



Thèse

POUR OBTENIR LE DIPLOME DE

Doctorat 3^{ème} Cycle

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Energies Renouvelables

Thème :

Développement des techniques de commande et d'optimisation d'un système de génération éolien à base de génératrice double alimentée

Présenté Par :

Kaddache Mouna

Thèse soutenue le 19/06/2024 devant le jury composé de :

N°	Nom et prénom	Grade	Etablissement	Qualité
01	Dib Abderrahmane	Prof.	Université Oum El Bouaghi	Président
02	Drid Said	Prof.	Université Batna 2	Rapporteur
03	Rahem Djamel	Prof.	Université Oum El Bouaghi	Co-rapporteur
04	Azoui Boubaker	Prof.	Université Batna 2	Examineur
05	Sakri Djamel	MCA	Université Oum El Bouaghi	Examineur

Remerciements

Louange et glorification à dieu, le tout puissant, qui m'a donné la foi, le courage et la patience de parvenir à finir ce modeste travail

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde reconnaissance, mes vifs remerciements pour mon directeur de thèse Monsieur **DRID SAID** professeur de l'enseignement supérieur au département d'électrotechnique de l'Université de Batna 2, qui a consacré à l'encadrement de ma thèse un temps et une disponibilité d'esprit considérables. Son rôle, ses critiques constructives, ses précieux conseils et ses propositions m'ont permis de mener à bien cette thèse et toujours d'aller de l'avant. J'ai ainsi largement pu profiter de sa grande acuité scientifique. Je lui suis donc redevable d'avoir pu faire une thèse dans des conditions exceptionnelles.

J'adresse mes plus vifs remerciements au co-directeur de ma thèse Monsieur **Rahem Djamel** professeur à l'université d'Oum El-Bouaghi, pour ses conseils et encouragements régulier, sa bienveillance, sa gentillesse, et sa qualité scientifique et humanitaire a toujours été une source de motivation.

Je remercie aussi monsieur **Larbi Chrifi-Alaoui**, maitre de conférence à l'université de Picardie Jules Verne à l'IUT de l'Aisne, Cuffies-Soisson, France, de m'avoir fait profité de ses grandes qualités d'Automaticien et pour ses qualités humaines pleines de respect et de gentillesse qui ont été pour moi une source de motivation et d'exemplarité. Qu'il soit remercié aussi pour sa grande disponibilité et pour les moyens matériels qu'il a mis à ma disposition afin que je puisse accomplir mon travail dans de bonnes conditions.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à **M^r Abderrahmane Khemis**, pour son disponibilité sans faille, pour son encouragement et son soutien moral durant l'élaboration de ce travail.

Je remercie vivement les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer cette modeste thèse :

Je remercie Monsieur **Dib Abderrahmane**, Professeur à l'université Oum El Bouaghi pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ma thèse.

Mes remerciements vont de même aux autres membres de jury examinateurs qui m'ont fait l'honneur de participer au jury de ma thèse. Il s'agit, en l'occurrence de :

Mr Azoui Boubaker Professeur, à l'Université Batna 2

Mr Sakri Djamel Professeur, à l'Université Oum El Bouaghi

Je tiens par ailleurs à remercier vivement toute personne m'ayant aidé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail en particulier.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents, que dieu les garde et les protège pour leurs soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

A mon marie Abderrahim, et ma petite fille Djana

A mes frères Karim et Idris

A mes sœurs Wahiba, Imen, Khawla, Rahma

Aux chers amis Widad, Bouthayna, Farouk

Kaddache Mouna

RESUME

Cette thèse présente de nouvelles méthodes MPPT pour l'optimisation du transfert de puissance dans les systèmes éoliens. Dans ce contexte, nous avons présenté une nouvelle méthode MPPT pour surveiller le point de puissance maximale. Cette méthode utilise la logique floue de type 2 afin d'améliorer les performances de contrôle de réguler la puissance active et réactive générée par le stator et de garantir un contrôle fiable du générateur à induction à double alimentation (GADA) connecté au réseau. Étant donné les caractéristiques aérodynamiques des éoliennes, il est essentiel de suivre le point de puissance maximale (MPPT) afin d'obtenir un rendement de conversion élevé. Cela implique que la vitesse de rotation de l'éolienne doit être ajustée en temps réel afin de capter autant d'énergie éolienne que possible. Afin d'atteindre cet objectif, on associe l'approche de Lyapunov à un contrôle par mode glissant pour obtenir une stabilité asymptotique globale et une résistance aux variations paramétriques. Afin de confirmer la validité de notre approche proposée, nous avons comparé les résultats de simulation entre la logique floue de type 2 avec la logique floue de type 1 et les P&O proposés dans la littérature.

ملخص

في هذه الأطروحة، تم اقتراح تقنيات MPPT جديدة لتعزيز نقل الطاقة في أنظمة طاقة الرياح. في هذا السياق، اقترحنا MPPT الجديد لمراقبة نقطة الطاقة القصوى التي تستخدم المنطق الغامض من النوع 2 لتحسين أداء التحكم، وتنظيم الطاقة النشطة والمتفاعلة التي طورها الجزء الثابت وتمكين التحكم الموثوق في المولد عند الحث المزدوج التغذية (DFIG) متصل بالشبكة. نظرًا للخصائص الديناميكية الهوائية لتوربينات الرياح، فإن تحقيق كفاءة عالية لتحويل طاقة الرياح يتطلب أقصى تتبع لنقطة الطاقة MPPT، مما يشير إلى أنه يجب تعديل سرعة دوران توربينات الرياح في الوقت الفعلي لالتقاط أكبر قدر ممكن من طاقة الرياح. ولتحقيق هذا الهدف، يقترح نهج لياونوف بالتحكم في الوضع المنزلق لتوفير الاستقرار المقارب العالمي والمرونة ضد التقلبات البارامترية. لتأكيد صحة التقنية المقترحة، قمنا بمقارنة نتائج المحاكاة بين المنطق الغامض من النوع 2 مع المنطق الغامض من النوع 1 و P&O المقترحة في الأدبيات .

Abstract

In this thesis, new MPPT techniques have been proposed to maximize power transfer in wind power systems. In this context, we have proposed our new MPPT technique for maximum power point monitoring that uses type-2 fuzzy logic to improve control performance, regulate the active and reactive power developed by the stator and enable reliable control of the grid-connected dual-fed induction generator (DFIG). Due to the aerodynamic characteristics of wind turbines, achieving high wind energy conversion efficiency requires Maximum Power Point Tracking (MPPT), which means that the turbine's rotation speed must be adjusted in real time to capture as much wind energy as possible. To achieve this, the Lyapunov approach is coupled with sliding mode control to provide global asymptotic stability and resistance to parametric fluctuations. To confirm the validity of our proposed approach, we have compared simulation results between type-2 fuzzy logic and type-1 fuzzy logic and P&O proposed in the literature.

Table des Matières

✚ Remerciements	
✚ Dédicaces	
✚ Résumé	
✚ Sommaire	
✚ Index des notations	
✚ Liste des figures	
✚ Liste des tableaux	
Introduction Générale	1

CHAPITRE I: Commande à flux rotorique Orienté de la Machine Asynchrone

INTRODUCTION.....	4
I.1 ENERGIE EOLIENNE.....	4
I.2 ENERGIE EOLIENNE EN CHIFFRE.....	6
I.2.1 Energie éolienne dans le monde.....	6
I.2.2 Perspectives du marché de l'énergie éolienne – 2022 à 2027.....	7
I.2.3 Potentiel éolien en Algérie.....	8
I.3 TYPES D'EOLIENNE.....	10
I.3.1 Eoliennes à axe vertical (VAWT).....	10
I.3.2 Eoliennes à axe horizontal (HAWT).....	11
I.3.3 Architecture d'une éolienne (HAWT).....	12
I.3.4 Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne à axe horizontal.....	16
I.4 TECHNOLOGIE DES EOLIENNES.....	16
I.4.1 Eoliennes à vitesse fixe.....	16
I.4.2 Eoliennes à vitesse variable.....	18
I.5 TOPOLOGIE DES EOLIENNES A VITESSE VARIABLE.....	20
I.5.1 Système utilisant une génératrice synchrone.....	20
I.5.2 Système utilisant une génératrice asynchrone.....	21
I.5.3 Système utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation.....	22
I.5.3.1 Structure de la GADA	22
I.5.3.2 Mode de fonctionnement.....	23
I.5.3.3 Avantages et inconvénients de la GADA.....	25
I.6 CONVERSION D'ENERGIE CINETIQUE DU VENT EN ENERGIE MECANIQUE.....	25

I.6.1 Le Vent.....	25
I.7 Conclusion.....	27

CHAPITRE II : Modélisation et commande d'un système éolien à base de GADA

INTRODUCTION	28
II.1 MODELISATION DE LA TURBINE EOLIENNE.....	29
II.1.1 Modèle de la turbine.....	29
II.1.2 Modèle du multiplicateur.....	31
II.1.3 Modèle de la partie mécanique.....	31
II.2 MODELISATION DE LA GENERATRICE DOUBLE ALIMENTEE.....	33
II.2.1 Hypotheses simplificatrices.....	33
II.2.2 Equation mathématique de la GADA dans le repère (a, b, c)	34
II.2.3 Transformation de park.....	35
II.3 MODELE DE LA GADA AVEC ORIENTATION FLUX STATORIQUE.....	37
II.3.1 Commande Directe des Puissances Active et Réactive.....	42
II.3.2 Résultats de simulation.....	43
II.4 COMMANDE INDIRECTE DES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE.....	44
II.4.1 Commande indirecte sans boucle de puissance.....	44
II.4.2 Résultats de simulation.....	45
II.4.3 Commande indirecte avec boucle de puissance.....	46
II.4.4 Résultats de simulation.....	47
II.5 LA COMMANDE ROBUSTE BASEE SUR LA THEORIE DE LYAPUNOV DE LA GADA.....	48
II.5.1 La commande robuste.....	50
II.5.2 Résultats de simulation.....	52
II.6 CONCLUSION.....	52

CHAPITRE III : Architecture et méthodes de recherche du point maximum de puissance

INTRODUCTION.....	54
III.1 STRATEGIE DE MAXIMISATION DE LA TURBINE EOLIENNE.....	54
III.1.1 Commande MPPT avec asservissement de la vitesse.....	55
III.1.2 Commande MPPT sans asservissement de la vitesse.....	57
III.1.3 Le contrôle TSR.....	59
III.1.4 Le contrôle optimal torque (OT).....	59

III.1.5	Le contrôle PSF.....	60
III.1.6	Le contrôle HCS.....	60
III.2	MODELE MATHEMATIQUE DU CONVERTISSEUR BIDIRECTIONNEL.....	61
III.2.1	Contrôle du convertisseur coté générateur.....	62
III.3	MODELE MATHEMATIQUE DU CONVERTISSEUR COTE RESEAU.....	64
III.3.1	Contrôle du convertisseur côté réseau.....	64
III.3.2	Contrôle du bus continu.....	64
III.4	PERTURBATION ET OBSERVATION (P&O).....	65
III.5	METHODES BASEES SUR LA LOGIQUE FLOUE.....	66
III.5.1	Théories des ensembles flous type-1.....	66
III.6	RESULTATS DE SIMULATION.....	70
III.7	Conclusion.....	71

CHAPITRE IV : Application de la logique floue type-2 dans la poursuite du point de puissance maximum

INTRODUCTION.....	72
IV.1 THEORIES DES ENSEMBLES FLOUS TYPE-2.....	73
IV.2 TERMINOLOGIE DE LA LOGIQUE FLOUE TYPE-2.....	73
IV.2.1 Systèmes flous type-2.....	78
IV.2.2 MPPT par la logique floue type-2.....	79
IV.3 NOUVELLE MPPT.....	81
IV.3.1 Resultats de simulasion.....	83
IV.4 MPPT PAR LA LOGIQUE FLOUE TYPE-1.....	84
IV.5 ÉTUDE COMPARATIVE AVEC L'ALGORITHME FLOU DE TYPE 1 ET P&O.....	86
IV.5.1 Résultats de simulations.....	86
IV.5 Conclusion.....	87
CONCLUSION GENERALE.....	88

ANNEXE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

NOTATIONS ET SYMBOLES

Turbine:

P_v	: Puissance cinétique du vent
P_{aero}	: Puissance aérodynamique
P_n	: Puissance nominale
S_t	: Surface balayée par les pales
R_t	: Longueur de la pale de la turbine
ρ	: Densité de la masse d'air
λ	: Le rapport de vitesse de pointe
λ_{opt}	: Valeur optimale du ratio de vitesse
V_n	: Vitesse nominale
V_M	: Vitesse maximale autorisée par l'éolienne
V_{t_est}	: Vitesse du vent estimée
C_{em}	: Couple électromagnétique
C_{aero}	: Couple aérodynamique
C_{mec}	: Couple mécanique de la turbine
C_{vis}	: Couple de frottement visqueux
C_r	: Couple résistant
Ω_{mec}	: Vitesse mécanique angulaire

Ω_t	: Vitesse de rotation de la turbine
f	: Coefficient de frottement visqueux
J	: Inertie total
J_t, J_g	: Inertie de la turbine et de la génératrice
β	: Pitch angle « Angle de l'orientation de pale »

Génératrice asynchrone à double alimentation :

d, q	: Indices des composantes orthogonales directe et en quadrature
R_s, R_r	: Résistance d'enroulement statorique, rotorique
L_s, L_r	: Inductance cyclique propre statorique, rotorique
T_s, T_r	: Constant de temps du stator et du rotor
Ω	: Vitesse du rotor
θ_s, θ_r	: Angle du stator et du rotor
σ	: Coefficient de dispersion
p	: Constante de Laplace
$I_{sd}, I_{sq}, I_{rd}, I_{rq}$: Courants statoriques et rotoriques dans le repère (dq)
$\phi_{sd}, \phi_{sq}, \phi_{rd}, \phi_{rq}$: Flux statoriques et rotoriques dans le repère (dq)
K_p	: Gain proportionnel
M	: Inductance mutuelle
$[P]$: Matrice de transformation de Park
p	: Nombre de paires de pôle
P_r, Q_r	: Puissance active et réactive rotorique

P_s, Q_s	: Puissance active et réactive statorique
ω_s, ω_r	: Pulsation du stator et du rotor
g	: Glissement de la machine asynchrone
CC (DC)	: Courant continue
CA (AC)	: Courant alternative
GADA	: Générateur asynchrone double alimentée
MPPT	: Suivi du point maximum de puissance
PI	: Régulateur proportionnel intégral
CCM	: Convertisseur coté machine
CCR	: Convertisseur coté réseau
FSC	: Fuzzy système contrôler
\bar{x}^*	: Complexe conjugué

Table des tableaux

TAB. I-1: CLASSIFICATION DES EOLIENNES PAR PUISSANCE.....	5
TAB. IV-1: TABLEAU DES REGLES DU FLOU.....	85

Table des figures

Fig.I.1:	Transduction de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.....	5
Fig.I.2:	La relation entre la taille-puissance des éoliennes.....	5
Fig.I.3:	Nouvelles installations GW	6
Fig.I.4:	Statistiques fin 2022 de gwec pour la nouvelle capacité d'énergie éolienne.....	7
Fig.I.5:	Perspectives des nouvelles installations 2023-2027 (GW).....	7
Fig.I.6:	Perspectives de nouvelles installations par région (mw et %, onshore et offshore)..	8
Fig.I.7:	Carte annuelle des vents à une distance de 10 mètres du sol (m/s).....	9
Fig.I.8:	Turbines à axe vertical (VAWT)	10
Fig.I.9:	Turbines à axe horizontal (HAWT)	11
Fig.I.10:	Éoliennes en amont et en aval.....	12
Fig.I.11:	Modèle de turbine éolienne de grande puissance.....	13
Fig.I.12:	Les composants électroniques de la tour éolienne.....	13
Fig.I.13:	Aspect aérien de la nacelle.....	14
Fig.I.14:	L'éolienne à vitesse fixe est connectée directement au réseau électrique	17
Fig.I.15:	Système éolien à vitesse variable connecté au réseau via GADA.....	18
Fig.I.16:	Système éolien à vitesse variable raccordé au réseau via MSAP.....	18
Fig.I.17:	La puissance potentielle théorique disponible pour une turbine éolienne.....	20
Fig.I.18:	Éolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone.....	21
Fig.I.19:	Éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone.....	21
Fig.I.20:	Éolienne à vitesse variable basée sur une GADA.....	22
Fig.I.21:	Les contacts rotoriques et la structure du stator de la gada.....	23
Fig.I.22:	Les modes opérationnels caractéristiques de GADA.....	23
Fig.I.23:	Plage de vitesse de la gada contrôlée par le rotor.....	24
Fig.I.24:	Synoptique de reconstruction du vent.....	26
Fig.I.25:	Profil du vent.....	27

Fig.II.1: Systeme de conversion d'energie eolienne.....	28
Fig.II.2: Illustration d'une eolienne.....	29
Fig. II.3: Les variations de l'angle de calage des pales et de la vitesse de la turbine en fonction du coefficient de puissance.....	30
Fig. II.4: Schema fonctionnel de la turbine eolienne.....	31
Fig. II.5: Schema de principe du modele de l'arbre mecanique.....	32
Fig. II.6: Schema fonctionnel de l'ensemble du modele d'eolienne.....	32
Fig. II.7: Modele de la generatrice double alimentee.....	34
Fig. II.8: Systemes d'axes dans l'espace electrique en forme angulaire.....	35
Fig. II.9: Principe du controle vectoriel.....	38
Fig. II.10: Schema fonctionnel du gada simplifie.....	41
Fig. II.11: Schema de commande directe de la puissance active et reactive.....	42
Fig. II.12: Allures des : a) puissance active du stator, b) puissance reactive du stator, c) courant du stator, d) courant du rotor, e) vitesse de rotation, f) couple electromagnetique.	43
Fig. II.13: Schema de commande indirecte sans boucle de puissance.....	45
Fig. II.14: Allures de : a) puissance active du stator, b) puissance reactive du stator, c) courant du stator, d) courant du rotor, f) couple electromagnetique.....	45
Fig.II15: Schema de commande indirecte avec boucle de puissance.....	46
Fig.II.16: Allures de : a) puissance active du stator, b) puissance reactive du stator, c) courant du stator, d) courant du rotor, f) couple electromagnetique.....	47
Fig.II.17: Diagrammes de conception de controleurs robustes.....	51
Fig.II.18: Allures des grandeurs a controler a) resistance statorique, b) resistance rotorique c) puissance active statorique, d) puissance reactive statorique.....	52
Fig.III.1 Zones de fonctionnement des turbines a vitesse variable.....	54
Fig.III.2 : Commande avec asservissement de la vitesse.....	56
Fig.III.3: Commande sans asservissement de la vitesse.....	58
Fig.III.4 : Schema fonctionnel d'un systeme eolien a controle TSR.....	59

Fig.III.5: Schema fonctionnel d'un systeme eolien a controle PSF.....	60
Fig.III.6 : Schema fonctionnel d'un systeme eolien a controle HCS.....	61
Fig.III.7: Configuration du convertisseur cote machine (CCM).....	62
Fig.III.8 : Bus continu relie les deux convertisseurs statique.....	64
Fig.III.9 : Schema bloc du bus continu.....	65
Fig.III.10 : Algorithme perturbation et observation (P&O).....	66
Fig.III.11:Diagramme de fonctionnement d'un controleur flou.....	67
Fig.III.12 : Allures des grandeurs a controler a) vitesse du vent, b) puissance active statorique, c)vitesse de rotation, d) coefficient de puissance.....	70
Fig. IV-1 : Systeme de controle du GADA.....	72
Fig. IV-2 : Fonction d'appartenance triangulaire d'un ensemble flou type 2, representation bidimensionnelle.....	74
Fig.IV-3 : Fonction d'appartenance trapezoïdale d'un ensemble flou type 2, representation trois dimensions.....	74
Fig. IV-4 : Tranche verticale pour $x'=5$	75
Fig. IV-5 : Schemas d'un ensemble flou type-2.....	76
Fig.IV-6 : Un ensemble flou type-2 de forme triangulaire.....	77
Fig. IV-7 : Vue d'ensemble flou type-2.....	77
Fig.IV-8 : Sschema de systeme flou type 2.....	78
Fig. IV-9 : La sortie d'un systeme flou type-2.....	79
Fig.IV-10 : Controleur flou type-2 propose.....	80
Fig. IV-11 : Fonctions d'appartenance floues type 2 de la variation de :la puissance, (b) lavitesse de rotation et (c) la vitesse de rotation de référence.....	81
Fig.IV-12 : Nouvelle MPPT.....	81
Fig. IV-13 : Rapport vitesse-pointe λ avec differents coefficient C_p	85
Fig. IV-14 : Profile du vent.....	83
Fig. IV-15 : Puissance active statorique.....	83

Fig. IV-16 : Vitesse de la turbine.....	83
Fig. IV-17 : Coefficient de puissance C_p	83
Fig. IV-18 : Contrôleur flou type-1 proposé.....	84
Fig. IV-19 : Les fonctions d'appartenance de la variation des flux.....	86
Fig. IV-20 : Profil du vent... ..	87
Fig. IV-21 : Puissance active statorique.....	87
Fig. IV-22 : Coefficient de puissance	87
Fig. IV-23 : Vitesse de la turbine.....	87

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Les technologies telles que les piles à combustible, l'énergie solaire, l'énergie éolienne et d'autres sources d'énergie renouvelable connaissent un développement rapide en raison des impacts environnementaux de la production d'énergie à partir de sources non renouvelables.

L'augmentation du coût des matières premières fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel) peut également expliquer le développement et la multiplication des utilisations des énergies renouvelables par les problèmes de l'épuisement des réserves et par l'augmentation des besoins en électricité, [1],[2]. Les sources d'énergie les plus importantes sont l'énergie éolienne et l'énergie solaire, elles présentent des avantages tels que la gratuité et la propreté.

Cependant, le coût d'installation de l'énergie éolienne est moins couteau que celle de l'énergie solaire, [3],[4]. L'inconvénient majeur des systèmes d'énergie éolienne est leur disponibilité imprévisible qui nécessite le recours à d'autres sources d'énergie.

Le système éolien capte et convertit l'énergie éolienne en énergie électrique. Malgré son abondance, l'énergie éolienne varie quotidiennement en fonction de la vitesse du vent peu importe le type de générateur utilisé. La production d'énergie par un système de conversion de l'énergie éolienne est influencée par la précision avec laquelle le contrôleur de suivi du point de puissance maximale est régulé.

Depuis les années 1980, la technologie MPPT a fait l'objet de recherches dans le domaine de l'énergie solaire, puis a été appliquée à l'énergie éolienne.

En général, l'algorithme du rapport de vitesse maximale (TSR), la recherche en montée de côte (HCS)/ perturber et observer (P&O), et l'algorithme du couple optimal (OT)/ retour de signal de puissance (PSF) constituent les quatre principales catégories de ces algorithmes fréquemment utilisés de nos jours.

Il est essentiel de saisir l'importance de concevoir une méthodologie exacte pour suivre le MPPT dans un cas donné, car chaque technique MPPT présente des avantages et des inconvénients qui lui sont propres. C'est pourquoi, cette étude examine une variété d'algorithmes qui peuvent être appliqués afin d'optimiser les performances du point de puissance maximale du système d'énergie éolienne.

La logique floue et l'outil conventionnel "Perturber et Observer" sont tous deux des outils intelligents.

Notre contribution consiste a développée ces deux techniques et à évaluer leur fonctionnement quant à la performance énergétique du système éolien concernant le temps de réponse à la puissance maximale à obtenir et au comportement du système pendant le suivi

optimal du point de puissance MPP. Nous disposons également à réaliser une simulation du système avec des vitesses de vent variables pour approfondir notre analyse.

Le travail en cours est structuré en quatre parties :

Chapitre 1 : Commande à flux rotorique Orienté de la Machine Asynchrone

D'abord, on présente en premier lieu le potentiel éolien dans l'Algérie qui est également exploré et aussi les différents types d'éoliennes à vitesse fixe ou variable ainsi que leur construction et leurs théories de fonctionnement. Ensuite, les trois types de générateurs électriques les plus courants à savoir les machines synchrones, asynchrones et à double alimentation sont expliqués.

