Lopez**, « contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée »; Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud 11, France,2007.
- [28] **D.H. Tran**, « Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne passive : Analyse de robustesse, validation expérimentale»; Thèse de Doctorat, Institut NationalPolytechnique de Toulouse, France, Septembre 2010.
- [29] **T. Ghennam**, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des

Bibliographie

- éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation »; Thèse de Doctorat de l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, Algérie, Septembre 2011.
- [30] **T.Douadi**, « Etude et commande d'un système éolien à base d'une génératrice asynchrone », Mémoire de Magistère, Université de Batna.
 - [31] **R.Azaizia**, « Etude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation alimentée par un convertisseur multiniveaux », Mémoire de magistère, Université de Boumerdes, 2008.
 - [32] **S. Goudjil**, « Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation » mémoire d'ingénieur d'état, Université de Bejaia 2007.
 - [33] **R.Yacine , T. Mouloud** « Etude de l'association d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) et d'un convertisseur multiniveaux »; Mémoire de Fin d'Etudes, universite Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou,2014
 - [34] **A. Moualdia**, « Stratégies de Commande DTC-SVM et DPC appliquées à une MADA utilisée pour la production d'énergie éolienne »; Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Juin 2014.
 - [35] **P. Costa**, « L'extraction et la conversion de l'énergie éolienne : l'optimisation à la vitesse variable de générateurs et non de contrôle linéaire floue », institut polytechnique de Viana Castelo, Avenida do Atlântico, 4900 Viana do Castelo, Portugal.
 - [36] **C. Nichita, M. Druga**, projet de coopération scientifique interuniversitaire (PCSI), financé par l'agence universitaire de la Francophonie (AUF), groupe de recherche en Electrotechnique et Automatique de l'université du Havre, France.
 - [37] **M. Billel**, « Contribution à l'amélioration des performances d'une chaîne énergétique éolienne », Thèse de Doctorat de l'Université de Badji Mokhtar Annaba, 2015.
 - [38] **R. M. Hilloowala and A. M. Sharaf**, "A rule-based fuzzy logic controller for a PWM inverter in a stand alone wind energy conversion scheme," Industry Applications,IEEE Transactions on, vol. 32, pp. 57-65, 1996.
 - [39] **N. Martaj and M. Mokhtari**, "Contrôle par logique floue," in MATLAB R2009,SIMULINK et STATEFLOW pour Ingénieurs, Chercheurs et Etudiants, ed: Springer,2010, pp. 747-805.
 - [40] **A. Ibrahim**, «Fuzzy logic for embedded systems applications» Access Online Via Elsevier, 2003.
 - [41] **B. Boualem and F. Piriou**, «Modelling of induction motor accounting for skewed slots effects», in Proc. ICEM'94, 1994, pp. 699-704.

Bibliographie

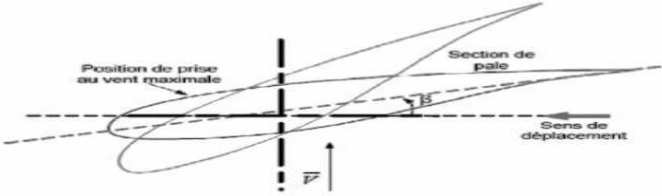
- [42] **H. Chaoui**, « Commande adaptative se systèmes à dynamique complexe basée sur l'intelligence artificielle» , 2013.
- [43] **E. izgi, A. Oztopal, B. Yerli, M. K. Kaymak, and A. D. ~ahin**, «Short-mid-term solar power prediction by using artificial neural networks» , Solar Energy, vol. 86, pp. 725-733 , 21/2012.
- [44] **L. Baghli**, « Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de lalogique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques, » Université Henri Poincaré-Nancy **1**, 1999.
- [45] **Salma. El Aimani**, « Modélisation de différentes technologies d'éolienne Intégrées dans un réseau de moyenne tension ». Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille, Décembre 2004.
- [46] **Bélangier, Melanie** «Commande de l'orientation d'un satellite basée sur la logique floue» M.Sc.A., Université de Sherbrooke (Canada). 2005.
- [47] **Renny M. Roy1, Indu M. G** « FPGA Based Motor Control System Using PID Controller and Sigma-Delta ADC » International Journal of Science and Research (IJSR) ISSN (Online): 2319-7064 Index Copernicus Value (2013): 6.14 | Impact Factor (2013): 4.438
- [48] **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.
- [49] **Dobritoiu, Manue la Carmen** «Stabilisateur de réseaux électriques à base de logique floue» M.Sc.A., École Polytechnique, Montréal (Canada). 2003.
- [50] **Yen, John, Reza Langari, Lotfi Asker Zadehet IEEE Neural Networks Council.** « Industrial applications of fuzzy logic and intelligent Systems». New York.1995.
- [51] **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.
- [52] **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