Chapitre 2 : Modélisation et commande d'un système éolien à base de GADA

Ce chapitre est consacré à la modélisation et le contrôle de la chaîne de conversion éolienne basée sur un générateur asynchrone à double alimentation. Trois approches distinctes de contrôle pour (GADA) sont illustrées : une méthode directe de mesure et de comparaison des puissances actives et réactives avec leurs références, une autre de puissance indirecte sans boucles et avec boucles de puissance, un contrôleur mode glissant intégré au réseau est combiné à une structure de commande non linéaire robuste basée sur la théorie de Lyapunov.

Chapitre 3 : Techniques de poursuite du Point de Puissance Maximum (MPPT)

Au cours de ce chapitre, une variété de techniques MPPT pour obtenir les meilleurs résultats, une comparaison de deux approches MPPT utilisant des méthodes (P&O, FLC) est présentée. Les résultats de simulation suggèrent que la technique de la logique floue peut être utilisée pour maximiser la transmission de l'énergie dans les systèmes éoliens.

Chapitre 4 : Architecture et méthodes de recherche du point maximum de puissance

Dans ce chapitre, une nouvelle méthode de poursuite du point maximale MPPT est proposée. Les résultats obtenus montrent à quel point cette technique MPPT basée sur le flou de type 2 est performante par rapport aux deux autres méthodes (P&O) et flou de type 1. Cette dernière approche peut jouer le rôle des techniques d'optimisation conventionnelles. En réalité, l'efficacité des techniques MPPT traditionnelles dépend de la fiabilité des informations, fournies de la vitesse du vent et d'autres caractéristiques aérodynamiques du système éolien. Cependant, cela nécessite l'installation d'un anémomètre ce qui augmente le coût du système. En outre, les caractéristiques de chaque éolienne sont uniques. De plus, elles

fluctuent en fonction des conditions climatiques ce qui réduit la crédibilité du système. Il est préférable de choisir des stratégies de contrôle qui ne repose pas sur ces attributs.

Finalement, cette étude se conclut par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I

**Commande à flux rotorique
Orienté de la Machine
Asynchrone**

Introduction

Malgré l'utilisation des moulins à vent depuis l'antiquité, l'énergie éolienne a été longtemps oubliée alors qu'elle était déjà exploitée, ce n'est qu'après la crise pétrolière de 1973 qui a alerté les états producteurs d'énergie fossile qu'elle a connue pour plus de 40 ans un essor sans précédent. En effet, après l'an 2000, le contexte fluctuant des énergies fossiles, l'explosion de la demande mondiale en électricité et les prises de conscience environnementale, ont accentué le besoin d'une énergie propre et durable ou l'éolien occupe une place privilégiée, [5].

Depuis lors, les aides financières, les lois gouvernementales, l'aérodynamique et l'ingénierie moderne ont permis l'amélioration des éoliennes. L'évolution rapide de cette technologie a donné naissance à des turbines éolienne de plus en plus puissantes, dont leurs fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de diminuer les efforts mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, [6].

Le vent est la ressource éolienne. Pour cela, il faut connaître le potentiel éolien d'une région. Mais, pour déterminer ce potentiel il faut passer par le traitement statistique des mesures de la vitesse du vent. Toutefois, une bonne connaissance des caractéristiques du vent en tout site est importante pour une exploitation adéquate des ressources éoliennes. En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre, ceci est dû à une topographie et un climat très diversifiés.

Ce chapitre présente une description et des notions sur la technologie de l'énergie éolienne, ainsi que les différents composants constituant l'aérogénérateur. Ensuite, les différentes associations machines électriques, utilisées pour la conversion éolienne seront étudiées. Vu les avantages incontestés du génératrice asynchrone à double alimentation pour la conversion éolienne, elle sera particulièrement présentée en détail dans ce chapitre.

I.1 Energie éolienne

La technologie la plus connue et la plus fréquemment utilisée aujourd'hui est l'aérogénérateur, qui est un convertisseur d'énergie et un appareil capteur qui génère de l'énergie mécanique à partir de l'énergie cinétique du vent pouvant être utilisée sur un arbre de transmission, ensuite convertie en électricité à l'aide d'un générateur synchrone ou asynchrone, [6,7,8]. Il existe deux étapes pour effectuer la conversion éolienne :

- La turbine extrait une partie de l'énergie cinétique du vent et la transforme en énergie mécanique.

- Le générateur permet la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique qui la transmet au réseau électrique.

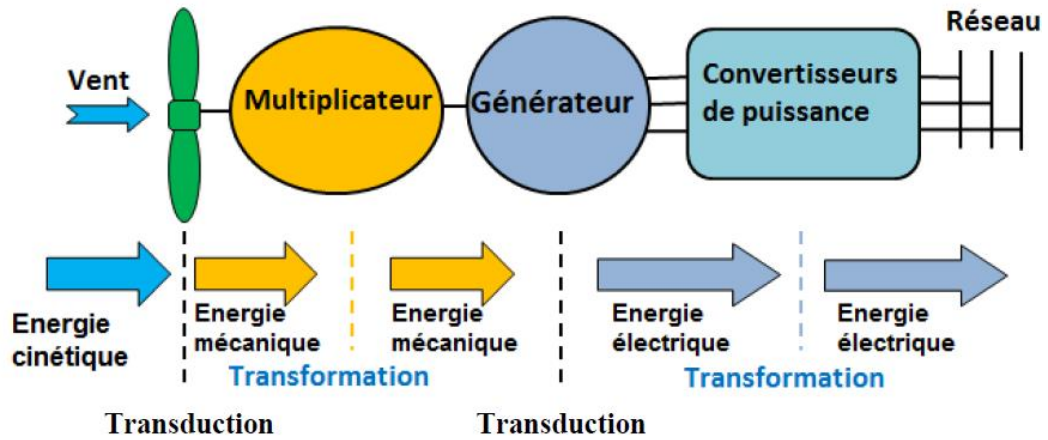


Fig.I.1: Transduction de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique

Trois catégories sont utilisées pour classer les éoliennes en fonction de leur puissance, [9]. Les turbines sont répertoriées aussi selon leur diamètre de l'hélice et de la puissance dans le tableau ci-dessous.

Eolienne	Diamètre de l'hélice	Puissance
Petite	moins de 12 m	moins de 40 kW
Moyenne	12 m à 45 m	de 40 kW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW et plus

Tab.I.1: Classification des éoliennes par puissance

La puissance et la taille des éoliennes sont corrélées conformément à la (figure I.2).

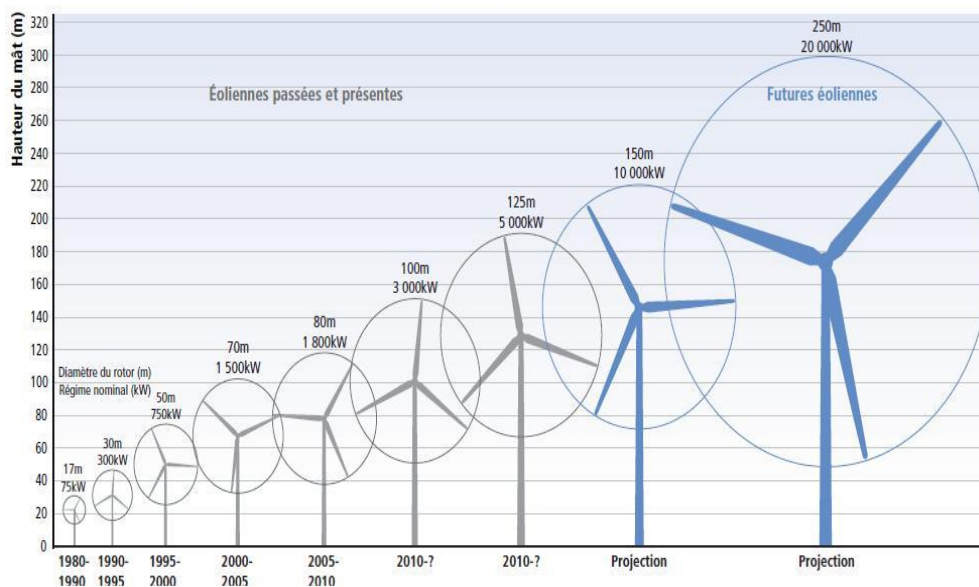


Fig.I.2: La relation entre la taille-puissance des éoliennes

I.2 Energie éolienne en chiffre

I.2.1 Energie éolienne dans le monde

Selon le rapport (GLOBAL WIND REPORT 2023) de la GWEC,[10], au niveau mondial, 77,6 GW de l'énergie éolienne a été connectée aux réseaux électriques en 2022, ce qui porte la totale de la capacité éolienne installée à 906 GW soit une augmentation de 9% comparé à 2021.

Bien que les nouvelles installations sur le marché de l'éolien terrestres ont baissé de 5 % en 2022, elles ont tout de même été la troisième année la plus élevée de l'histoire pour ajouts, après une année 2021 record avec plus de 21 GW connectée au réseau, la nouvelle capacité mises en service l'année dernière a chuté à 8,8 GW faisant de 2022 la deuxième année la plus élevée (figure I.3).

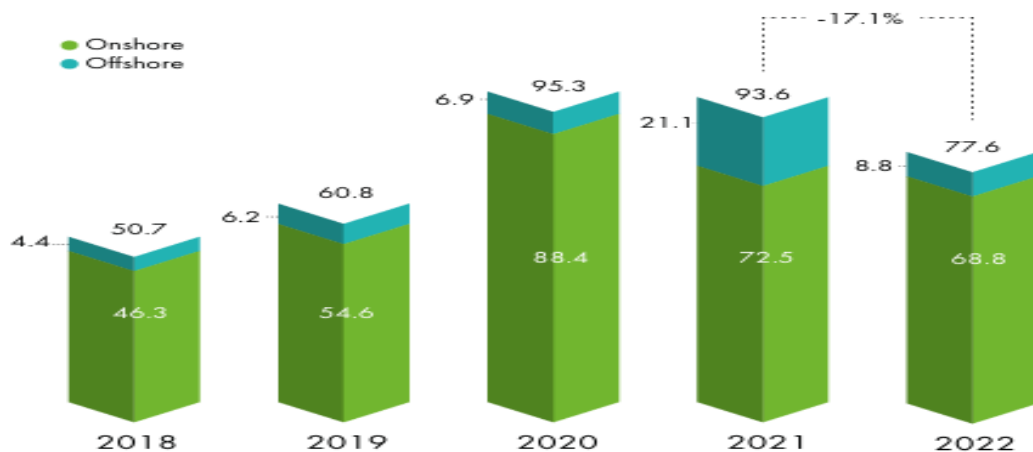


Fig.I.3: Nouvelles installations GW

Les nouveaux sites en 2022 représentent 71 % des installations mondiales, cela correspond à une diminution collective de 3,7 % par rapport à 2021. Cela s'explique principalement par le fait que les deux principaux marchés mondiaux, les États-Unis et la Chine sont perdus ensemble 5 % de part de marché.

En termes d'installations cumulées, à la fin de 2022, les dix premiers marchés sont restés inchangés. Selon les données de 2021, l'Espagne, l'Inde, les États-Unis, la Chine et l'Allemagne représentaient 72 % de la puissance éolienne mondiale installée (figure I.4)

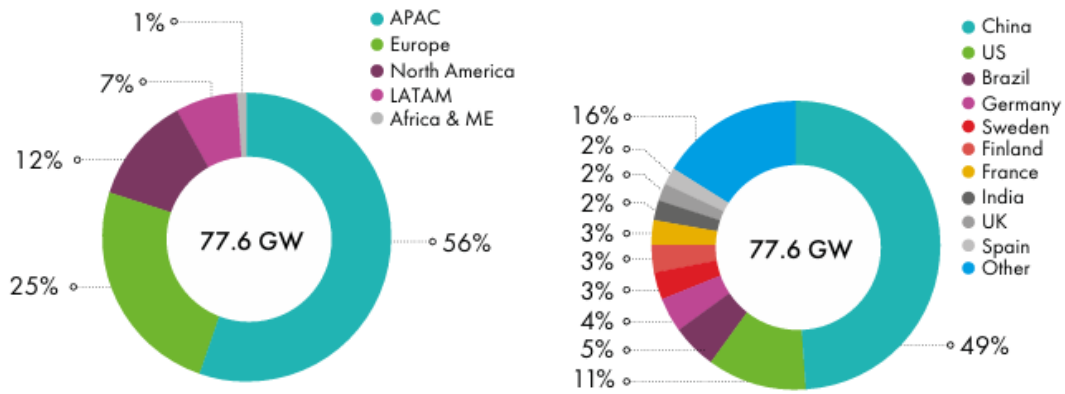


Fig.I.4: Statistiques fin 2022 de GWEC pour la nouvelle capacité d'énergie éolienne

a) Nouvelle capacité éolienne en 2022 installée par région (%),

b) Nouvelle capacité d'énergie éolienne en 2022 des 10 premiers marchés (%)

I.2.2 Perspectives du marché de l'énergie éolienne – 2022 à 2027

Les perspectives de marché du GWEC représentent la perspective de l'industrie, les installations prévues de nouvelles capacités pour les cinq prochaines années. Les perspectives sont basées sur les données des associations éoliennes régionales, les objectifs des gouvernements, les résultats des appels d'offres, les plans d'enchères annoncés, le pipeline de projets disponibles et les opinions des membres du GWEC et des experts de l'industrie. Une fiche technique détaillée est disponible dans la zone conservé à ceux qui utilisent le site Web GWEC Intelligence, voir (figure I.5).

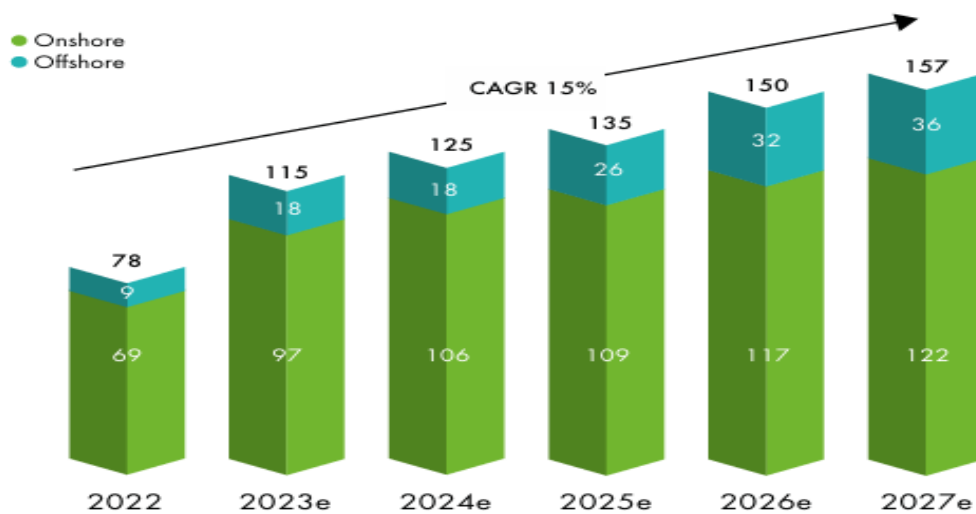


Fig.I.5: Perspectives des nouvelles installations 2023-2027 (GW)

Prévoit que les nouvelles installations d'énergie éolienne dépasseront 100 GW en 2023 et que 680 GW sera ajoutée dans le cadre de la politique actuelle pendant les cinq années à venir. Cela équivaut en plus de 136 GW de nouvelles installations par an jusqu'en 2027, le taux de croissance annuel TCAC est de 15%.

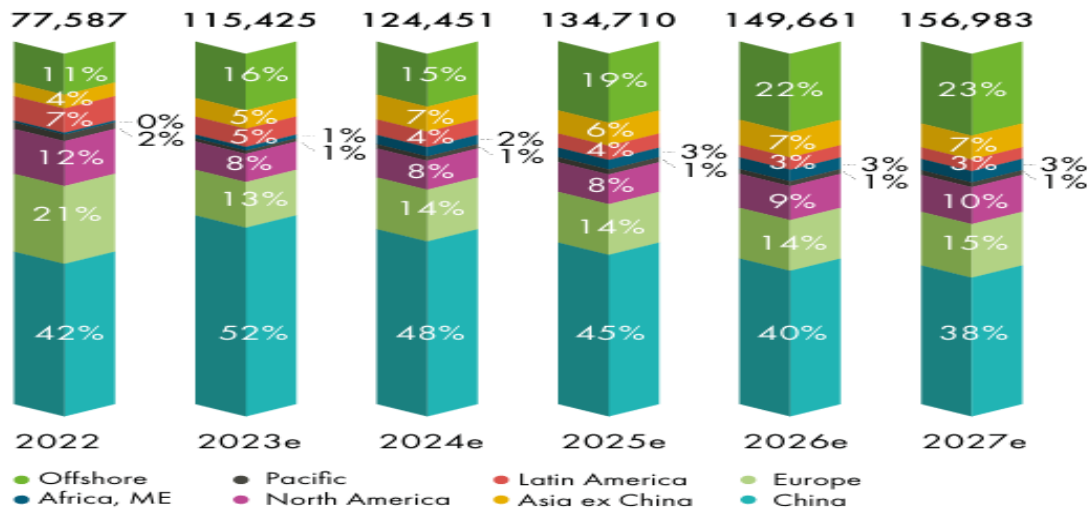


Fig.I.6: Perspectives de nouvelles installations par région
(MW et %, onshore et offshore)

Avec le premier projet éolien offshore à grande échelle devrait être partiellement raccordé en 2023, 15 GW de capacité éolienne offshore devrait être mise en service aux États-Unis, ce qui en fera pendant les cinq années à venir le plus grand marché d'éoliennes offshore en termes de nouveaux ajouts du Royaume-Uni et de la Chine.

La base de cette projection est l'hypothèse que la chaîne d'approvisionnement sera établie à temps pour croissance de la côte est des États-Unis.

I.2.3 Potentiel éolien en Algérie

N. Kasbadji Merzouk en 2000 a tracé l'atlas éolien de l'Algérie pour donner une perspective mondiale de la distribution géographique des ressources éoliennes, les zones d'intérêt liées à l'énergie éolienne, comme Adrar et Tiaret ont été identifiées sur la première carte. F. Chellali a mis à jour l'atlas des vents en 2011, et S. Boudia l'a mis à jour en 2013, H. Daaou et S. Haddouche ont créé un nouvel atlas en 2017 en utilisant des bases de données contenant, 74 stations météorologiques de l'ONM ont des vitesses moyennes tri-horaires.

Un parc éolien de 10 MW a été réalisé et mis en service en 2014 dans le cadre de l'initiative "Energies renouvelables " 2011-2030" dans la commune de Kaberten de la wilaya

d'Adrar. Cette centrale de 30 hectares la première du genre dans le pays est composée de 12 éoliennes Gamesa de 850 kW.

La carte des vents créée par le CDER montre que l'Algérie dispose d'un gisement éolien important avec des vitesses de vent modérées de 2 à 6 m/s (figure I.7).

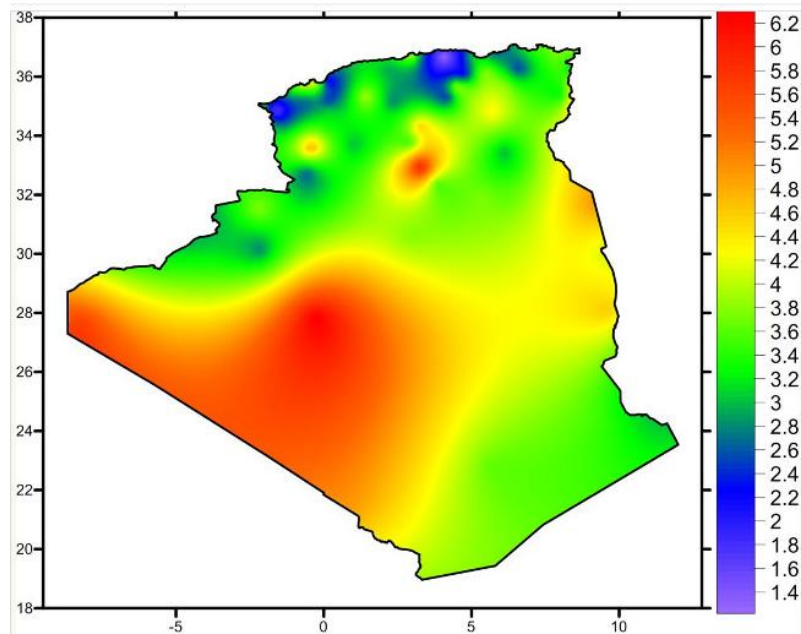


Fig.I.7: Carte annuelle des vents à une distance de 10 mètres du sol (m/s), [11].

En Algérie, le nouvel Atlas éolien à 10 m de hauteur montre des variations dans le calcul par rapport aux atlas précédents de la ressource éolienne, notamment au Sahara en raison d'une distribution géographique au moins homogène entre la partie nord et la partie sud, [12].

Ainsi, Sur le site d'In Salah, le vent a été estimé à une vitesse moyenne de 6,4 (m/s), alors que le site d'Adrar a enregistré 6,3 (m/s). Avec une douzaine de stations, la wilaya d'Illizi a enregistré des vitesses de vent plus élevées que 5(m/s), bien que les vitesses moyennes relativement élevées de 6,5 (m/s) ont été enregistrées sur le site de Hassi R'Mel.

On note que de nombreux microclimats ont également été découverts dans le nord du pays, s'étendant d'ouest en est, la région de Mecheria, à l'extrême ouest des Hauts-Plateaux se distingue notamment par le vent à une vitesse moyenne de 5,6 (m/s).

La vitesse moyenne à Tiaret est de 5 (m/s), 5,1 (m/s) à Djelfa et 5,3 (m/s) à M'sila. Selon le CDER, si cette première carte fournit des données utiles pour estimer le potentiel, elle reste insuffisante pour choisir des emplacements appropriés pour les parcs éoliens. L'Algérie a entamé une nouvelle phase dans son utilisation des énergies renouvelables et vise

à produire d'ici 2030, environ 40% de sa puissance électrique sera générée depuis d'énergie renouvelable, avant 2020, plusieurs centrales photovoltaïques seront installées dans le Sud et en hauts plateaux, ainsi que projets pour des parcs éoliens à grande échelle sont prévus. L'Algérie a réceptionné en 2014 le prototype de parc éolien de Kabertène, proche d'Adrar, avec une puissance de 10 mégawatts.

En juin 2021, le gouvernement a actualisé les objectifs à 35 GW d'électricité renouvelable générée d'ici 2035, qui est de 22 GW d'énergies renouvelables d'ici 2030 (**dont environ 5 GW d'éolien**), a été jugé irréalisable.

I.3 Types d'éolienne

Il est possible de classer les éoliennes de différentes manières mais la classification la plus importante est déterminée par la rotation de l'éolienne (horizontale ou verticale) par rapport au vent, autrement dit qu'il y a des éoliennes à axe horizontal (HAWT) ainsi que des éoliennes à axe vertical (VAWT).

I.3.1 Eoliennes à axe vertical (VAWT)

Les premières constructions conçues pour fournir de l'énergie étaient des éoliennes avec un axe vertical. Tout au long des années 1920, plusieurs variations ont fait l'objet de tests, souvent sans succès, mais deux constructions ont atteint le stade de l'industrialisation, [13]. Les trois modèles de éolienne à axe verticale sont représentés à la (figure I.8), avec les rotors Savonius et Darrieus.



Rotor de Darrieus

Darrieus type H

Rotor de Savonius

Fig.I.8: Turbines à axe vertical (VAWT), [14].

Le principal avantage est que le générateur et les commandes sont facilement accessibles depuis le sol, ce qui rend inutile un système d'orientation du rotor puisque la structure peut être tournée selon le sens du vent.

D'un autre côté, une éolienne à axe vertical fonctionne sans prendre en considération le sens du vent est peu utilisée, voire abandonnée, pour diverses raisons :

- Il y a des fluctuations importantes de puissance et un faible rendement.
- Les grandes éoliennes occupent une grande surface au sol.
- Le vent a une faible vitesse lorsqu'il est proche du sol.

I.3.2 Eoliennes à axe horizontal (HAWT)

Cette turbine tourne presque en parallèle avec la direction du vent, même s'il est horizontal par rapport au sol, comme elle est installée au sommet d'une tour, elle peut exploiter une plus grande quantité d'énergie éolienne. Elle offre un plus grand rendement aérodynamique même s'il est souvent nécessaire d'orienter les pales. Elles nécessitent également très peu d'encombrement au sol et elle démarre de façon autonome, cette catégorie comprend la plupart des éoliennes dans le marché [15]. Une turbine à axe horizontal est classée comme mono-pale, bipale, tripale ou multi-pale en fonction du nombre de pales utilisées qui diffère généralement de un à trois (figure I.9). Le plus fréquemment utilisé est le rotor tripale car il permet de trouver un équilibre entre le coût du capteur éolien, la vitesse de rotation et le coefficient de puissance, [15].

En raison de son coût moins élevé de ses restrictions mécaniques réduites et la position du destinataire situé à plusieurs mètres au-dessus du sol, ce type d'éolienne est devenu plus populaire que les éoliennes qui ont un axe vertical mais son concept est cependant plus complexe, [16].

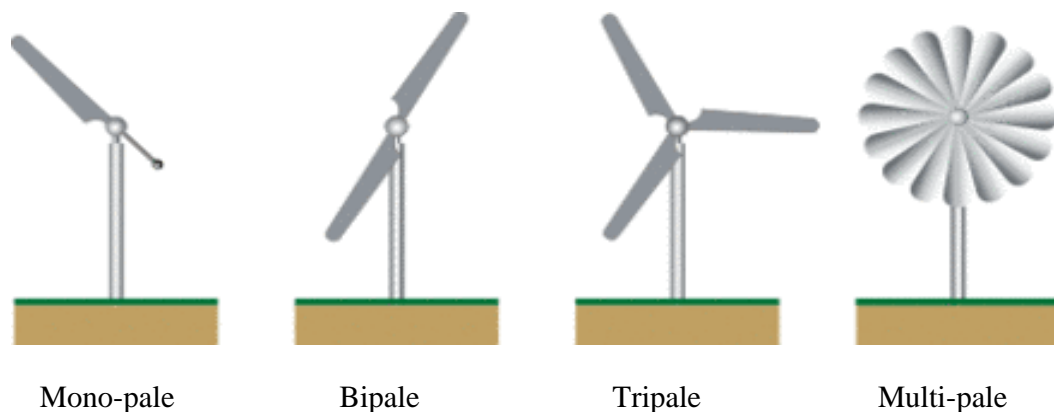


Fig.I.9: Turbines à axe Horizontal HAWT

Les HAWT sont désignées sous le nom d'amont ou d'aval en fonction de leur orientation par rapport au vent (figure II.10) :

- **Amont** : Le vent souffle vers la nacelle en traversant l'avant des pales, le rotor a une orientation par un dispositif dans le sens du vent et les pales sont rigides.
- **Aval** : L'arrière-plan des pales est soulevé par le vent depuis la nacelle, le rotor peut être ajusté et auto-orientable

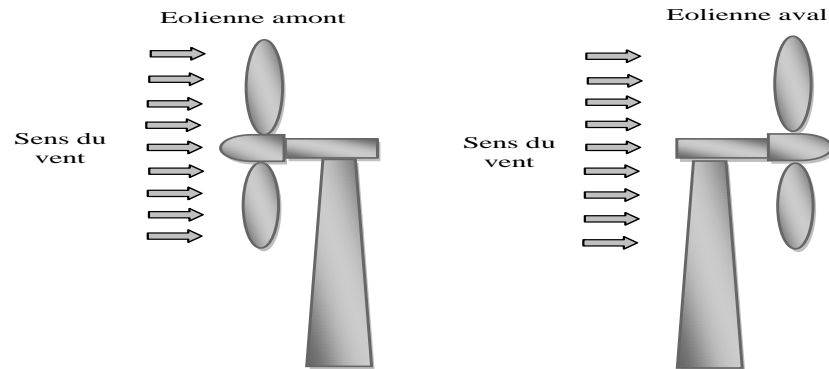


Fig.I.10: Eoliennes en amont et en aval.

Il est important que les pales des éoliennes à axe horizontal (HAWT) soient orientées dans le sens du vent. Pour ce faire, la nacelle est équipée de mécanismes qui correspondent les pales dans la direction du vent. Celui qui facilite et offre des meilleurs résultats pour des puissances plus élevées grâce à des forces de manœuvre moindres et à une meilleure stabilité la plus fréquente disposition des turbines est en amont, [17].

I.3.3 Architecture d'une éolienne (HAWT)

La nacelle, la tour et le rotor, sont les trois parties fondamentales de l'aérogénérateur, qui reste le type en plus souvent employé pour l'industrie éolien comme indiqué dans la (figure I.11), [18]:

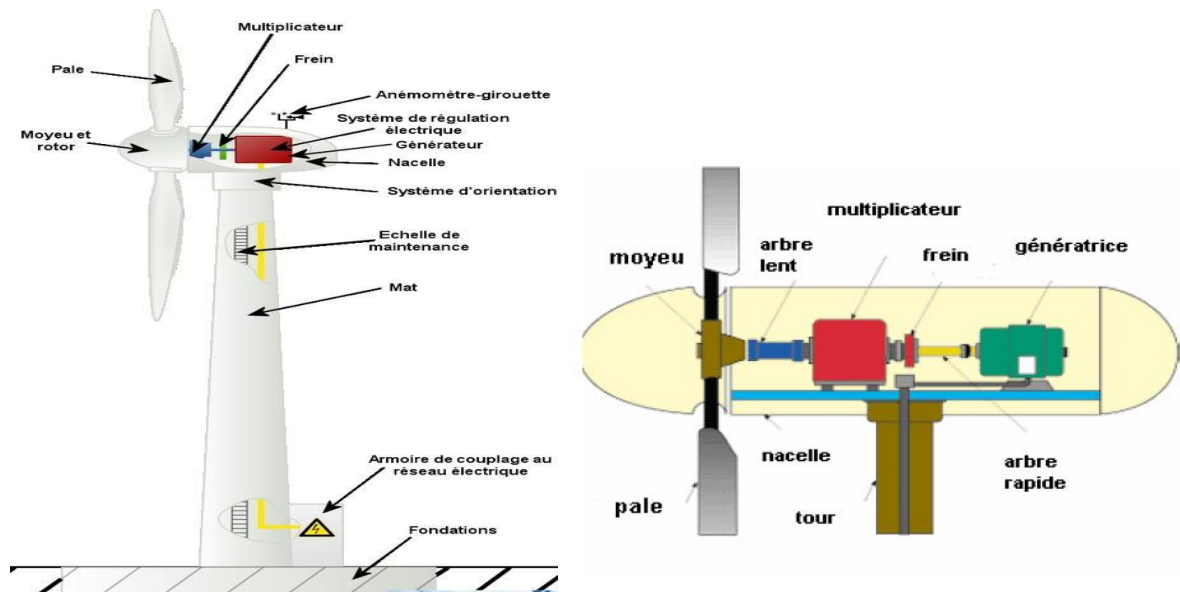


Fig.I.11: Modèle de turbine éolienne de grande puissance

I.3.3.1 La tour ou le mât

Pour les éoliennes à axe horizontal, la tour élève le rotor au-dessus du niveau du sol afin qu'un vent plus fort et plus régulier puisse l'entraîner. Elle permet également de changer le rotor à une longueur appropriée pour qu'il suive la rotation.

Il doit être le plus élevé possible afin s'abstenir toute perturbation proche du sol, mais le poids doit être réduit au minimum et la quantité de matériaux joue un rôle significatif dans le coût. Les parties du système électrique et électronique telles que le générateur, la commande, le multiplicateur et le modulateur sont souvent logées dans le mât, [19]. (Figure I.12).



Fig.I.12: Composants électroniques de la tour éolienne.

I.3.3.2 Le rotor

Le rotor est un capteur d'énergie composé de différentes pales (généralement trois), qui convertit l'énergie du vent en énergie mécanique, la connexion entre le rotor et la nacelle est assurée par le moyeu, tandis que l'efficacité des pales dépend de l'énergie générée et de sa mise en place pour capter l'énergie éolienne.

I.3.3.3 La nacelle

La nacelle élevée sur le mât est aperçue comme un atelier de machines virtuelles suspendues dans le ciel et regroupe toutes les pièces mécaniques pneumatiques, électriques et électroniques indispensables pour assurer le bon fonctionnement de la machine.

Une partie de la nacelle repose sur l'arbre, l'anneau de fixation du moyeu et l'arbre mécanique sont visibles sur le visage (figure I.13).



Fig.I.13: Aspect aérien de la nacelle.

Le système de refroidissement par eau ou air est équipé des composants tels que :

- **Le multiplicateur de vitesse**

Cela est utilisé pour augmenter la vitesse de rotation entre l'arbre secondaire d'entraînement du générateur électrique et l'arbre primaire. En effet, dans des circonstances idéales, les générateurs de courant classiques sont incapables de produire du courant électrique en raison de la faible vitesse de rotation de l'éolienne. La boîte de vitesses a un rotor qui tourne lentement (30 à 40 tr/min) mais elle peut être connectée à un générateur commun et peu coûteux qui tourne 40 à 50 fois plus vite, un frein mécanique est généralement installé sur l'arbre secondaire pour empêcher la machine de s'emballer et immobiliser le rotor pendant les procédures d'entretien.

- **La génératrice**

Le rôle de cet alternateur est de transformer l'énergie mécanique en électricité. La partie électrique d'une éolienne est composée d'un générateur électrique synchrone ou asynchrone.

- Étant donné que les machines synchrones utilisent un rotor bobiné avec plusieurs pôles, [20], elles fonctionnent lentement, sans multiplicateur de vitesse, l'éolienne est connectée directement au rotor. Cette catégorie de générateurs comprend également les machines à réluctance variable,[21]. L'utilisation d'un convertisseur de puissance permet de connecter ces générateurs au réseau, la production est généralement faible.
- Les machines à rotor bobiné sont des exemples de machines asynchrones. Un multiplicateur de vitesse est nécessaire car la vitesse de rotation de ces machines est bien supérieure à celle de l'éolienne, les applications de haute puissance sont souvent le cas d'utilisation de cette technologie.

- **Contrôleur électronique - girouette - anémomètre**

L'éolienne est supervisée par le contrôleur électronique. En réalité, le dispositif qui contrôle le pas des pales est un ordinateur, freiner la machine, et aussi la gestion du démarrage de la machine car le vent est suffisamment, l'orientation du rotor et de la nacelle avec le vent. Le contrôleur reçoit des informations de deux capteurs (capteur de sens du vent) et un émomètre (capteur de vitesse du vent), qui est généralement montés au fond de la nacelle pour remplir ces différentes fonctions. Enfin, le contrôleur est également assure les pannes éventuelles.

- **Le dispositif d'orientation de la nacelle**

Il fait tourner la nacelle de la tour environ de son axe vertical, les moteurs électriques garantissent généralement l'orientation au moyen avec une couronne dentée, une multitude d'éoliennes sont dotées d'un mécanisme qui permet de bloquer mécaniquement la nacelle dans une orientation spécifique. Cette fonction permet d'arrêter l'éolienne pendant les procédures d'entretien.

▪ Le dispositif d'orientation des pales

Dans les turbines à vitesse variable, il maintient une production d'énergie relativement constante en ajustant la portance des pales, tandis que dans les turbines à vitesse fixe peu importe le vent, la vitesse de rotation reste constante.

I.3.4 Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne à axe horizontal

I.3.4.1 Avantages

- L'avantage de cette conception verticale est de placer directement le multiplicateur, tous les appareils de commande et le générateur au sol.
- En raison de son axe vertical à symétrie de rotation, il est capable de fonctionner dans toutes les directions du vent sans avoir besoin d'orienter le rotor.
- La structure est simple et robuste et ne requiert pas beaucoup d'entretien.

I.3.4.2 Inconvénient

- Comparativement à celles à axe horizontal, elles sont moins performantes.
- En raison de sa construction verticale, ce type d'éolienne doit fonctionner avec du vent plus proche du sol, qui est plus faible parce que freiné par le relief.
- Par rapport aux éoliennes à tour, les éoliennes au sol nécessitent des tirants pour passer à travers les pales ce qui augmente leur surface.

I.4 Technologie des éoliennes

Les pales transforment l'énergie cinétique du vent en énergie électrique grâce à un générateur synchrone ou asynchrone à vitesse variable ou fixe.

La classification d'une éolienne peut être basée sur sa vitesse de rotation il est variable ou fixe.

I.4.1 Eoliennes à vitesse fixe

La (figure I.14) illustre le fonctionnement des premières éoliennes de grande puissance, elles utilisaient une machine à cage asynchrone directement connectée au réseau, [22,23].

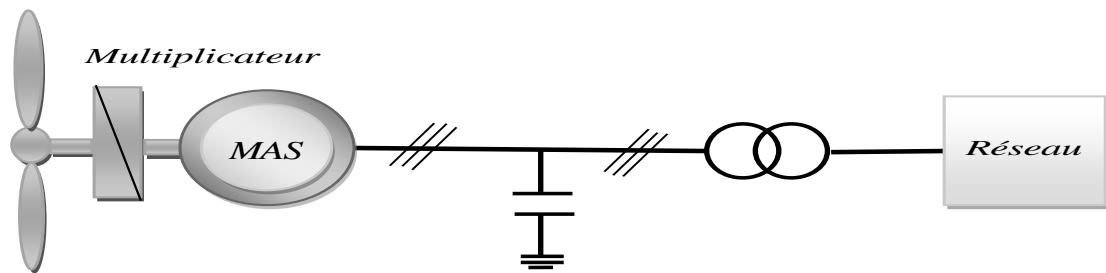


Fig.I.14: L'éolienne à vitesse fixe est connectée directement au réseau électrique.

Conformément à leur nom, les turbines à vitesse fixe sont des turbines à vitesse constante, la vitesse de cette machine est calculée en fonction du rapport entre le réducteur de vitesse, la fréquence du réseau et le nombre de pôles du générateur. Lorsque la vitesse du vent change, l'efficacité du système diminue, ce qui explique pourquoi ces turbines ne sont pas capables d'atteindre un rendement de conversion optimal à une vitesse de vent spécifique. À la différence de d'autres sources d'énergie qui offrent une énergie constante et facilement ajustable au fil du temps, cette turbine à vitesse fixe fournit une énergie électrique qui fluctue considérablement et qui est protégée des rafales de vent par un contrôle aérodynamique.

Cette approche utilise un système électrique simple sans contrôle électronique et son prix est plus raisonnable.

I.4.1.1 Les avantages de l'éolienne à vitesse fixe

Ce type de générateur éolien présente les principaux avantages suivants:

- L'installation est simple.
- Probabilité d'entrée minimale de résonance des composants d'une éolienne.
- La commande n'a pas de convertisseurs de puissance.
- Excellente fiabilité.
- Faible coût de construction et maintenance.
- Fonctionnement à différentes vitesses (plus ou moins 30 % de la vitesse nominale).

I.4.1.2 Les inconvénients de l'éolienne à vitesse fixe

En termes d'utilisation de l'énergie extraite, cette méthode présente de nombreux inconvénients notamment :

- Fort stress mécanique suite aux importantes vibrations ce qui accroît le coût de la composition qui doit faire face à cela.
- Faible Rendement de conversion d'énergie.
- Pièces qui nécessitent une maintenance plus importante sont usées.
- Les perturbations dans le réseau qui sont causées par une mauvaise qualité d'énergie produisent des fluctuations importantes de la puissance

I.4.2 Eoliennes à vitesse variable

Les éoliennes les plus fréquemment employées aujourd'hui dans l'industrie sont des modèles à vitesse variable. Il existe deux variantes principales pour ce type d'éolienne : l'une basée sur la machine asynchrone à cage à double alimentation (figure I.15), et l'autre basée sur la machine synchrone avec inducteur ou aimant (figure I.16), [24].

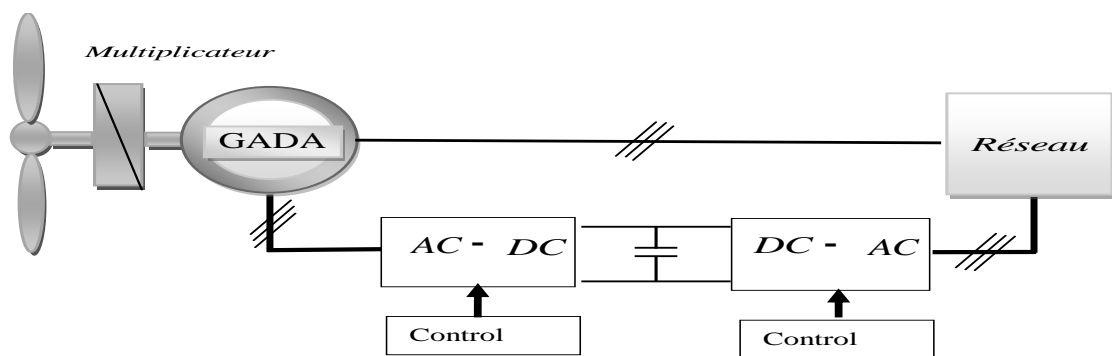


Fig.I.15: Système éolien à vitesse variable connecté au réseau via GADA

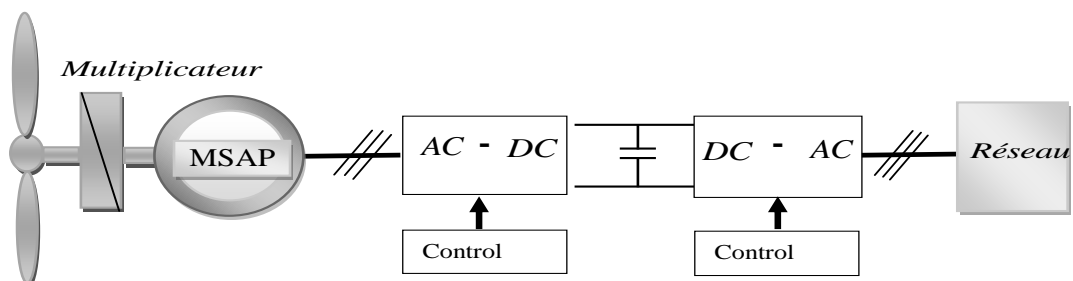


Fig.I.16: Système éolien à vitesse variable raccordé au réseau via MSAP

La turbine peut également être connectée à une machine synchrone à aimants permanents, tant que la turbine est généralement connectée à une machine asynchrone à cage ou double alimentation par un multiplicateur de vitesse. Dans ce dernier cas, s'il y a plusieurs pôles dans la machine, on évite d'avoir recours à un multiplicateur de vitesse.

I.4.2.1 Les avantages de l'éolienne à vitesse variable

Les éoliennes présentent les principaux avantages suivants :

- Fort rendement de transformer d'énergie suite à l'utilisation optimal de l'énergie du vent.
- L'orientation des pales est simple.
- La tension mécanique est réduite suite à la limitation des oscillations mécaniques.
- Contrôle et transmission d'énergie propre au réseau.
- Puissance électrique de meilleure qualité.
- Réduire le bruit en raison de la faible vitesse lorsqu'il fonctionne à faible puissance.

I.4.2.2 Les inconvénients de l'éolienne à vitesse variable

- Utilisation de machines spéciales.
- La conversion entraîne une perte d'énergie.
- Contrôle du système plus compliqué
- L'utilisation de convertisseurs entraîne des coûts et des pertes supplémentaires.

I.4.2.3 Intérêt de la vitesse variable

La (figure I.17) présente les caractéristiques qui indiquent la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du vent dans le générateur. Si la vitesse de rotation était constante, il ne serait pas nécessaire d'obtenir le maximum des courbes de puissance. C'est pourquoi il est nécessaire de modifier la vitesse de rotation de l'arbre en fonction de la vitesse du vent pour maximiser l'extraction de puissance.

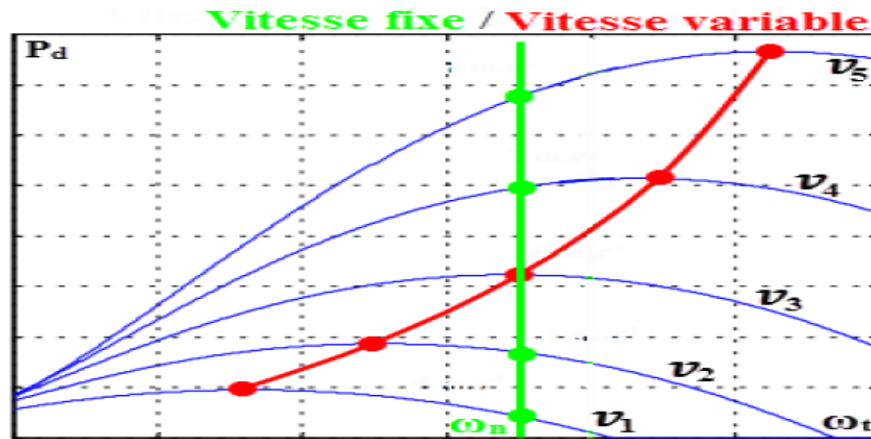


Fig.I.17: Puissance potentielle théorique disponible pour une turbine éolienne

I.5 Topologie des éoliennes à vitesse variable

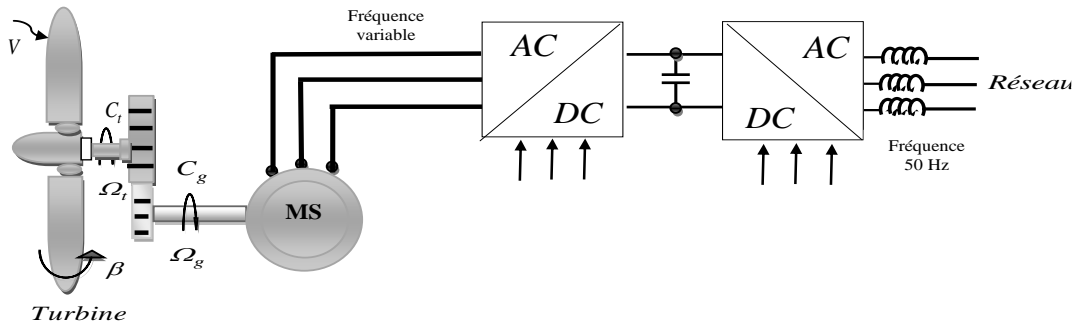
Trois générateurs distincts sont disponibles pour les éoliennes à vitesse variable :

I.5.1 Système utilisant une génératrice synchrone

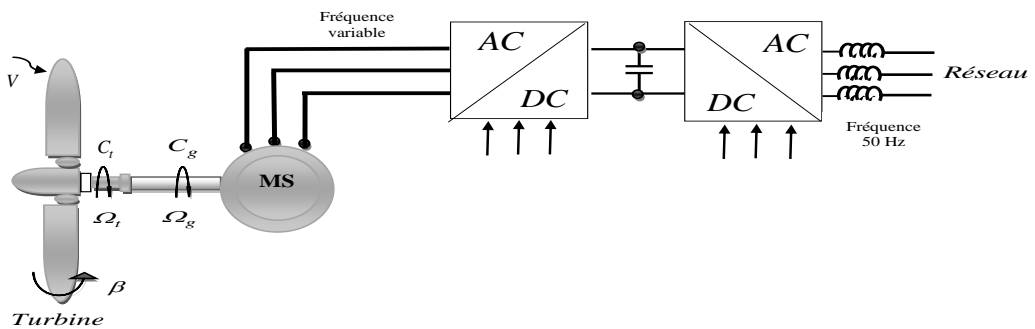
Les éoliennes à générateurs synchrones à rotor bobiné ont l'inconvénient de l'emploi d'un multiplicateur, de bagues et de balais (figure I.18.a).