Bibliographie

- [53] **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.
- [54] **M. TA CAO** «Commande numérique de machine asynchrone par logique floue » Université Laval, Ph.D, 1997.
- [55] **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

ANNEXE A

régulation de puissance	Les technique
Régulation mécanique	<p>➤ Système à décrochage aérodynamique "stall"</p> <p>Le comportement aérodynamique des pales évolue également d'une manière passive selon le rapport entre la vitesse de rotation de la turbine et la vitesse du vent. En effet les pales peuvent être conçues de façon à ce qu'à partir d'une certaine vitesse de vent, la turbulence provoquée par le profil des pales entraîne un décrochage aérodynamique et par suite une décroissance du couple capté par chacune des pales. Ce décrochage dépend notamment de l'angle de calage des pales. Les pales sont fabriquées avec un pas variant suivant la position le long de la pale, permettant ainsi le décrochage aérodynamique qui se produit progressivement d'abord près du rayon moyeu puis de plus en plus près de bout de la pale [24]. Ce genre de contrôle passif de la puissance captée par les pales est appelé (stall-régulation) ou (régulation par décrochage aérodynamique).</p> <p>➤ Système d'orientation des pales "pitch"</p> <p>Ce système de régulation par variation de l'angle de calage «β» qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone III de vitesses. C'est la régulation par mise en drapeaux, soit augmenter l'angle de calage, ce qui diminue l'angle d'incidence. Ce système permet également de freiner la turbine si nécessaire [24].</p> <div style="text-align: center;">  <p>Variation de l'angle de calage d'une pale</p> </div>
Régulation électrique	<p>Régulateur « MPPT »</p> <p>Ce régulateur est actuellement la meilleure solution. Il contient un microprocesseur et un convertisseur de tension à très faible perte qui permet de tirer toute l'énergie du éolienne . Ainsi, aussi long temps que la batterie n'est pas plein, toute l'énergie que peut produire le générateur est injectée dans la batterie. Ce type de régulateur est encore</p>

ANNEXE

	peu répandu en plaisance, bien que très ancien (datant des années 1960) car son prix était élevé avant la miniaturisation des composants qui a fortement influé le prix de revient du produit. Il n'a pratiquement pas d'autres inconvénients que son prix certes plus élevé qu'un banal régulateur moins sophistiqué. Bien entendu il en existe de plus ou moins performants selon les marques et les modèles. [25]
--	--

Tableau 2.1 différent technique de régulation de puissance

ANNEXE B

les paramètres de chaîne de conversion

Les caractéristiques électriques du générateur GADA

Grandeurs	Valeur
Puissance apparente nominal	800 VA
La tension nominal	320 Vrms
La fréquence nominal	50 Hz
La vitesse nominal	1500 tr/min
Résistance de stator	9.7 Ω
L'inductance de stator	0.048 H
Résistance de rotor	10.7 Ω
L'inductance de rotor	0.090 H
Mutuelle inductance	0.70 H
N pole de pair	2

Les caractéristiques électriques du réseau

Grandeur	valeur
Tension	400 v
Fréquence	50 Hz

Les données de la commande GADA

Les données	valeurs
Xss	0.1196

ANNEXE

Xh	2.44
Xs r	0.2209
Xs	2.5596
Xr	2.6609
Rr	0.0832 Ω
Rs	0.0756 Ω
Ps-ref	-0.6
Qs-ref	-0.1