Cela conduit des coûts d'entretien élevés, particulièrement pour les opérations offshore dans des conditions salines. Pour réduire ces problèmes, quelques fabricants ont élaboré des éoliennes qui se passent de multiplicateur à l'aide des machines synchrones à plusieurs nombre de paires de pôles qui sont directement connectées à l'éolienne.(figure I.18.b). Le mécanisme de bagues de balayage est supprimé si des aimants permanents sont également utilisés dans le générateur, l'inconvénient de cette configuration est que pour se connecter au réseau, les convertisseurs de puissance doivent être mesurés en fonction de la puissance nominale du générateur. Cependant, à l'échelle du contrôle de l'éolienne, cet inconvénient est considéré comme un avantage.

La puissance produite par le générateur est contrôlée par le convertisseur connecté à ce dernier, ce qui restreint le pitch de contrôle à une fonction de protection, le convertisseur connecté au réseau permet de contrôler l'interface avec le réseau en cas de vents forts, [25,26,27].



(a) Éolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone couplée à la turbine via un multiplicateur.



(b) Éolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone Directement couplée à la turbine

Fig.I.18: Éolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone

I.5.2 Système utilisant une génératrice asynchrone

Un convertisseur de puissance est installé dans le circuit du stator qui relie le générateur asynchrone alimenté par l'éolienne au réseau. À la différence des éoliennes à vitesse fixe, la vitesse de l'éolienne peut être modifiée ce qui implique que les tensions et les fréquences à la sortie du générateur ne sont plus gouvernées par le réseau. La tension du bus continu reste stable grâce à la commande de l'onduleur, [28].

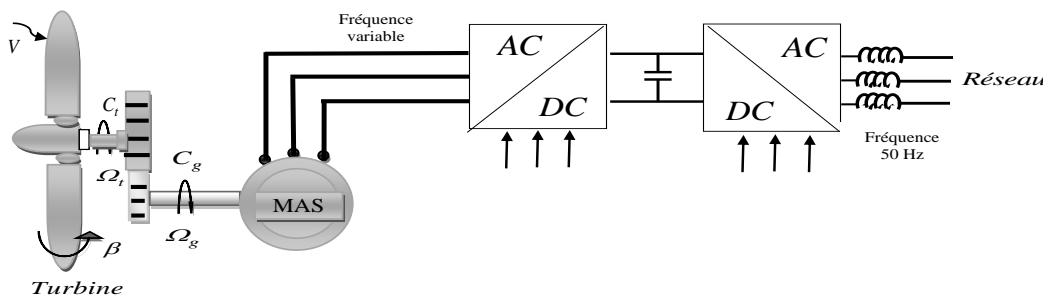


Fig.I.19: Éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone

Cette configuration permet d'avoir une amélioration de la puissance pour les vents moyens et faibles. Par contre, la puissance nominale d'une électronique de puissance doit être d'au moins 100%.

I.5.3 Système utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation

La GADA a suscité un intérêt spécifique, particulièrement en qualité de générateur d'énergie éolienne.

Deux convertisseurs statiques sont utilisés dans les éoliennes qui utilisent la GADA à savoir les convertisseurs côté réseau et les convertisseurs côté GADA, pour connecter le rotor au réseau, Comme illustré par la (figure I.20). Dans ces éoliennes, le stator est directement relié au réseau.

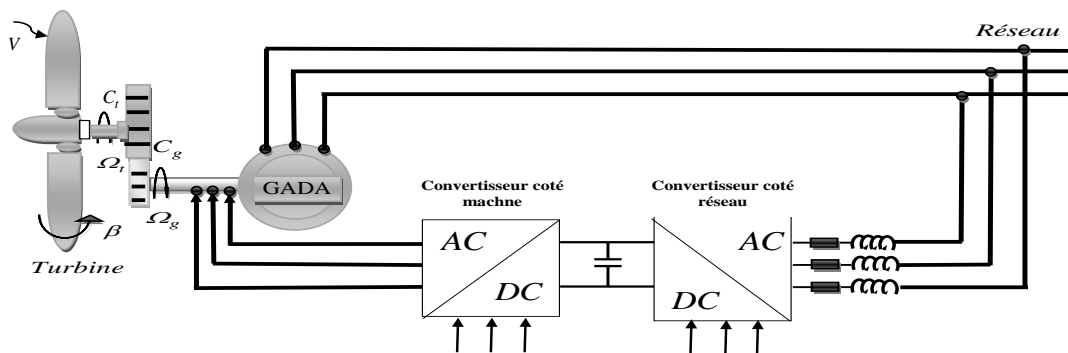


Fig.I.20: Eolienne à vitesse variable basée sur une GADA.

I.5.3.1 Structure de la GADA

La GADA est une génératrice asynchrone triphasée qui fonctionne en ayant deux armatures, l'une pour le rotor et l'autre pour le stator, sa fonction première était de servir de moteur à grande vitesse. Elle a été temporairement abandonnée en raison des problèmes d'instabilité qui sont apparus récemment. Pour ceux qui régimes hypo-et hyper-synchrones dans le fonctionnement des moteurs et des générateurs, sont désormais réalisables grâce aux progrès des technologies susmentionnées, [29]. Cette machine est unique car elle est composée de trois bobinages reliés en étoile qui forment son rotor au lieu d'une cage d'écureuil qui est insérée dans encoches d'un empilement de tôles. Les extrémités de ces enroulements sont fixées à des bagues conductrices qui sont frottés par des balais lorsque la machine tourne (figure I.21), [30].

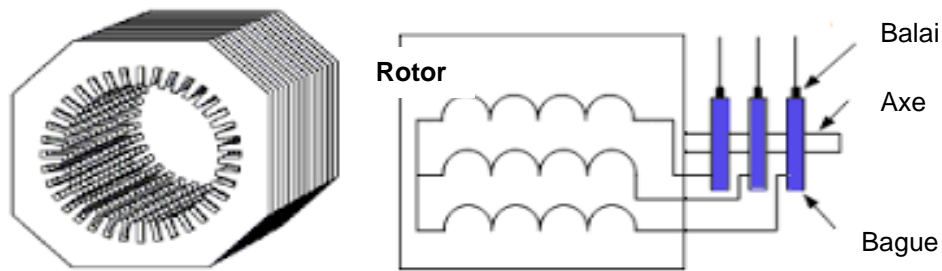


Fig.I.21: Contacts rotoriques et la structure du stator de la GADA

Les enroulements du rotor sont alimentés par un convertisseur de fréquence utilisé par la machine, tandis que les enroulements du stator sont alimentés par le réseau. Il est également envisageable d'alimenter les deux enroulements à l'aide de deux onduleurs autonomes, généralement des convertisseurs de fréquence, [29,30].

I.5.3.2 Modes de Fonctionnement

Tant que le flux de puissance dans les enroulements du rotor est bien contrôlé, la GADA est entièrement contrôlable. Il existe quatre modes de fonctionnement de GADA, elle peut être utilisée en mode générateur (GADA) ou en mode moteur (MADA) à des vitesses hypo-synchrones et hyper-synchrones.

On peut comprendre l'idée de base du contrôle GADA dans différents modes en regardant la (figure I.22). Dans cette dernière, le stator, le rotor et la puissance mécanique sont indiqués par P_s , P_r et P_m , respectivement.

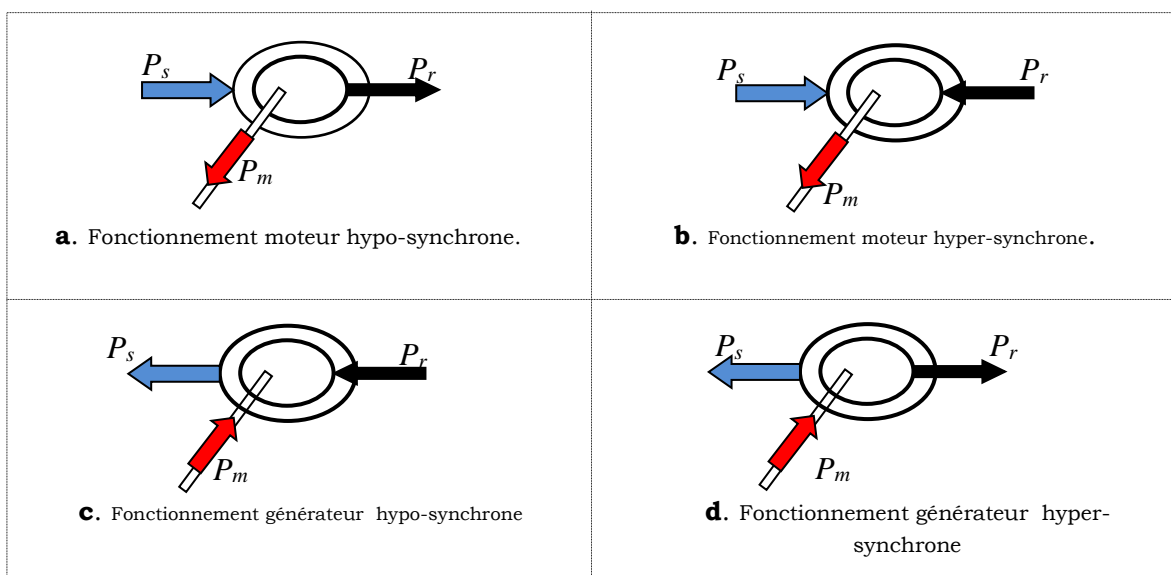


Fig.I.22: Modes opérationnels de GADA

Comme la GADA fonctionne comme un moteur hypo-synchrone comme le montre la (figure I.22a), le rotor fournit la puissance P_r , ce mode est communément appelé mode de restauration de l'énergie de glissement. En cas le moteur est en hyper-synchrone à cause d'une augmentation de la vitesse, voir (figure I.22b), le rotor absorbe la puissance P_r lorsque la GADA fonctionne comme un générateur car il est entraîné en hypo-synchronisme, comme illustré dans la (figure I.22c). Si la vitesse accroît au point où le générateur fonctionne en hyper-synchronisme, le rotor génère de l'énergie qui peut être récupérée lorsque la puissance P_r change de direction, (figure I.22d). Cependant, la plage de variation de la vitesse reste encore assez limité pour les applications de motorisation ou de production d'électricité où le démarrage de la machine est limitée au côté du rotor, comme le montre la (figure I.23), [31,32]. Ceci est dû au fait que le réseau impose la fréquence du stator.

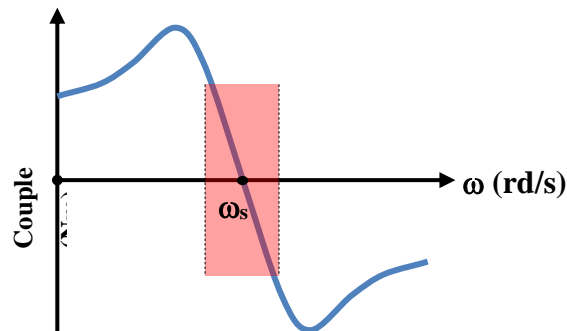


Fig.I.23: Plage de vitesse de la GADA contrôlée par le rotor

En utilisant deux convertisseurs sur le rotor et le stator et en permettant au point de synchronisation de la fréquence du stator de dériver librement, cette plage de vitesse peut être étendue. Étant donné que la GADA est asynchrone, l'énergie électrique à fréquence constante peut être produite à partir d'un système d'entraînement dont la vitesse dépend du point de synchronisation (hypo-synchrone et synchrone),[32]. Dans les installations d'énergie éolienne, la vitesse de la GADA est adaptée en fonction de la vitesse du vent afin d'améliorer le rendement de la turbine et de permettre une capture d'énergie relativement élevée, le fonctionnement à vitesse variable permet de minimiser les oscillations de couple causées par la résonance de torsion dans le train d'entraînement, [33]. La GADA permet de générer simultanément un couple et de gérer le facteur de puissance du côté du stator dans les applications de générateurs et de moteurs. En outre, il est possible d'obtenir une faible distorsion harmonique dans la régulation des composantes de la puissance active et réactive à condition que le convertisseur AC/AC du rotor soit convenablement commandé, [34].

I.5.3.3 Avantages et inconvénients de la GADA

❖ Avantages de la GADA

- La GADA peut être utilisé en tant que filtre actif pour éliminer les harmoniques de courant, car les courants du rotor régulent indirectement la puissance active et réactive.
- La possibilité de connecter des rhéostats pour changer les propriétés de l'enroulement du rotor de la machine, ce qui permet d'accroître le couple et de réduire le courant au démarrage et augmenter la plage de variation de la vitesse.
- Diminution des pertes du convertisseur statique et amélioration du rendement du système de production.
- L'accès au stator et au rotor permet d'obtenir la flexibilité et l'exactitude nécessaires pour réguler le flux électromagnétique et le couple, ainsi que pour transférer la puissance active et réactive.

❖ Inconvénient de la GADA

- La complexité du contrôle de la GADA s'explique par la structure non linéaire.
- En raison de la conception de bagues-balais, les grandes machines sont plus volumineuses que les machines à cage.
- Utilisation plus de convertisseurs statiques par rapport à la machine classique, ce qui augmente le coût.

I.6 Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

I.6.1 Le Vent

Le vent est la source d'énergie principale, il est essentiel de modéliser cette variable car la fiabilité des simulations sera influencée par la qualité du modèle du vent. Une des idées les plus courantes est de faire une série chronologique de la vitesse du vent à partir d'un bruit.

La direction du vent dans une zone $V(t)$ est le produit de deux éléments, [35] :

- Un élément turbulent du vent $V_T(t)$ qui est indépendant de la vitesse moyenne du vent et qui est un processus stochastique aléatoire.

- Un élément lent V_{moy} qui est la vitesse moyenne du vent en un lieu donné, qui varie régulièrement sur des plus longues périodes.

Ainsi :

$$V(t) = V_{moy} + V_T(t) \quad \text{I.1.}$$

Trois niveaux de vitesse du vent sont représentés par la composante V_{moy} :

$$V_{moy} = 5.8m / s \quad \text{une vitesse de vent faible;}$$

$$V_{moy} = 12m / s \quad \text{une vitesse de vent moyenne;}$$

$$V_{moy} = 18m / s \quad \text{une vitesse du vent forte.}$$

L'expression (I.2) définit la deuxième composante $V_T(t)$:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_{t_0 - \frac{\Delta t}{2}}^{t_0 + \frac{\Delta t}{2}} v(t)^2 dt} \quad \text{I.2.}$$

Pour ce faire, un filtre passe bas sous la partie turbulente de l'aéroturbine filtre les fluctuations à haute fréquence, pour lui permettre de reproduire plus près la fonction de transfert étant fournie par :

$$H_f = \frac{1}{1 + \tau.s} \quad \text{I.3.}$$

Le rotor a un diamètre qui influence la constante de temps, la vitesse moyenne du vent et l'intensité de la turbulence, [36]. La (figure I.24) montre un synoptique de reconstruction du vent.

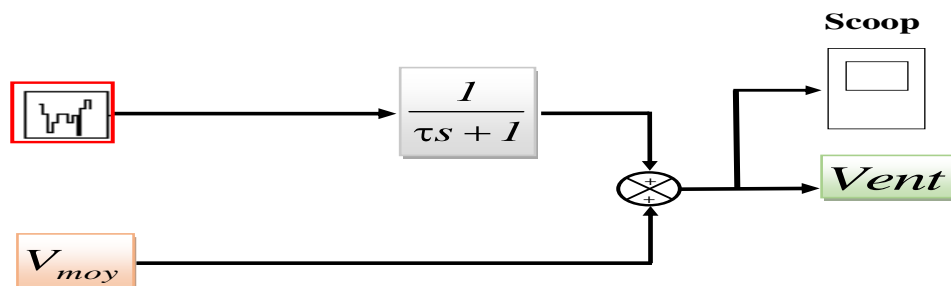


Fig.I.24: Synoptique de reconstruction du vent

Dans notre étude, la vitesse du vent est $V_{moy} = 5.4m / s$. La (figure I.25) montre la variation du vent en fonction du temps.

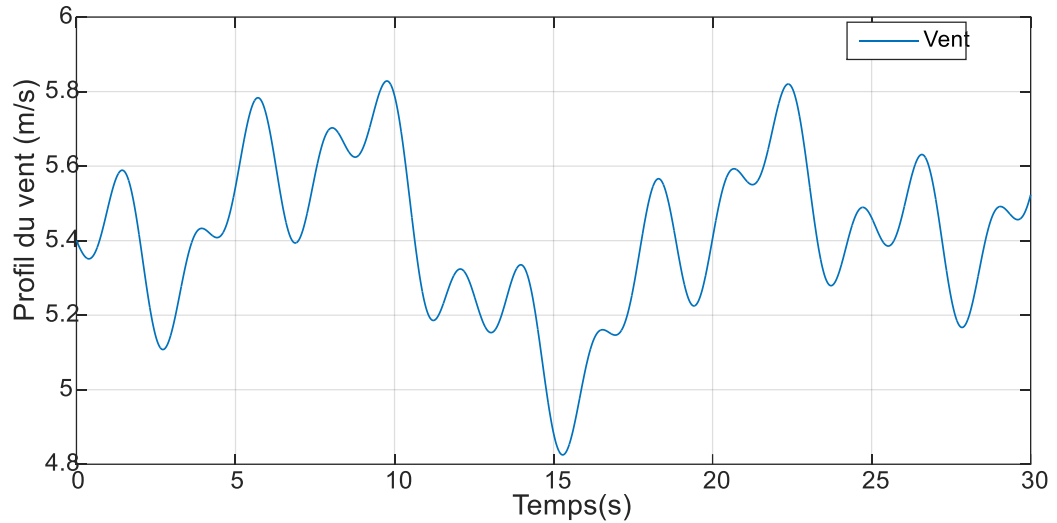


Fig.I.25: Profil du vent

I.7 Conclusion

Ce chapitre, on a présenté un aperçu global de l'énergie éolienne utilisant la GADA. Différentes variétés d'éoliennes, à vitesse variable ou fixe, sont rencontrées dans les systèmes d'énergie éolienne. Aussi, trois types de générateurs électriques sont plus fréquemment utilisés: les machines synchrones, asynchrones et les générateurs à double alimentation.

La modélisation mathématique et la commande du système de conversion éolienne basé sur la GADA seront les principaux sujets du chapitre suivant.

Chapitre II

**Modélisation et commande
d'un système éolien à base
de GADA**

Introduction

Il existe certains facteurs à considérer lors de l'installation de nouvelles éoliennes : la rentabilité, les effets sur l'environnement et le réseau électrique qui sont quelques-unes des questions importantes lors du choix de nouvelles installations d'éoliennes. L'électricité est échangée comme n'importe quelle autre marchandise sur le marché et il existe donc des normes qui décrivent sa qualité. Tout appareil connecté au réseau électrique doit répondre à ces normes et c'est une question particulièrement intéressante et importante à considérer dans le cas des installations éoliennes, car le caractère stochastique du vent et les paramètres normalisés de l'électricité y sont réunis. Un modèle mathématique d'une éolienne capable de prédire son interaction avec le réseau est donc un sujet important.

La puissance ou le couple de sortie d'une éolienne est influencée par divers éléments tels que la vitesse du vent, l'angle des pales du rotor, la taille, la forme, la surface de la turbine, la géométrie du rotor, qu'il s'agisse d'une éolienne à axe horizontal ou vertical ainsi que la vitesse du vent. La modélisation mathématique de l'éolienne est un modèle mathématique qui établit une relation entre la puissance de sortie et les différentes variables. Il est essentiel pour comprendre comment l'éolienne agit dans sa zone de fonctionnement et de contrôler ses performances, [37].

Les composantes de cette chaîne de conversion sont illustrées dans la (figure II.1).

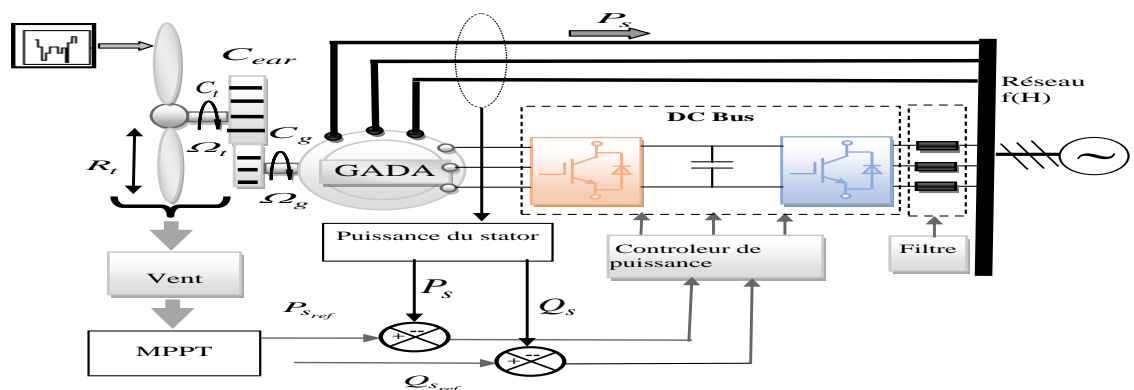


Fig.II.1: Système de conversion d'énergie éolienne

II.1 Modélisation de la turbine éolienne

L'éolienne utilise son énergie cinétique pour produire l'énergie mécanique du vent. La nacelle qui comporte un rotor est constituée d'une tour avec plusieurs pales de manière mécanique reliées à un générateur alimenté par l'électricité. La boîte de vitesses de l'ensemble mécanique transforme des vitesses de rotation plus lentes de l'éolienne en vitesses de rotation plus élevées sur le générateur électrique (figure II.2) [38].

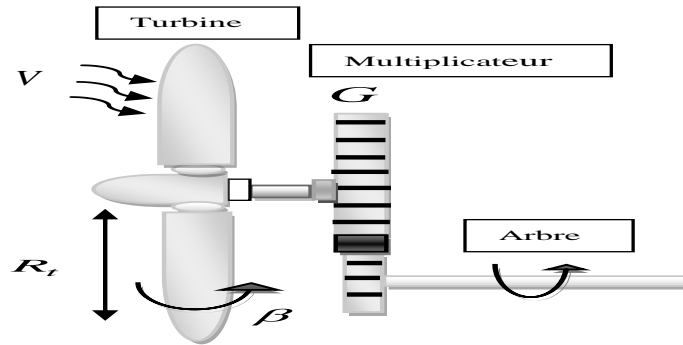


Fig.II.2: Illustration d'une éolienne

II.1.1 Modèle de la turbine

Un générateur est alimenté par une éolienne constituée de trois pales non orientables de longueur R_t alimentées par un multiplicateur de vitesse G .

L'éolienne convertit l'énergie du vent aérodynamique en énergie mécanique, en utilisant l'énergie cinétique des molécules de masse d'air ρ en mouvement lorsqu'elles traversent la surface balayée par les pales. Sa puissance cinétique est fournie par la formule suivante [39] :

$$P_v = \frac{1}{2} S_t \rho V^3 \quad \text{II.1.}$$

La formule de la puissance qu'une éolienne capte grâce à l'aérodynamisme est la suivante :

$$P_{aero} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) S_t \rho V^3 \quad \text{II.2.}$$

La vitesse spécifique λ d'une éolienne est représentée par l'équation (II.2) qui est le produit de la vitesse linéaire à l'extrémité de la pale de l'éolienne et de la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V} \quad \text{II.3.}$$

Le modèle de voile utilisé pour notre application est décrit par l'équation (II.4), la performance aérodynamique de l'éolienne est mesurée par le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$, qui varie en fonction de la valeur spécifique et de l'angle de pale β de chaque éolienne :

$$C_p(\lambda, \beta) = (0,5 - 0,0167 \cdot (\beta - 2)) \cdot \sin \left[\frac{\pi \cdot (\lambda + 0,1)}{18,5 - 0,3(\beta - 2)} \right] - 0,00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad \text{II.4.}$$

On peut déterminer le point maximum de ce coefficient $C_p = 0.54$, qui correspond aux valeurs optimales $\lambda = 6.53$ et $\beta = 0$, en observant la variation de ce coefficient en fonction de la vitesse spécifique λ pour les valeurs variables de l'angle des pales (figure II.3).

En fonction de ces valeurs, la turbine fonctionnera à son plein potentiel et fournira une puissance mécanique optimale, [40].

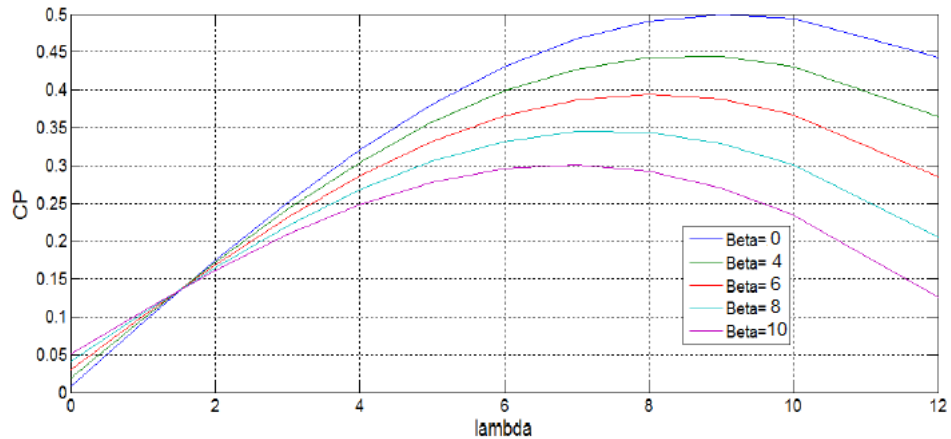


Fig.II.3: Variations de l'angle de calage des pales et de la vitesse de la turbine en fonction du coefficient de puissance.

Afin d'atteindre ce point de fonctionnement, un contrôle adapté à ce système sera créé.

L'équation (II.2) représente le couple aérodynamique [41] :

$$C_{aero} = \frac{P_{aero}}{\Omega_t} = \left(\frac{1}{2} \rho \pi R_t^3 C_p(\lambda, \beta) \right) \frac{R_t}{V \lambda} \quad \text{II.5.}$$

$$C_{aero} = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi R_t^3 V^2}{\lambda} C_p(\lambda, \beta) \quad \text{II.6.}$$

II.1.2 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur de vitesse sépare le générateur et l'éolienne. Son but est d'ajuster la vitesse de la turbine Ω_t par rapport aux besoins du générateur Ω_g qui est assez lent.

Les deux équations suivantes peuvent également être utilisées pour la modéliser :

$$G = \frac{\Omega_g}{\Omega_t} \quad \text{II.7.}$$

$$G = \frac{C_{aero}}{C_{mec}} \quad \text{II.8.}$$

II.1.3 Modèle de la partie mécanique

La (figure II.4) montre comment la chaîne éolienne est couplée mécaniquement en utilisant le modèle des deux masses, [42].

(J_t, J_g) : l'inertie des deux parties qui simulent les deux masses.

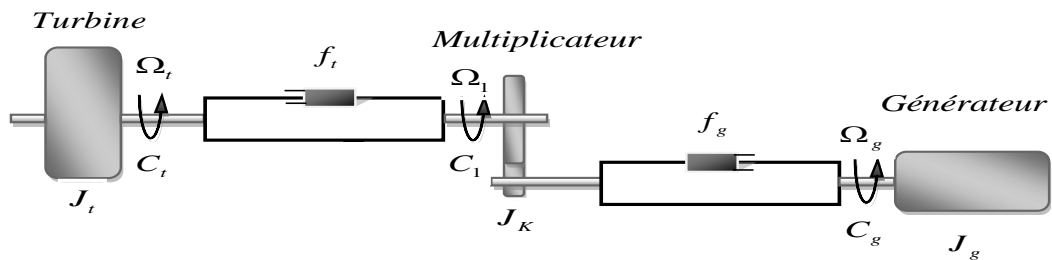


Fig.II.4: Schéma fonctionnel de la turbine éolienne

La transmission de la puissance captée par le rotor éolien est donc assurée par le moyeu couplé à l'arbre lent et les pales fixées à un adaptateur. On relie cet adaptateur à un arbre rapide qui est connecté au générateur, ce qui permet d'augmenter la vitesse de rotation de l'arbre lent, [43].

L'inertie globale J du modèle mécanique proposé est composée de l'inertie du générateur J_g et de l'inertie de la turbine J_t est donné comme suit, [44].

$$J = J_g + J_t G^2 \quad \text{II.9.}$$

Le développement de la vitesse mécanique Ω_{mec} est déterminé par le couple mécanique injecté dans le rotor du générateur C_{mec} qui est le produit du couple électromagnétique produit

par le générateur C_{em} du couple de frottement visqueux C_{vis} et du couple multiplicateur de vitesse C_g .

$$J_{mec} = J \frac{d\Omega}{dt} \tag{II.10}$$

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \tag{II.11}$$

Le couple créé par le frottement est représenté par le coefficient de frottement visqueux f :

$$C_{vis} = f\Omega \tag{II.12}$$

L'équation (II.10) au dessus est obtenue en remplaçant (II.12) et (II.11) :

$$C_g - C_{em} = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \tag{II.13}$$

Sur la base des équations précédentes, le schéma fonctionnel de l'arbre mécanique est donné par la figure suivante :

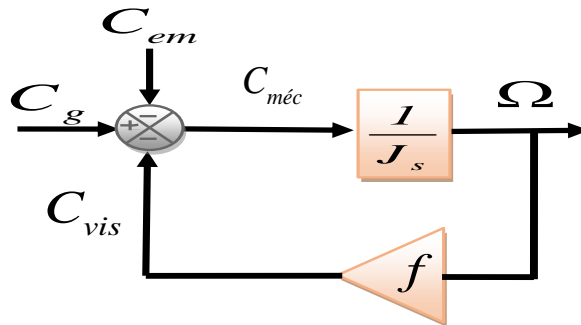


Fig.II.5: Schéma de principe du modèle de l'arbre mécanique

La (figure II.6) présente le schéma fonctionnel du modèle de la chaîne de la turbine.

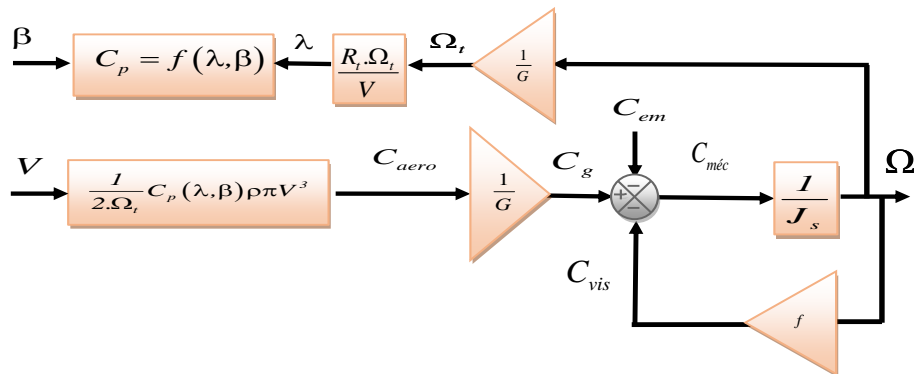


Fig.II.6: Schéma fonctionnel de l'ensemble du modèle d'éolienne

La (figure II.6) illustre comment l'éolienne utilise l'angle de pale β et la puissance cinétique P_v du vent pour produire un couple aérodynamique C_{aero} .

Le multiplicateur de vitesse transforme la vitesse mécanique Ω_g en vitesse de la turbine Ω_t et le couple aérodynamique de la turbine C_{aero} en couple multiplicateur C_g .

En divisant le couple électromagnétique C_{em} par le couple de machine disponible à la sortie du réducteur C_g , on peut obtenir la vitesse mécanique de l'arbre du générateur Ω_t .

II.2 Modélisation de la génératrice double alimentée

La modélisation de la machine électrique est une phase primordiale de son développement. La génératrice asynchrone double alimentation est un système non linéaire très complexe. Une commande performante sur cette génératrice pour ses différents régimes de fonctionnement, nécessite une modélisation mathématique plus précise pour représenter son comportement de manière satisfaisante et réelle, [45].

II.2.1 Hypothèses simplificatrices

Vu sa structure et sa géométrie complexes et afin de simplifier son étude, certaines hypothèses simplificatrices sont adoptées pour nous permettre d'acquiescer un modèle simple de la GADA et aussi proche de la réalité que possible. Ces hypothèses sont [46,47] :

- La génératrice se caractérise par une épaisseur d'entrefer constante et une géométrie symétrique.
- En raison du circuit magnétique non saturé, les flux sont caractérisés comme des fonctions linéaires des courants. Les courants de Foucault et les pertes par hystérésis ne sont pas pris en compte.
- Pour les conducteurs élémentaires, les effets de peau et d'encoches sont négligeables et la densité de courant est constante sur toute la section.
- Les coefficients d'inductances et les résistances dans les enroulements sont constants et ne sont pas affectés par la température. La position des axes magnétiques détermine les coefficients d'inductance mutuelle.
- Une répartition sinusoïdale caractérise les puissances magnétomotrices produites par le stator ou le rotor.

II.2.2 Equation mathématique de la GADA dans le repère (a, b, c)

La GADA est une machine classique avec un rotor à la fois authentique et accessible au stator. Sa conception est la même que celle de la machine asynchrone à cage, mais pour des tensions rotoriques non nulles. Il existe une représentation schématique de cette machine, où les phases sont repérées par a_s, b_s, c_s et a_r, b_r, c_r .

Les positions relatives des phases du stator et du rotor par rapport à leurs axes magnétiques sont définies par l'angle électrique θ , [48,49,50,51].

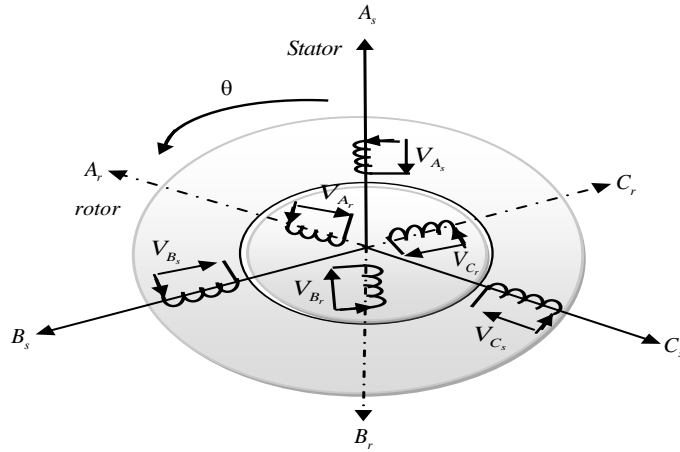


Fig.II.7: Modèle de la génératrice double alimentée

II.2.2.1 Equations électriques

Les formules de tension électrique qui contrôlent la GADA sont les suivantes, [52] :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\varphi_s] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\varphi_r] \end{cases} \quad \text{II.14.}$$

Avec

$$\begin{aligned} [V_s] &= [V_{as} \quad V_{bs} \quad V_{cs}]^T, [V_r] = [V_{ar} \quad V_{br} \quad V_{cr}]^T \\ [I_s] &= [I_{as} \quad I_{bs} \quad I_{cs}]^T, [I_r] = [I_{ar} \quad I_{br} \quad I_{cr}]^T \\ [\varphi_s] &= [\varphi_{as} \quad \varphi_{bs} \quad \varphi_{cs}]^T, [\varphi_r] = [\varphi_{ar} \quad \varphi_{br} \quad \varphi_{cr}]^T \\ [R_s] &= \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} \{ [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \} \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} \{ [M_{rs}][I_s] + [L_{rr}][I_r] \} \end{cases} \quad \text{II.15.}$$

II.2.2.2 Equations mécaniques

L'équation mécanique de la machine est représentée par la relation suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - f_v \Omega - C_r \quad \text{II.16.}$$

La relation suivante exprime le couple électromagnétique :

$$C_{em} = p [I_s]^t \frac{d}{dt} [[M_{sr}][I_r]] \quad \text{II.17.}$$

II.2.3 Transformation de Park

Une technique mathématique appelée transformation de Park permet de modifier l'angle entre l'axe du bobinage et les axes *dq* et d'appliquer un changement de variable aux courants, aux tensions et aux flux. Elle permet ainsi de développer un système d'équations à coefficients constants et de convertir un système alternatif triphasé en un système biphasé, comme illustré dans la (figure II.8), [53,54].

On utilise cette matrice orthogonale afin de convertir les enroulements triphasés de la GADA en enroulements biphasés par rapport aux axes *dq* du champ tournant.

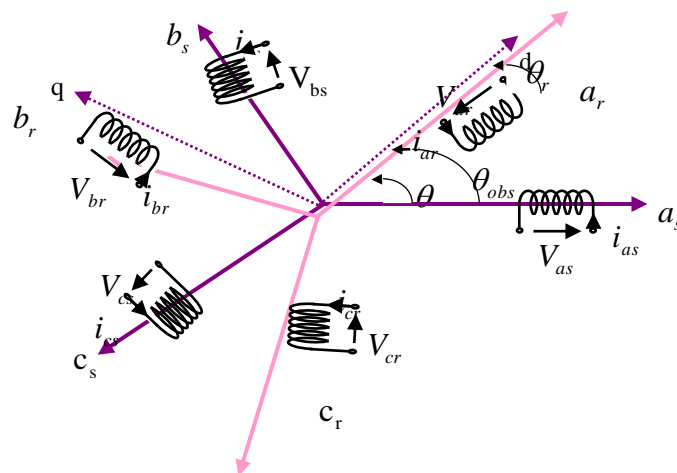


Fig.II.8: Systèmes d'axes dans l'espace électrique en forme angulaire

La transformation de Park $P(\theta)$ est illustrée par la matrice suivante:

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

et $[P(\theta)]^{-1}$ est la transformation de Park inverse représentée comme suit :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{1}{2}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{obs}) & -\sin(\theta_{obs}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta_{obs} + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_{obs} + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{II.19.}$$

Le choix adopté du référentiel de Park pour le contrôle, l'observation ou le diagnostic de la génératrice à induction dépend de l'application spécifique. En fonction du choix de ω_{obs} , les équations de flux non différentielles sont invariantes, [55,56].

Dans notre étude, la GADA est modélisée et contrôlée à l'aide de référentiel lié au champ tournant $\omega_{obs} = \omega_s$.

Après la mise en œuvre de la transformation de Park, les équations suivantes fournissent le modèle électrique générique de la génératrice asynchrone, [57]:

On distingue les tensions statoriques et rotoriques par :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{rd} \end{cases} \quad \text{II.20.}$$

Les formules des flux statorique et rotorique sont les suivantes :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad \text{II.21.}$$

Les puissances actives et réactives des stators et des rotors sont :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad \text{II.22.}$$

$$\begin{cases} P_r = V_{rd} I_{rd} + V_{rq} I_{rq} \\ Q_r = V_{rq} I_{rd} - V_{rd} I_{rq} \end{cases} \quad \text{II.23.}$$

L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = \frac{pM^2}{L_s L_r} (\varphi_{sq} I_{rd} - \varphi_{sd} I_{rq}) \quad \text{II.24.}$$

Le réseau électrique détermine la fréquence de la tension du stator, en conséquence la pulsation du courant du rotor est déterminée par :

$$\omega_r = \omega_s - p\Omega \quad \text{II.25.}$$

II.3 Modèle de la GADA avec orientation flux statorique

Le concept de contrôle est similaire à celui de (DC), où le produit du courant d'induction est proportionnel au couple et au flux d'induction. Un couple proportionnel au courant d'induit sera présent dans une machine à excitation indépendante, ce qui lui permet d'obtenir de bonnes performances. Le générateur asynchrone ne peut pas utiliser cette fonctionnalité, ce qui rend son contrôle difficile. Les génératrices asynchrones à commande s'efforcent de fournir un meilleur comportement à la fois en mode statique et en mode dynamique, en utilisant un système de contrôle similaire à celui d'une machine (DC) à excitation indépendante, où le courant induit contrôle le couple et le courant inducteur contrôle le flux, [58,59,60]

Le convertisseur de puissance réactive côté rotor permet une régulation indépendante du couple électromagnétique par contrôle vectoriel en fonction de l'orientation du flux statorique. L'optimisation de la qualité de la production d'énergie et injectée du réseau est l'un des objectifs de cette méthode, [61].

La notion de contrôle vectoriel du flux statorique orienté est représentée dans la (figure II.9).

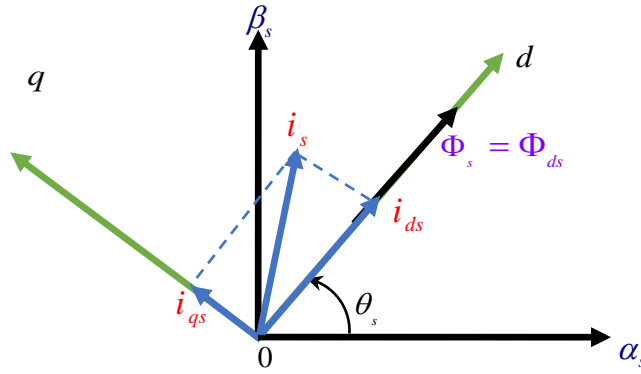


Fig.II.9: Principe du contrôle vectoriel

On peut obtenir un système d'équations utilisant un repère lié au champ tournant:

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{rd} \end{cases} \quad \text{II.26.}$$

Avec :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \varphi_s \\ \varphi_{sq} = 0 \end{cases} \quad \text{II.27.}$$

Ces équations peuvent être simplifiées comme suit :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \omega_s \varphi_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{rd} \end{cases} \quad \text{II.28.}$$

Comme l'orientation du flux du stator est supposée dans la synthèse du modèle, qui est souvent le cas pour les machines asynchrone à double alimentation de puissance moyenne et élevée, la résistance du stator R_s est ignorée. Par conséquent, les équations de tension de la machine prennent la forme ci-dessous, [62].

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \varphi_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{rd} \end{cases} \quad \text{II.29.}$$

Les équations des flux se transforment de la même façon que pour les tensions :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \varphi_s = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ 0 = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad \text{II.30.}$$

Les équations suivantes relient les courants du stator aux courants du rotor sur la base des éléments directs et en quadrature des équations du flux du stator:

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{rd} \\ I_{sq} = \frac{M}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad \text{II.31.}$$

Dans un repère diphasé, on peut représenter les puissances actives et réactives du stator d'une générateur asynchrone de la manière suivante:

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad \text{II.32.}$$

Dans notre cas ($V_{sd} = 0$), cela pour permettre la modification en utilisant le système d'axes et en simplifiant les hypothèses pour créer des équations qui se traduisent par :

$$\begin{cases} P_s = V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} \end{cases} \quad \text{II.33.}$$

En substituant les valeurs du courant du stator de l'équation (II.31) par celles de l'équation (II.33), les puissances active et réactive du stator peuvent être déterminées de la façon suivante :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{V_s M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2 M}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad \text{II.34.}$$

Le découplage de commande de la puissance du stator à la fois active et réactive est démontré par l'expression (II.34).

À l'exception d'un $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$ constant imposé par le réseau, le courant des axes du rotor d et q sera directement proportionnel à la puissance active et réactive.

En outre, les tensions de rotor peuvent être exprimées en fonction des courants de rotor. Pour ce faire, nous devons d'abord exprimer les flux rotoriques en utilisant l'équation (II.35), qui contient l'expression du courant statorique.

$$\begin{cases} \phi_{rd} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \phi_{rq} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \end{cases} \quad \text{II.35.}$$

Les expressions des tensions biphasées du rotor dans l'équation (II.29) sont ensuite intégrées à ces valeurs des flux du rotor de l'axe d et q . On obtient alors :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rd}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rq}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad \text{II.36.}$$

Nous appliquons les tensions V_{rd} et V_{rq} à la machine, ainsi que les composantes biphasées des tensions du rotor, afin d'obtenir les courants de rotor souhaités.

Où :

La puissance électromotrice, dépend de la vitesse de rotation est représentée par le terme $\left(\frac{g M V_s}{L_s} \right)$, qui est significatif puisqu'il entraîne une erreur de traînage. Ainsi, cette erreur devra être prise en compte par le contrôleur du système.

Les tensions utilisées au rotor de la machine peuvent être liées avec les puissances statoriques qu'elles produisent en utilisant les équations que nous avons déjà établies. Ainsi, le schéma fonctionnel de la GADA, qui représente le bloc à contrôler ultérieurement, peut maintenant être décrit (figure II.10) [63,64].

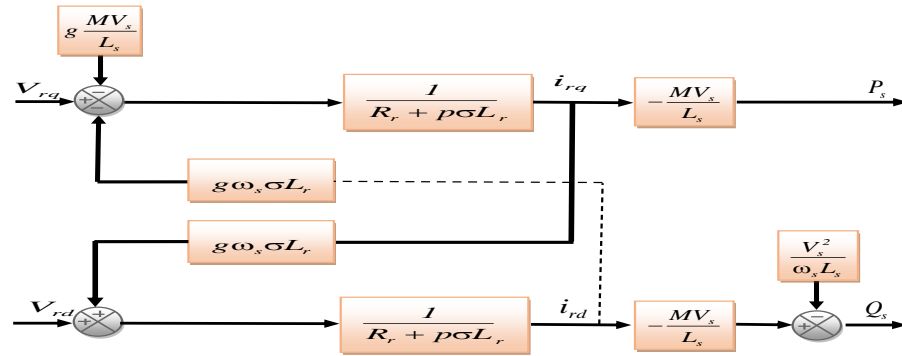


Fig.II.10: Schéma fonctionnel du GADA simplifié

Les fonctions de transfert de premier ordre pour les deux axes sont illustrées dans ce schéma, en fonction du rapport entre les puissances du stator et les tensions du rotor. Il démontre également qu'un système de commande vectoriel peut être mis en place. Chaque axe peut être commandé étant donnée de l'influence des couplages près, avec un régulateur unique pour chacun.

Ces régulateurs utiliseront la puissance active et réactive de l'axe d et q du rotor comme valeurs de référence afin d'obtenir une puissance constante du côté du stator et d'améliorer la qualité de l'énergie fournie au réseau,

Pour maintenir le coefficient de puissance optimal de l'éolienne, la puissance réactive doit être à zéro selon la valeur de consigne, tandis que la puissance active doit être assez élevée. On constate une fonction de transfert du premier ordre relie les puissances et les tensions. Étant donné que les axes peuvent être gérés séparément avec leur régulateurs propriété, et les influences des connexions resteront faibles.

L'établissement d'une commande vectorielle sera simple en étant donné du faible glissement.

Ainsi, la puissance de cette machine peut être commandée de deux façons, [64] :

- La méthode initiale consiste à installer un régulateur séparé sur chaque axe pour gérer la puissance réactive et active, en négligeant les règles de couplage.

Nous appellerons **méthode directe** car les régulateurs de puissance gèrent directement les tensions du rotor de la machine.

- Le système à deux boucles est utilisé pour compenser les termes de couplage, ce qui permet de contrôler les puissances et les courants du rotor. Cela est connu sous le nom de **méthode indirecte**.

La méthode directe est facile à réaliser, tandis que la méthode indirecte est plus compliquée à exécuter mais présente l'avantage de gérer les courants du rotor, en limitant ces courants, on protège la machine.

II.3.1 Commande Directe des Puissances Active et Réactive

Pour contrôler les puissances active P_s et réactive Q_s du stator produites par rapport à celles des références de manière directe et indépendante, cette méthode utilise un seul contrôleur sur chaque axe. Les régulateurs PI corrigent les erreurs de puissance par des tensions de commande. La figure suivante illustre la structure de contrôle des puissances, [65,66]. Cependant, les conditions de couplage des deux axes de contrôle seront ignorées.

$$\left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right).$$

Comme le montre la (figure II.11), la commande vectorielle est obtenue en utilisant un seul régulateur par axe.

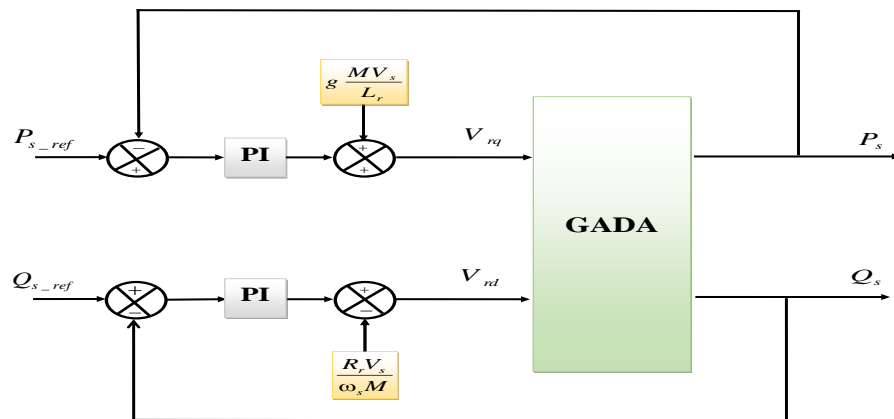


Fig.II.11: Schéma de commande directe des puissances active et réactive

En raison de ses avantages, notamment une meilleure robustesse aux perturbations internes ou externes (rapidité, simplicité...), la commande vectorielle en puissances actives et

réactives de la génératrice de la GADA doit être réalisée avec des régulateurs proportionnels intégraux PI. L'écart de chaque axe doit être annulé entre la puissance active et réactive mesurée et de référence.

II.3.2 Résultats de simulation

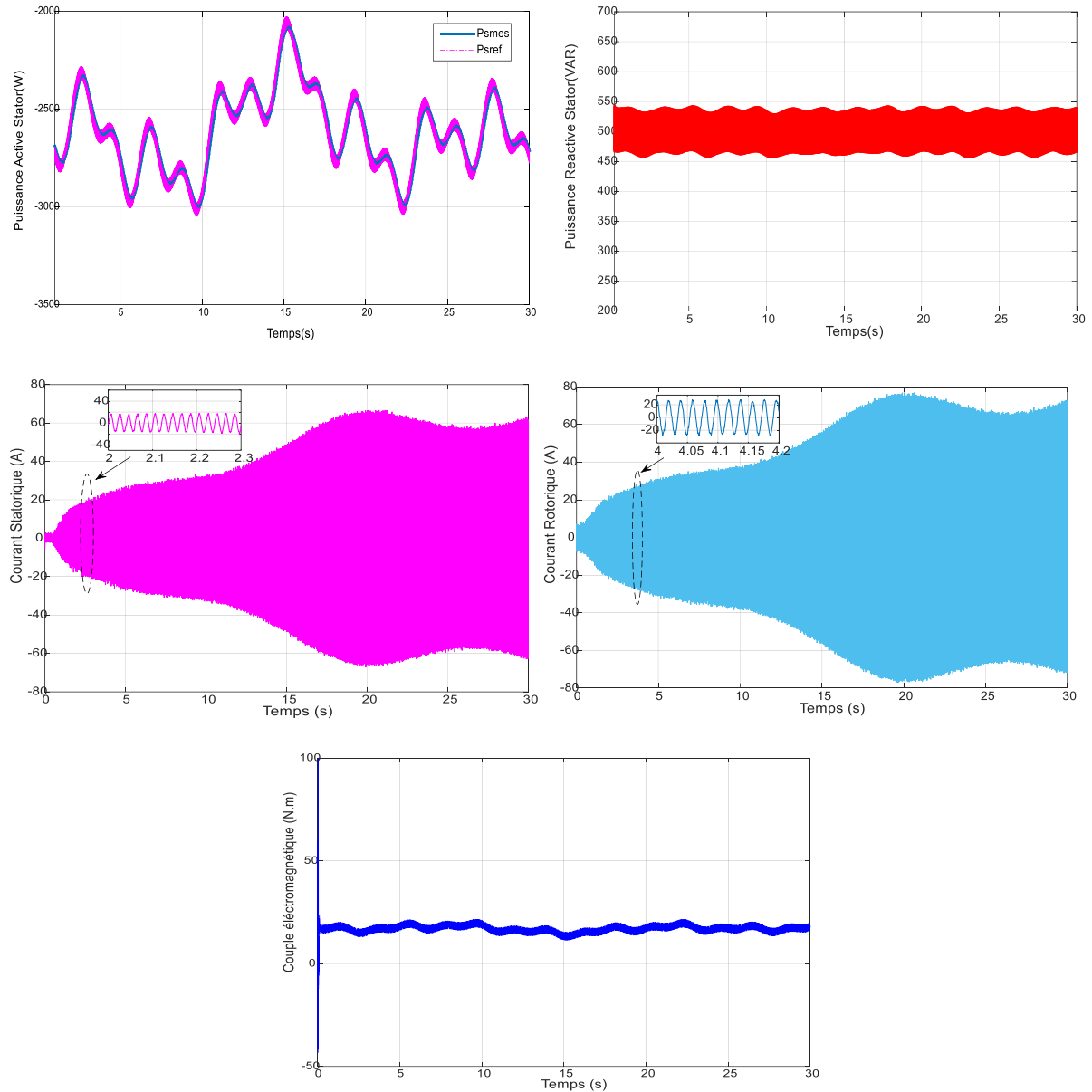


Fig.II.12: Allures des : a) Puissance active du stator, b) Puissance réactive du stator, c) Courant du stator, d) Courant du rotor, e) Vitesse de rotation, f) Couple électromagnétique.

Selon les résultats de la simulation, le générateur suit bien les échelons de puissance active et réactive du stator, qu'il réagit rapidement et qu'il évite les dépassements.

En revanche, la méthode directe présente un impact minimal sur le couplage entre les axes de commande (dq) car en ignorant les termes de couplage, le modèle GADA a été simplifié avec des faibles oscillations. Grâce à la régulation de la puissance réactive, nous avons la possibilité d'obtenir soit une puissance réactive positive (comportement inductif), soit une puissance réactive négative (comportement capacitif).

Cependant, la GADA fonctionne toujours en mode générateur, car la puissance active reste négative. D'après les courants sinusoïdaux du stator et du rotor illustrés dans la (figure II.12), il est évident que la GADA fournit ou absorbe sa propre énergie sans harmoniques.

En outre, il est évident que le couple électromagnétique est identique à la puissance active, ou qu'il est directement lié à celle-ci.

Nous pouvons arriver à la conclusion que le couple électromagnétique produit la puissance réactive et que l'excitation du circuit du rotor produit la puissance active.

II.4 Commande Indirecte des Puissances Active et Réactive

Deux structures basé sur cette méthode: la première utilise une boucle de régulation du courant, tandis que la seconde s'appuie sur la première et y ajoute une boucle de régulation de la puissance.

II.4.1 Commande indirecte sans boucle de puissance

Comme la commande précédente, cette commande n'offre pas la possibilité de contrôler de manière autonome et directe les puissances actives et réactives du stator générées par rapport à celles de référence, mais elle repose sur la régulation indirecte des courants de rotor mesurés, qui est soumis aux courants de référence préétablis par les puissances de référence du stator de la génératrice, [66].

$$\begin{cases} I_{rd_{ref}} = -\frac{L_s}{V_s M} P_{s_{ref}} \\ I_{rq_{ref}} = \frac{V_s}{\omega_s M} - \frac{L_s}{V_s M} Q_{s_{ref}} \end{cases} \quad \text{II.37.}$$

Les tensions de commande sont contrôlées par les régulateurs PI pour corriger les erreurs de puissance. Ensuite, la structure de contrôle est présentée par la (figure II.13) .

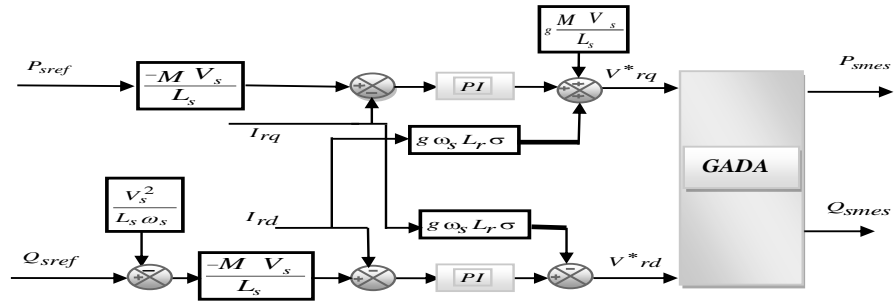


Fig.II.13: Schéma de commande indirecte sans boucle de puissance.

II.4.2 Résultats de simulation

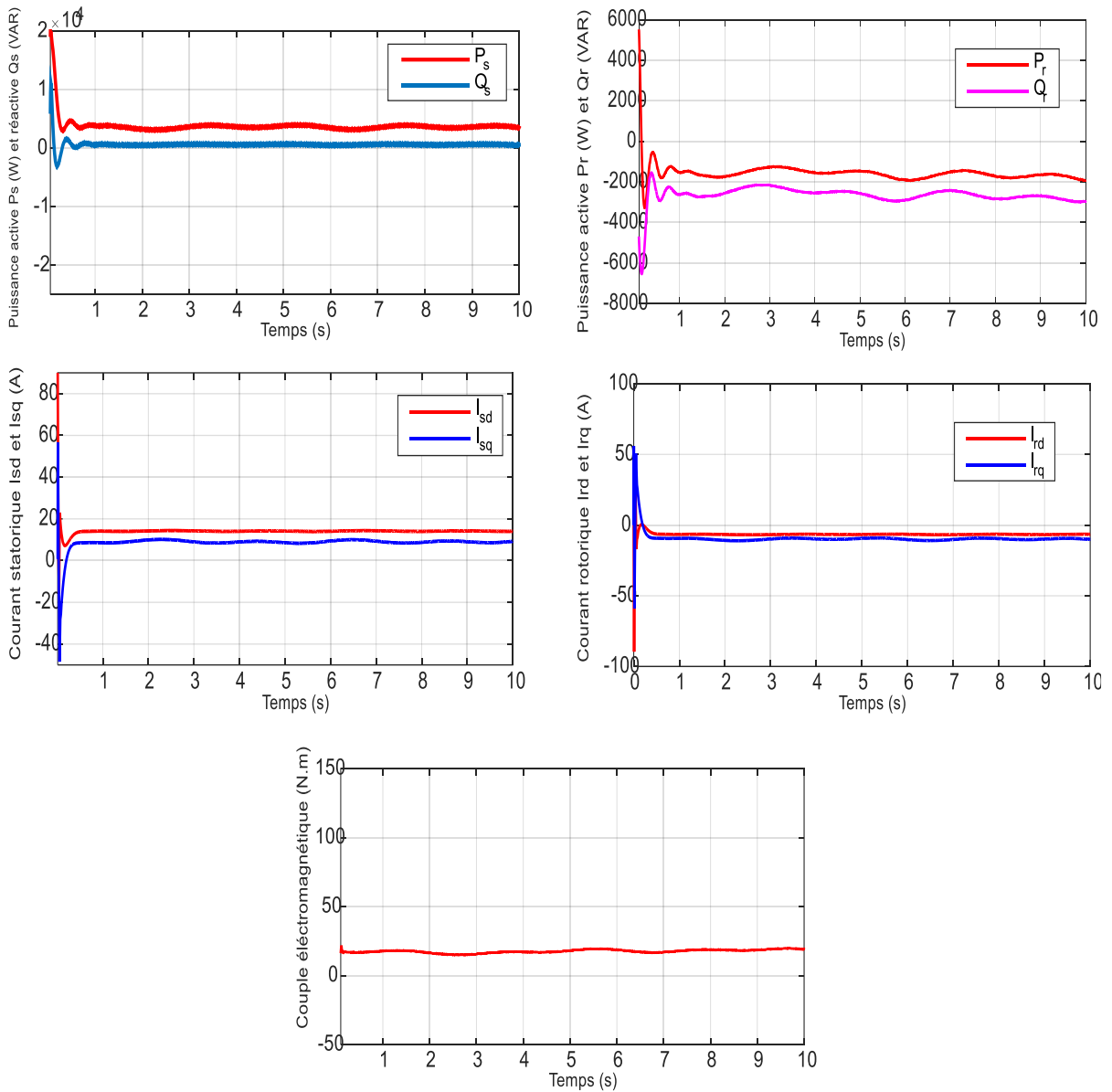


Fig.II.14: Allures de : a) Puissance active du stator, b) Puissance réactive du stator, c) Courant du stator, d) Courant du rotor, f) Couple électromagnétique

Les résultats de simulation de cette régulation sur MATLAB sont effectués le contrôle de la puissance réactive en termes de dynamique et de réponse à l'échelon. Lorsque la puissance active est faible, une erreur de puissance réactive peut être détectée.

Mais comme il n'y a qu'une seule boucle sur les courants dans cette régulation, la puissance active et réactive présente une erreur statique, ce qui signifie que les puissances sont conservées en boucle ouverte. La génératrice possède un couple électromagnétique différent du couple de la turbine, qui est influencé par la vitesse du vent. Étant donné que le stator de la GADA est connecté à une tension d'alimentation idéale (300V, 50Hz), le courant du stator varie également en fonction de la variance du vent.

II.4.3 Commande indirecte avec boucle de puissance

Pour nous permettre l'amélioration de la commande précédente sur chaque axe nous mettons mise en établir deux boucles de régulation pour chaque axe sont clairement identifier dans le schéma bloc présenté dans la (figure II.15), l'un régule la puissance et la deuxième régule le courant, chacune avec un régulateur proportionnel intégral, [66].

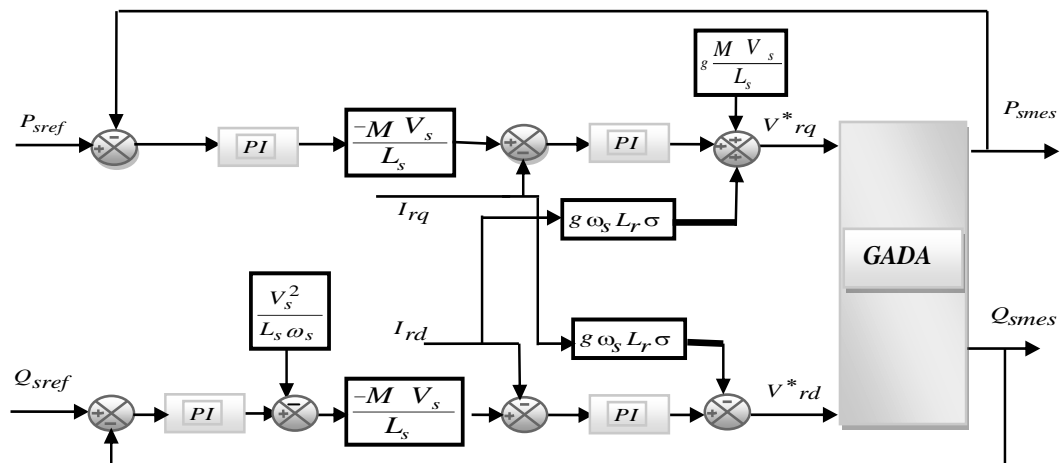


Fig.II.15: Schéma de commande indirecte avec boucle de puissance

II.4.4 Résultats de simulation

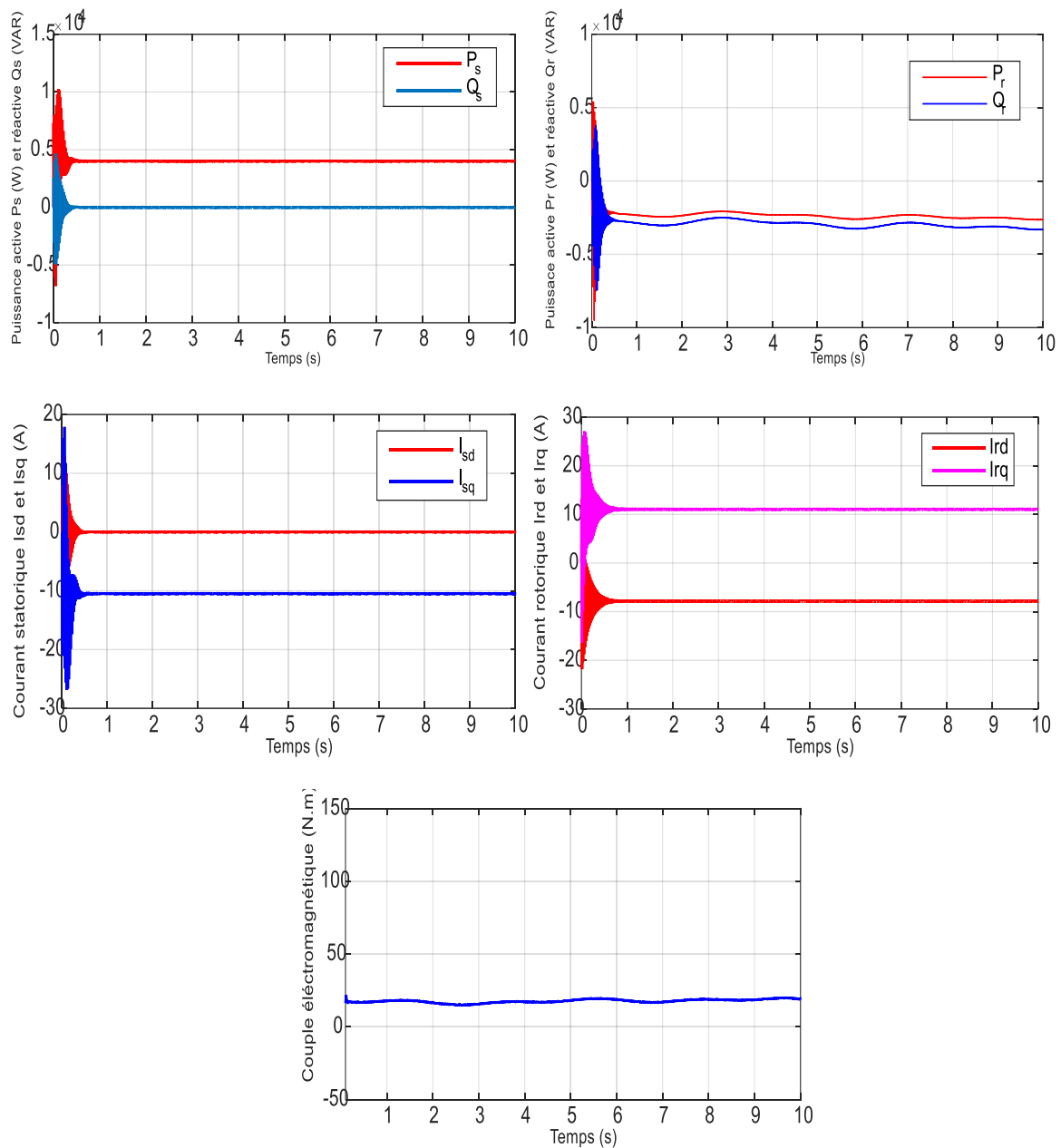


Fig.II.16: Allures de : a) Puissance active du stator, b) Puissance réactive du stator, c) Courant du stator, d) Courant du rotor, f) Couple électromagnétique

La performance de cette commande est supérieure que celle du contrôle direct, qui a provoqué des perturbations supplémentaires entre les deux puissances. En outre, une réduction des courants de rotor de la machine en fixant une limite dans la boucle de courant pour le contrôle indirecte avec retour de puissance. Il est nécessaire d'avoir six capteurs de courant : trois pour la mesure de la puissance du stator et trois en combinaison avec trois capteurs de tension pour contrôler les courants du rotor.

Le contrôle général de l'éolienne utilisera également ces puissances pour déterminer les références de puissance de l'unité de stockage. En ce qui concerne les capteurs de courant rotorique, ils sont destinés à protéger la GADA contre les sur intensité.

II.5 Commande robuste basée sur la théorie de Lyapunov de la GADA

Les performances de la commande GADA sont améliorées grâce à l'utilisation de la commande vectorielle de la machine avec linéarisation du retour d'état non linéaire.

La commande est synthétisée en utilisant un contrôleur en mode glissant et une approche de Lyapunov. Elle garantit que la composition de commande est robuste vis-à-vis des bruits de mesures et des variations paramétriques, la sélection de la fonction de Lyapunov garantit la stabilité asymptotique globale du système.

La transformation du modèle de la GADA dans le référentiel lié au champ tournant est illustrée par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \vec{V}_s = R_s \vec{I}_s + \frac{d\vec{\varphi}_s}{dt} + j\omega_s \vec{\varphi}_s \\ \vec{V}_r = R_r \vec{I}_r + \frac{d\vec{\varphi}_r}{dt} + j\omega_r \vec{\varphi}_r \end{cases} \quad \text{II.38.}$$

Les équations du flux et du courant peuvent être exprimées à l'aide de l'équation (II. 39).

$$\begin{cases} \vec{I}_s = \gamma \vec{\varphi}_s + \lambda \vec{\varphi}_r \\ \vec{I}_r = \chi \vec{\varphi}_r + \lambda \vec{\varphi}_s \end{cases} \quad \text{II.39.}$$

Avec :

$$\gamma = \frac{1}{\sigma L_s}, \lambda = \frac{1}{\sigma L_s L_r}, \chi = \frac{1}{\sigma L_s}$$

Le modèle d'état tout-flux est représenté par les équations suivantes, qui sont issues de l'égalisation des composantes réelles et imaginaires:

$$\begin{cases} V_{sd} = \gamma_1 \varphi_{sd} - \gamma_2 \varphi_{rd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} = -f_1 + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} \\ V_{sq} = \gamma_1 \varphi_{sq} - \gamma_2 \varphi_{rq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} = -f_2 + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} \\ V_{rd} = -\gamma_3 \varphi_{sd} + \gamma_4 \varphi_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} = -f_3 + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} \\ V_{rq} = -\gamma_3 \varphi_{sq} + \gamma_4 \varphi_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} = -f_4 + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} \end{cases} \quad \text{II.40.}$$

Avec :

$$\gamma_1 = \frac{1}{\sigma T_s}, \gamma_2 = \frac{M}{\sigma T_s L_r}, \gamma_3 = \frac{M}{\sigma T_r L_s}, \gamma_4 = \frac{1}{\sigma T_r},$$

$$\begin{cases} -f_1 = \gamma_1 \varphi_{sd} - \gamma_2 \varphi_{rd} - \omega_s \varphi_{sq} \\ -f_2 = \gamma_1 \varphi_{sq} - \gamma_2 \varphi_{rq} + \omega_s \varphi_{sd} \\ -f_3 = -\gamma_3 \varphi_{sd} + \gamma_4 \varphi_{rd} - \omega_r \varphi_{rq} \\ -f_4 = -\gamma_3 \varphi_{sq} + \gamma_4 \varphi_{rq} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad \text{II.41.}$$

La réécriture de l'équation (II.41) donne :

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{sd}}{dt} = f_1 + V_{sd} \\ \frac{d\varphi_{sq}}{dt} = f_2 + V_{sq} \\ \frac{d\varphi_{rd}}{dt} = f_3 + V_{rd} \\ \frac{d\varphi_{rq}}{dt} = f_4 + V_{rq} \end{cases} \quad \text{II.42.}$$

Considérons la tension du stator indiquée comme suit sur l'axe dq

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s \end{cases} \quad \text{II.43.}$$

On obtient les formules pour la puissance active et réactive statorique comme suit:

$$\begin{cases} P_s = V_s (\lambda \varphi_{rq} + \gamma \varphi_{sq}) \\ Q_s = V_s (\lambda \varphi_{rd} + \gamma \varphi_{sd}) \end{cases} \quad \text{II.44.}$$

Choisisant une fonction de Lyapunov:

$$V_1 = \frac{1}{2} (P_s - P_{s_{ref}})^2 + \frac{1}{2} (Q_s - Q_{s_{ref}})^2 > 0 \quad \text{II.45.}$$

La dérivée de cette fonction est:

$$V_1^g = (P_s - P_{s_{ref}}) (P_s^g - P_{s_{ref}}^g) + (Q_s - Q_{s_{ref}}) (Q_s^g - Q_{s_{ref}}^g) \quad \text{II.46.}$$

En substituant les équations (II.45) et (II.46) à l'équation (II.47), on obtient :

$$V_1^g = (P_s - P_{s_{ref}}) (\alpha_1 + \lambda V_s V_{rq} - P_{s_{ref}}^g) + (Q_s - Q_{s_{ref}}) (\alpha_2 + \lambda V_s V_{rd} - Q_{s_{ref}}^g) \quad \text{II.47.}$$

Avec : $\alpha_1 = \lambda V_s V_4 + \gamma (f_2 + V_s)$, $\alpha_2 = \lambda V_s V_3 + \gamma f_1$

L'équation (II.47) peut être clairement négative si la loi de contrôle est:

$$\begin{cases} V_{rd} = \frac{1}{\lambda V_s} \left(-\alpha_2 + Q_{s_{ref}}^g - K_2 (Q_s - Q_{s_{ref}}) \right) \\ V_{rq} = \frac{1}{\lambda V_s} \left(-\alpha_1 + P_{s_{ref}}^g - K_1 (P_s - P_{s_{ref}}) \right) \end{cases} \quad \text{II.48.}$$

Le remplacement de l'équation (II.48) dans l'équation (II.47) donne :

$$V_1^g = K_1 (P_s - P_{s_{ref}})^2 - K_2 (Q_s - Q_{s_{ref}})^2 < 0 \quad \text{II.49.}$$

Si tous les gains $K_i = (i=1,2)$ sont positifs, c'est-à-dire si l'équation (II.49) est asymptotiquement stable, autrement dit:

$$\begin{cases} \lim_{x \rightarrow \infty} (Q_s - Q_{s_{ref}}) = 0 \\ \lim_{x \rightarrow \infty} (P_s - P_{s_{ref}}) = 0 \end{cases}$$

II.5.1 Commande robuste

Selon la théorie de Lyapounov, une loi de contrôle robuste de retour d'état non linéaire est créée pour résoudre les problèmes d'incertitudes du modèle liés au bruit de mesure et à la variation des paramètres de la machine.

Les fonctions (f_i, α_i) sont généralement non linéaires s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} f_i = \hat{f}_i + \Delta f_i \\ \alpha_i = \hat{\alpha}_i + \Delta \hat{\alpha}_i \end{cases} \quad \text{II.50.}$$

En substituant l'équation (II.50) par celle (II.42), on obtient:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{sd}}{dt} = \hat{f}_1 + \Delta f_1 + V_{sd} \\ \frac{d\varphi_{sq}}{dt} = \hat{f}_2 + \Delta f_2 + V_{sq} \\ \frac{d\varphi_{rd}}{dt} = \hat{f}_3 + \Delta f_3 + V_{rd} \\ \frac{d\varphi_{rq}}{dt} = \hat{f}_4 + \Delta f_4 + V_{rq} \end{cases} \quad \text{II.51.}$$

La loi de contrôle robuste avec le contrôle en mode glissant et la linéarisation du retour d'état est décrite ci-dessous :

$$\begin{cases} V_{rd} = \frac{1}{\lambda V_s} \left(-\alpha_2 + Q_{sref}^g - K_2 (Q_s - Q_{sref}) - K_{22} \operatorname{sgn}(Q_s - Q_{sref}) \right) \\ V_{rq} = \frac{1}{\lambda V_s} \left(-\alpha_1 + P_{sref}^g - K_1 (P_s - P_{sref}) - K_{11} \operatorname{sgn}(P_s - P_{sref}) \right) \end{cases} \quad \text{II.52.}$$

Où $K_{ii} \geq \beta_i, K_{ii} > 0$

La dérivée de la fonction de Lyapunov (II.47) est associée à la dynamique des puissances statoriques actives et réactives de la manière suivante :

$$\begin{aligned} V_2^g = & (P_s - P_{sref}) \left(\Delta\alpha_1 - K_{11} \operatorname{sgn}(P_s - P_{sref}) \right) \\ & + (Q_s - Q_{sref}) \left(\Delta\alpha_2 - K_{22} \operatorname{sgn}(Q_s - Q_{sref}) \right) + V < 0 \end{aligned} \quad \text{II.53.}$$

Par conséquent, il est possible d'assurer la stabilité du système en absorbant les variations et uniquement si les conditions suivantes sont satisfaites :

$$\begin{cases} K_{11} = |\Delta\alpha_1| \\ K_{22} = |\Delta\alpha_2| \end{cases} \quad \text{II.54.}$$

Finalement, On peut écrire : $V_1^g < V_2^g < 0$

Pour chaque variation Δf_i , la stabilité de la méthode de commande est assurée par la loi de contrôle fournie par l'équation (II.52). La conception robuste du contrôleur qui en résulte est représentée sur la (figure II.17).

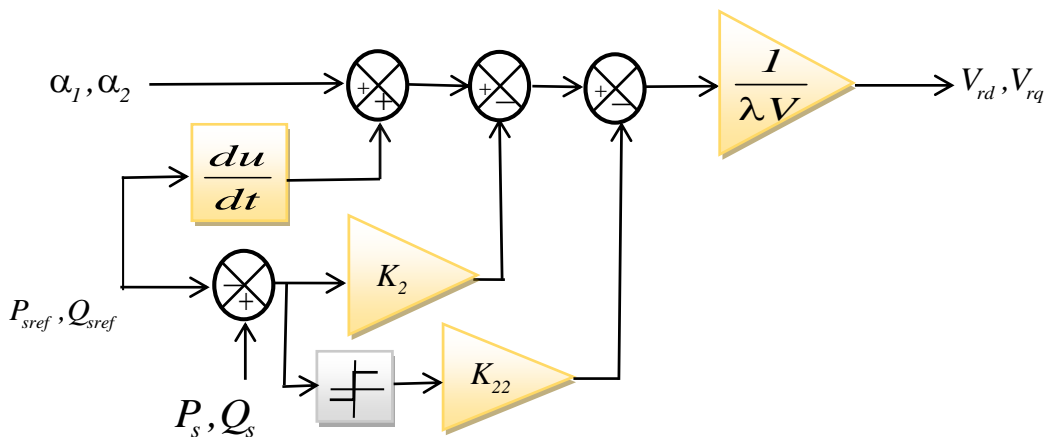


Fig.II.17: Diagrammes de conception de contrôleurs robustes

II.5.2 Résultats de simulation

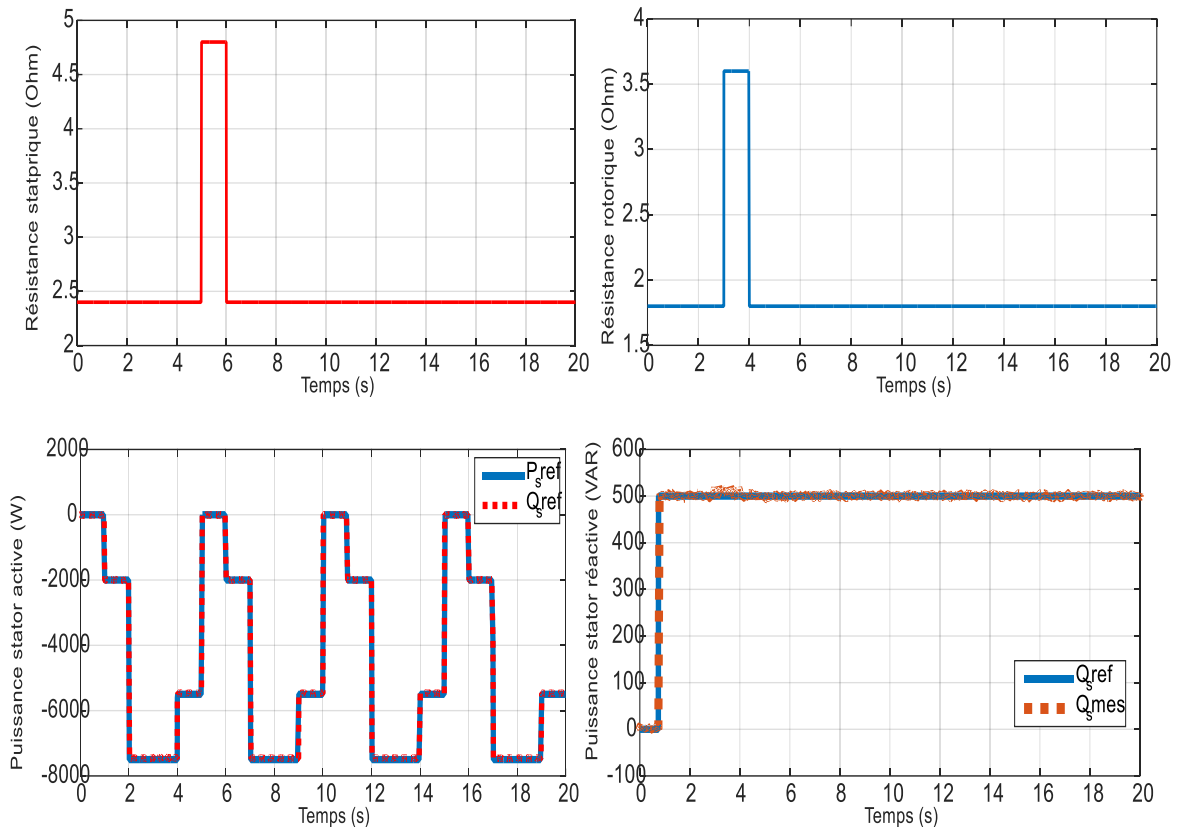


Fig.II.18: Allures des grandeurs à contrôler a) Résistance statorique, b) Résistance rotorique c) Puissance active statorique, d) Puissance réactive statorique

Il convient de noter que le test de suivi est garanti en maintenant les puissances réactives et actives du stator à leurs points de consigne, ce qui garantit des réponses rapides et précises. Le régulateur à mode glissant utilisant la théorie de Lyapunov fonctionne de manière satisfaisante, car les fluctuations des résistances rotorique et statorique ne perturbent pas la stabilité de la structure de la commande.

II.6 Conclusion

On a présenté dans ce chapitre, le contrôle et la modélisation d'un générateur asynchrone à double alimentation qui constitue la base du système de conversion éolienne.

En contrôlant la puissance active et réactive du stator, on utilise la commande MPPT de la turbine afin d'obtenir la puissance maximale produite par du générateur.

Les résultats de la simulation obtenus en utilisant Matlab/Simulink et en mettant en œuvre trois stratégies de contrôle différentes pour le générateur asynchrone à double alimentation (GADA) qui sont : méthode directe pour mesurer et comparer les puissances

active et réactive avec leurs références, méthode de puissance indirecte sans boucles qui utilise des courants rotoriques et la troisième méthode est avec boucles de puissance ajoutée à deux boucles de puissance afin d'améliorer le suivi de consigne de la commande indirecte sans boucles de puissance.

Pour assurer une robustesse vis-à-vis des perturbations potentielles, on a introduit une méthode de commande non linéaire robuste basée sur la théorie de Lyapunov et combinée à un contrôleur mode glissant GADA intégré au réseau.

Les résultats montrent une stabilité du système aux incertitudes paramétrique et des bonnes performances de la technique de contrôle.

Chapitre III

**Architecture et méthodes de
recherche du point maximum
de puissance**

Introduction

L'efficacité du système éolien repose sur un fonctionnement à une vitesse de rotation optimale des pales de l'éolienne. Cette vitesse change en fonction de la vitesse de vent, ce qui nécessite de réguler la vitesse de rotation de la turbine pour se placer au point de fonctionnement optimal. Les processus de recherche du point de fonctionnement optimal sont appelés MPPT (Maximum Power Point Tracking, [67]).

Les techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) sont des systèmes qui permettent d'extraire la puissance maximale du générateur. Cette puissance maximale change en fonction de certaines variables telle que la vitesse du vent du générateur éolien et la température. Les techniques MPPT sont généralement insérées aux convertisseurs de puissance, le plus souvent sont des convertisseurs DC-DC et qui génèrent des signaux de commande permettant d'avoir des paramètres optimaux correspondant à la puissance maximale [68,69].

Dans ce chapitre, on présente une étude théorique de 04 techniques MPPT destinées au système éolien qui sont : le contrôle de la vitesse spécifique TSR, le contrôle du Feedback de la puissance PSF, la méthode HCS (P&O) et celle basée sur la logique floue (Fuzzy Logic Control (FLC)). Des tests de simulation sont utilisés pour faire une évaluation des performances des deux dernières stratégies par comparaison des évolutions de certaines grandeurs.

III.1 Stratégie de maximisation de la turbine éolienne

La figure III.1 présente les zones de fonctionnement des turbines à vitesse variable [70],

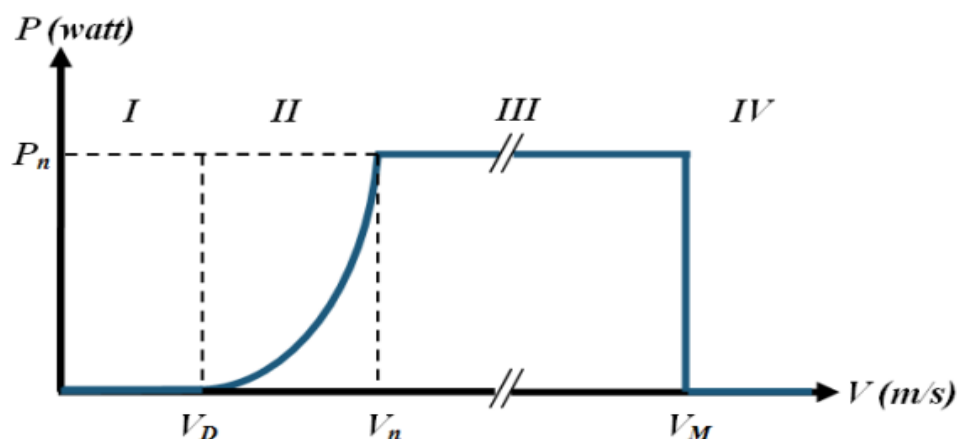


Fig.III.1 Zones de fonctionnement des turbines à vitesse variable

- ❖ **Zone 1** : Lorsque la vitesse du vent est inférieure à la vitesse initiale de l'éolienne, cela signifie que le vent souffle moins vite que la vitesse de démarrage V_D , de ce fait, aucune énergie n'est produite par la turbine dans cette situation.
- ❖ **Zone 2** : Une vitesse minimale V_n du vent est atteinte afin de pouvoir démarrer l'éolienne qui fonctionnera à son efficacité maximale consommant autant d'énergie que possible pour suivre le vent jusqu'à ce que la vitesse nominale V_n soit atteinte et qui correspond à la puissance nominale P_n , [71].
- ❖ **Zone 3** : La puissance mécanique et la vitesse du vent sont maintenues constantes (valeurs nominales). Cela peut éviter que l'éolienne ne se détériore lorsque les vitesses hautes sont atteintes par le vent dépassant sa vitesse initiale. Ces contraintes pourraient être appliquées par exemple : faire tourner les pales de l'éolienne dans une certaine direction pour réduire le rendement (augmenter le pitch contrôle β),[71].
- ❖ **Zone 4** : Le système d'arrêt d'urgence permet d'arrêter l'éolienne afin de sauvegarder son système de fonctionnement et 'éviter d'être endommagée si la vitesse du vent est supérieur de celle de l'éolienne.

La puissance optimale d'un aérogénérateur est extrêmement non linéaire et en forme de cloche. La puissance maximale à chaque vitesse de vent doit être déterminée par le système, ce qui nécessite de rechercher la vitesse de rotation optimale. Pour observer précisément le meilleur fonctionnement possible du système éolien, il est nécessaire de réaliser cette courbe. Il est essentiel d'utiliser une commande spécifique appelée MPPT dans la (zone II) afin d'atteindre cet objectif.

La stratégie de cette approche de contrôle est d'optimiser la production d'électricité en faisant varier la vitesse mécanique grâce au contrôle du couple électromagnétique.

Nous identifions deux stratégies possibles, [72] :

- La commande avec asservissement de la vitesse.
- La commande sans asservissement de la vitesse.

III.1.1 Commande MPPT avec asservissement de la vitesse

Le vent est responsable des variations de puissance dans la chaîne de conversion éolienne, qui composent la principale perturbation. Le processus de maximisation de l'extraction d'énergie

implique de mesurer la vitesse de la turbine, qui autorise de produire l'énergie maximale générée. Afin que la vitesse de rotation de l'arbre de la GADA est réglée à une vitesse de référence, il faut modifier le couple électromagnétique appliquée à l'arbre.

La (figure III.2) indique qu'un asservissement de la vitesse de GADA [73].

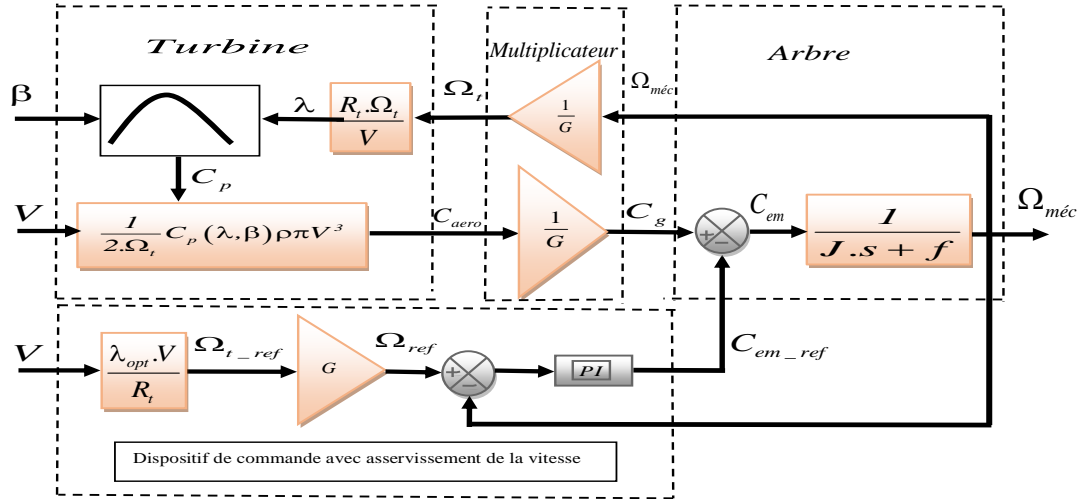


Fig.III.2 Commande avec asservissement de la vitesse

La vitesse de référence de GADA est donnée par l'équation (III.1).

$$\Omega_{ref} = G\Omega_t \tag{III-1}$$

G : Gain du multiplicateur.

Afin d'atteindre la valeur optimale du $C_{p_{max}}$, on peut écrire que la valeur idéale de la vitesse spécifique λ_{opt} convient à la référence de la vitesse de la turbine :

$$\Omega_{t_{ref}} = \frac{\lambda_{opt} V}{R} \tag{III-2}$$

Le régulateur de vitesse émet une sortie, on trouve le couple électromagnétique de référence $C_{em_{ref}}$ qui permet à la vitesse Ω_{mec} d'atteindre sa référence $\Omega_{em_{ref}}$. Ainsi, il est possible de réguler la vitesse de rotation et diminuer l'impact du couple C_{mec} envisagé comme une perturbation en utilisant un régulateur de type Proportionnel Intégral (PI), [74,75].

III.1.2 Commande MPPT sans asservissement de la vitesse

Pour établir cette structure de commande, il est nécessaire d'émettre l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent car une fausse mesure de la vitesse conduit donc à imposer une consigne non adaptée d'où une dégradation de la puissance captée[76].

Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, il est possible d'annuler le couple d'accélération de l'éolienne et on obtient l'équation décrivant le régime permanent de l'aérogénérateur :

$$\left(\frac{J_t}{G^2} + J_{mec}\right) + f_v \cdot \Omega_{mec} = C_{mec} - C_{em} \quad (\text{III-3})$$

En outre, si l'on ignore la contribution du couple de frottement visqueux ($f_v \cdot \Omega_{mec} = 0$), nous pouvons écrire:

$$C_{mec} = C_{em} \quad (\text{III-4})$$

Comme indiqué précédemment, la mesure de la vitesse de rotation permet d'obtenir une estimation de la vitesse de la turbine Ω_{t_est}

$$\Omega_{t_est} = \frac{\Omega_{opt}}{G} \quad (\text{III-5})$$

Étant donné que la vitesse de la turbine est difficile à déterminer, on peut s'en faire une approximation de V_{est} en estimant la vitesse de la turbine.

$$V_{est} = \frac{R\Omega_{t_est}}{\lambda} \quad (\text{III-6})$$

Les estimations de la vitesse de l'éolienne peuvent ensuite être utilisées pour déterminer le couple de l'éolienne. On peut l'articuler ainsi :

$$C_{t_est} = C_p \frac{\rho S}{2} \frac{1}{\Omega_{t_est}} V_{est}^3 \quad (\text{III-7})$$

L'évaluation du couple éolien est utilisée pour calculer le couple électromagnétique de référence.

$$C_{em_ref} = \frac{C_{t_est}}{G} \quad (\text{III-8})$$

Afin d'obtenir la puissance maximale et le coefficient de puissance maximum $C_{p\max}$, il est nécessaire de régler la vitesse relative à sa valeur optimale λ_{opt} . Ainsi, on peut représenter le couple électromagnétique utilisé comme référence par :

$$C_{em_ref} = \frac{C_{p\max} \rho \pi R^5}{2G^3 \lambda_{opt}^3} \Omega_{mec}^2 \tag{III-9}$$

Le couple électromagnétique MPPT correspond au carré de la vitesse de rotation de la GADA dans la zone de fonctionnement étudiée (Zone II).

La (figure III.3) présente un schéma fonctionnel intègre la fonction de contrôle MPPT de l'éolienne sans asservissement de la vitesse.

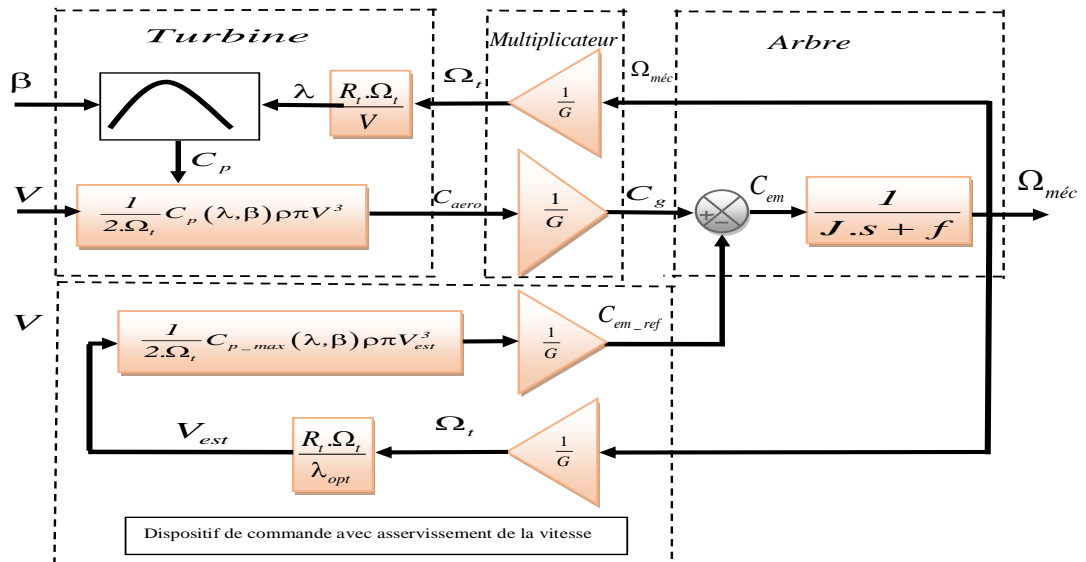


Fig.III.3 Commande sans asservissement de la vitesse

Pour le choix d'une technique MPPT à utiliser dans un système électrique, on a besoin d'établir une analyse minutieuse du comportement global du système de ses étapes de variation et de son temps de réponse, [76,77].

Quatre catégories s'appliquent aux algorithmes MPPT pour les systèmes afin de convertir l'énergie éolienne "WECS" :

- La commande de vitesse spécifique TSR. "Tip Speed Ratio".
- La commande par retour de puissance PSF "Power Signal Feedback".
- La technique HCS "Hill-Climb Search".

- La commande optimal torque “OT”.

III.1.3 Le contrôle TSR

La méthode de contrôle TSR permet de réguler la vitesse de la turbine afin d'optimiser la puissance de l'éolienne et de conserver une vitesse spécifiée à la valeur λ_{opt} , l'utilisation de cette méthode nécessite la connaissance du TSR optimale qui peut être obtenu expérimentalement ou théoriquement, ainsi que la vitesse de l'éolienne pour déterminer le point de puissance maximale. La dépendance à l'égard de calculer la vitesse du vent est le principal inconvénient de cette méthode. L'anémomètre accroît le coût du système et fournit une qualité d'image du vent, ce qui rend son application pratique difficile.

L'obtention du rapport de vitesse λ_{opt} est un inconvénient qui varie en fonction du système à l'autre. Le contrôleur reçoit cette différence et l'utilise pour créer des signaux de commande basés sur le TSR optimale et sa valeur réelle. Grâce à ces signaux le générateur peut fonctionner à sa vitesse maximale, ce qui correspond à sa plus grande puissance. Le schéma fonctionnel général d'un système éolien contrôlé par le TSR est présenté par la (figure III.4), [78].

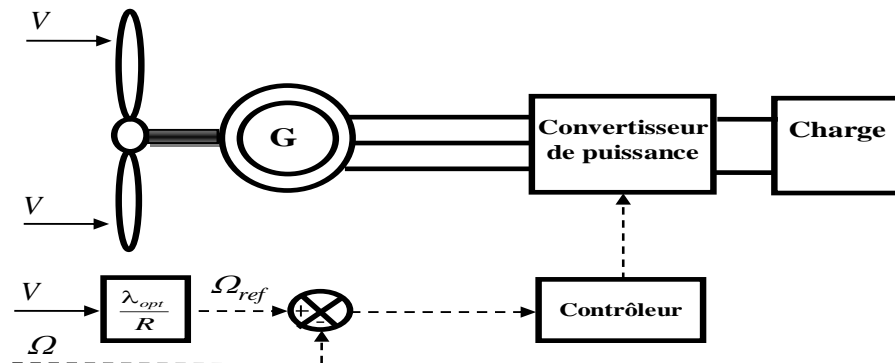


Fig.III.4 Schéma fonctionnel d'un système éolien à contrôle TSR

III.1.4 Le contrôle optimal torque (OT)

Le couple du générateur dans cette approche est optimisé pour produire la valeur de coefficient de puissance maximum. Ainsi, l'efficacité énergétique maximale sans utiliser de capteur de vitesse du vent, le contrôle du couple permet d'approcher rapidement des performances maximales grâce à des mesures simples. Cependant, la courbe de puissance maximale de l'éolienne est nécessaire pour cette commande.

Cette dépendance entraîne, un surcôt du système et des obstacles à mettre en œuvre de ces techniques. Il est possible de trouver les points de fonctionnement sans connaître leurs caractéristiques.

III.1.5 Le contrôle PSF

Pour maximiser la puissance de sortie, un signal de puissance de référence est produit par le contrôle PSF. Cependant, la courbe de puissance maximale de l'éolienne doit être connue qui pourrait être déterminée grâce à des simulations ou à des résultats expérimentaux.

Une puissance de référence est calculée en utilisant l'équation de la puissance mécanique ou la courbe de puissance maximale enregistrée, avec la vitesse du rotor ou du vent comme informations d'entrée. Pour garantir que le coefficient de puissance est toujours à sa valeur la plus élevée, la technique de contrôle PSF modifie la puissance de la turbine pour la maintenir à ce niveau.

La (figure III.5) présente le schéma fonctionnel global d'un système éolien avec une commande PSF, [79].

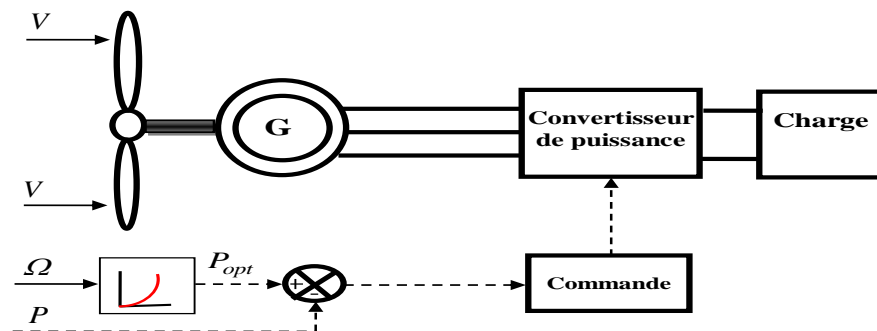


Fig.III.5 Schéma fonctionnel d'un système éolien à contrôle PSF

III.1.6 Le contrôle HCS

Le concept de la méthode HCS (Hill-Climb Search) est de rechercher en permanence la puissance optimale en adaptant la vitesse de rotation. Cette méthode présente un grand avantage, car elle ne nécessite aucune compréhension de la génératrice, des caractéristiques de la turbine, du vent ou de l'électronique de puissance. Selon l'emplacement du point de fonctionnement de la courbe $C_p(\lambda)$, soit il est situé à gauche ou à droite du point de fonctionnement, la chaîne de conversion récupère une certaine quantité de puissance en introduisant une perturbation dans le point de consigne du régulateur de vitesse de la turbine. Puis, la direction à prendre pour se

rapprocher du MPP peut alors être déterminée l'analyse de la variation de la puissance produite par la turbine.

Dans le cas où cette variation serait positive, le système continuera à progresser dans le sens approprié. La variation de puissance atteint son minimum et la puissance atteint son maximum que l'on se rapproche du MPP. Une application possible de la technique du principe de perturbation et d'observation est possible à utiliser pour concevoir un système d'énergie éolienne avec un suivi du point de puissance maximale, comme le montre le schéma fonctionnel (figure III.6).

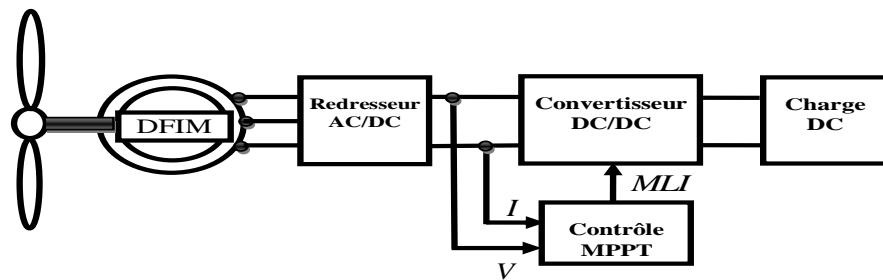


Fig.III.6 Schéma fonctionnel d'un système éolien à contrôle HCS

En effet, on peut tenter de choisir une valeur élevée afin d'obtenir un temps de réponse rapide, mais cela risque de voir le système passer du côté opposé du point de puissance maximale (MPP) et oscille constamment sans parvenir à un bilan de puissance satisfaisant.

Dans ce cas, on peut introduire la logique floue pour construire une éolienne à axe vertical, sans qu'il soit nécessaire de connaître la vitesse du vent et les caractéristiques de l'éolienne.

III.2 Modèle mathématique du convertisseur bidirectionnel

Les systèmes de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable utilisent un convertisseur statique également connu sous le nom d'onduleur pour alimenter un rotor utilisant la GADA. Les objectifs majeurs de ce convertisseur sont de fournir de l'énergie au réseau et de permettre l'application de commandes pour gérer la puissance générée par le stator de la machine. Il vise également à onduler la tension du bus (DC) pour la délivrer au bobinage du rotor. La mise en place de deux convertisseurs dos à dos avec contrôle PWM est suggérée dans cette thèse, un filtre de courant inductif (CCR) relie l'un au réseau électrique et l'autre au rotor de la machine (CCM), puisqu'une connexion directe relie les deux convertisseurs, la transmission

bidirectionnelle de puissance est possible deux sources fonctionnant à une fréquence fixe et une autre à des fréquences variables. En supposant que le générateur fonctionne en régime hyper-synchrone, le CCM prend le rôle comme un onduleur et le CCR fonctionne comme un redresseur, [80].

III.2.1 Contrôle du convertisseur coté générateur

Nous pensons que le système triphasé est équilibré et que la source de courant continu (U_c) est idéale, les tensions simples fournissant l'enroulement du rotor couplé en étoile.

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \tag{III-10}$$

Lorsque le point milieu fictif de la source de courant continu est réglé pour définir les tensions d'entrée de l'onduleur, les tensions composites produites sont spécifiées par

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \tag{III-11}$$

où "o" désigne le point de référence fictif à l'entrée continue, et V_{ao}, V_{bo}, V_{co} est la tension appliquée au milieu "o".

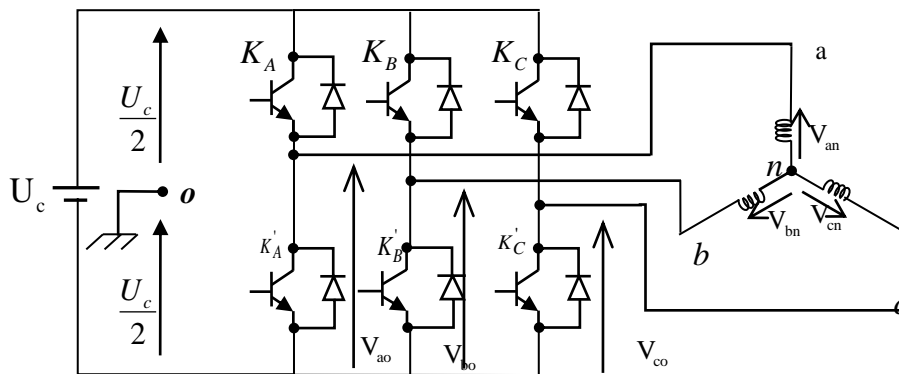


Fig.III.7 Configuration du convertisseur côté machine (CCM)

L'expression des tensions de phase est :

$$\begin{cases} V_{an} = V_{ao} - V_{no} \\ V_{bn} = V_{bo} - V_{no} \\ V_{cn} = V_{co} - V_{no} \end{cases} \tag{III-12}$$

La tension fictive entre le point fictif "o" et le neutre de charge avec est V_{no}

Pour un système équilibré $V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$, il faut:

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (\text{III-13})$$

En remplaçant l'équation (III.13) dans le système d'équation (III.14), on peut obtenir :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad (\text{III-14})$$

Les commandes ON/OFF désignées par « S_i » sont décrites par :

$$V_{io} = U_c \left(1 - \frac{S_i}{2} \right) \quad (\text{III-15})$$

Avec $i = a, b, c$

Selon, le principe de l'approche MLI sinusoïdale (SPWM), les états des interrupteurs supposés parfaits seront déterminés comme suit :

$$\begin{cases} S_i = 1 & V_{io} = \frac{U_c}{2} \\ S_i = 0 & V_{io} = -\frac{U_c}{2} \end{cases} \quad (\text{III-16})$$

Les fonctions de conversion "Si" du bras "i" sont toujours liées à la tension modulée par :

$$\begin{cases} V_{ao} = (S_a - 1/2)U_c \\ V_{bo} = (S_b - 1/2)U_c \\ V_{co} = (S_c - 1/2)U_c \end{cases} \quad (\text{III-17})$$

Le modèle de l'onduleur peut être obtenu en substituant l'équation (III.15) par l'équation (III.16) :

$$\begin{cases} V_{ao} = (S_a - 1/2)U_c \\ V_{bo} = (S_b - 1/2)U_c \\ V_{co} = (S_c - 1/2)U_c \end{cases} \quad (\text{III-18})$$

III.3 Modèle mathématique du convertisseur côté réseau

Un certain nombre de topologies utilise le redresseur PWM pour convertir l'énergie éolienne et la connecter au réseau électrique. Le redresseur et l'onduleur mentionnés précédemment partagent la même architecture.

III.3.1 Contrôle du convertisseur côté réseau

Le but de cette commande est d'assurer le contrôle de deux grandeurs essentielles, [81] :

- La tension du bus (CC) doit être maintenue au niveau de référence spécifié.
- La puissance de référence réactive doit être nulle, afin d'éviter tout impact sur la qualité du réseau.

La régulation en cascade est une méthode de contrôle du redresseur MLI. Les courants de phase sont régulés par deux boucles internes, la tension de capacité est régulée par une boucle externe.

III.3.2 Contrôle du bus continu

Le transfert d'énergie entre deux sources de fréquence différentes est rendu possible par le bus continu qui relie les deux convertisseurs du système éolien (côté GADA et côté réseau) (figure III.8).

Les sources des deux courants modulés sont convertisseur côté réseau (i_{mr}, i_{mt}) et le convertisseur côté GADA

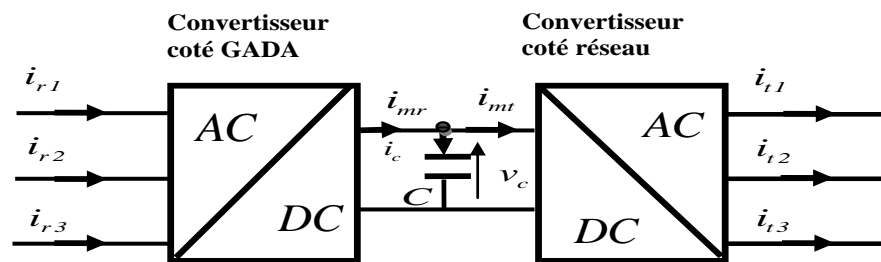


Fig.III.8 Bus continu relie les deux convertisseurs statiques.

Les formules suivantes fournissent la variation de la tension dans le bus (DC) :

$$v_c(t) = \frac{1}{\Delta T} \int_{t_1}^{t_0 + \Delta T} \frac{1}{C} i_c(t) dt + v_c(t_0) \quad (\text{III-19})$$

$$i_c = i_{mr} - i_{mt} \quad (\text{III-20})$$

Le bus continu est illustré par le schéma bloc suivant :

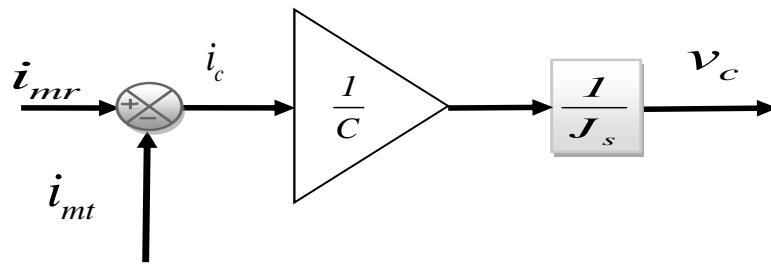


Fig.III.9 Schéma bloc du bus continu

III.4 Technique de Perturbation et observation (P&O)

Cette technique est utilisée pour suivre le comportement de puissance après une vitesse de rotation de faible amplitude par rapport à sa valeur d'origine. On peut donc déduire que si un incrément de vitesse positif fait augmenter de la puissance, cela indique que P_{\max} est à gauche du point de fonctionnement. Toutefois, si la puissance décroît cela peut indiquer que la puissance maximale du système a été utilisée. La recherche se termine théoriquement lorsqu'elle atteint le point P_{\max} . L'utilisation de cette méthode permet de trouver la puissance optimale avec un algorithme raisonnablement simple sans utiliser de courbe de caractéristiques aérodynamiques ou de capteur de vitesse du vent, [82].

L'organigramme de l'algorithme P&O, tel qu'il sera mis en œuvre dans le microcontrôleur de contrôle, est présenté par la (figure III.10).

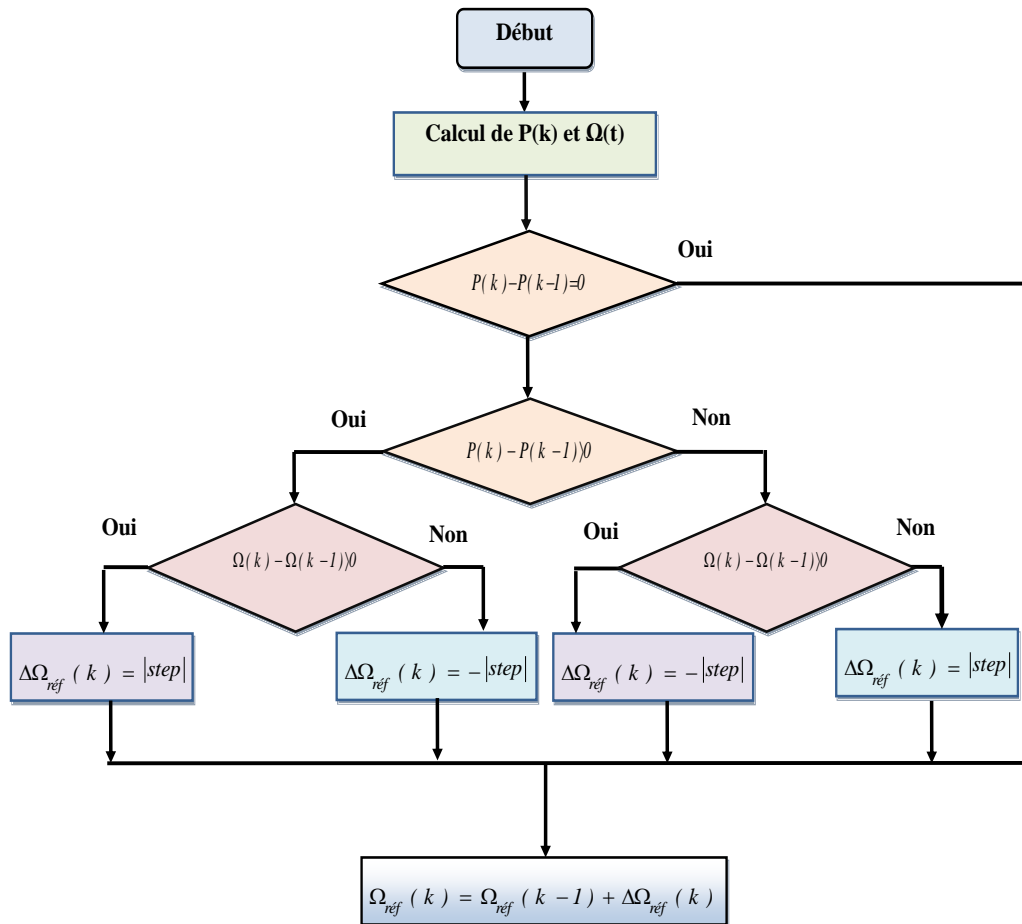


Fig.III.10 Algorithme Perturbation et Observation (P&O)

III.5 Méthodes basées sur la Logique floue

III.5.1 Théories des ensembles flous type-1

Les données et les informations claires imprécises ou ambiguës sont classées à l'aide de la logique floue qui repose sur l'idée d'ensembles flous. Cette caractéristique permet d'utiliser la logique avec différents types de systèmes.

Afin de trouver des réponses à des problèmes avec de nombreuses variables, dans le but d'acquérir un nombre illimité d'ensembles de données, qui ne limitent pas le rapport entre les valeurs réelles du type « vrai » ou « faux » et permettent de ramener beaucoup plus de données que la logique conventionnelle classique,[82]. Les quatre blocs principaux composent le contrôleur flou sont (figure III.11) : le système d'inférence, la base de connaissance, l'interface de fuzzification et l'interface de défuzzification. Une base de données avec des règles constituent la base de connaissances.

Les variables linguistiques d'entrée et de sortie du contrôleur flou sont présentées dans la base de données au format x et A , la base de règles contient des instructions au format suivant :

Si x_i est A_1 et x_2 est A_2 , donc y est B

Le système d'inférence possède la capacité de raisonner et tirer des déductions à partir du contenu de la base de connaissances. Si B est une valeur linguistique, le contrôleur porte le nom de Mamdani. Si B est une valeur numérique ou une équation mathématique, le contrôleur porte le nom de Takagi-Sugeno.

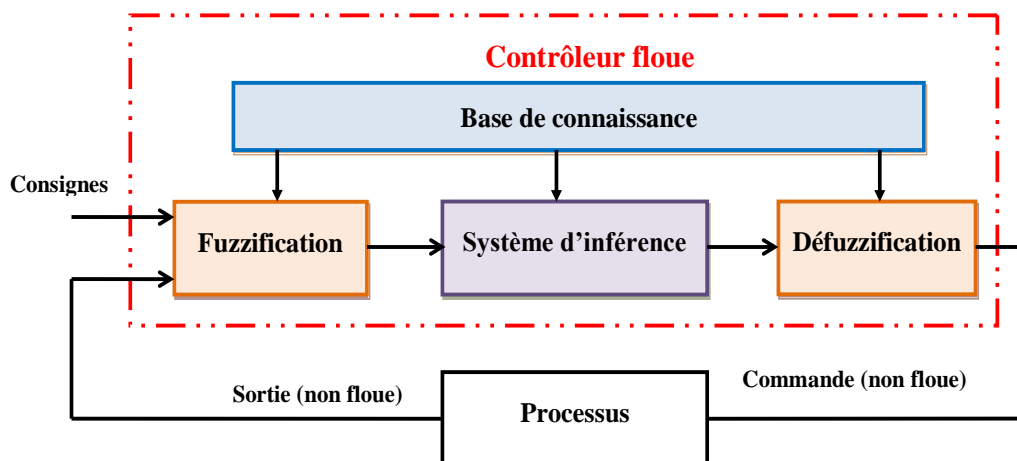


Fig.III.11 Diagramme de fonctionnement d'un contrôleur flou

Ces étapes sont généralement effectuées par un contrôleur flou:

- Choix de l'approche de fuzzification.
- Organiser la base des règles.
- Les options d'inférence.

III.5.1.1 Base de données

Pour décrire correctement un système flou, les variables d'état et de contrôle du processus doivent être choisies. De plus, le choix des variables linguistiques a un impact significatif sur la performance d'un système flou. L'expérience et les connaissances de l'ingénieur sont importants lors de cette étape de sélection. Plus précisément, le choix des variables linguistiques et de leurs fonctions d'appartenance a un effet important sur la construction floue du système, [83]. Les fonctions d'appartenance des variables préliminaires linguistiques et leurs effets sont pratiquement contenues dans la base de données.

III.5.1.2 Processeur d'entrée (Fuzzification)

Les variables d'entrée et de sortie sélectionnées pour simuler ou gérer un système sont appelées grandeurs numériques, la conversion de ces valeurs réelles en variables linguistiques pour le traitement d'inférence est appelé phase de fuzzification.

En conséquence, les ensembles décrivant les expressions linguistiques prises par ces variables sont liés toutes aux variables d'entrée et de sortie et les règles d'inférence seront écrites en utilisant ces concepts.

Les types de fonctions d'appartenance choisies sont aléatoires, les études comparant différents types de fonctions d'appartenance ont démontré que, dans une boucle fermée, les résultats sont pratiquement similaires, la forme triangulaire est la forme le plus souvent utilisé par le contrôle flou. En général, le nombre de fonctions d'appartenance est distribué autour de zéro et un nombre impair. Pour une variable de langages 3, 5 ou 7 ensembles flous, le niveau de précision souhaité détermine le nombre à choisir. Il est possible que les fonctions d'appartenance soient équidistantes ou non équidistantes, symétriques ou non symétriques, [84].

En conséquence, le processus de fuzzification convertit un point $\underline{x} = (x_1, \dots, x_n)^T \in U$ régulier (classique) vers un ensemble flou A' dans U . Il y a deux méthodes de fuzzification :

- **Fuzzification type singleton** : Un ensemble flou est A' dont le support est \underline{x} , c.-à-d., $\mu_{A'}(x') = 1$ pour $\underline{x}' = \underline{x}$ et $\mu_{A'}(x') = 0$ pour tout $\underline{x}' \neq \underline{x}$.
- **Fuzzification type non-singleton** : A' est un ensemble flou qui n'est pas un singleton, lorsqu'il y a du bruit interférant avec l'entrée, ce type de fuzzification est très utilisé.

III.5.1.3 Base de règles

Est un ensemble de règles qui vous permet de connecter des variables floues d'entrée et de sortie, les règles suivantes qui décrivent la commande ont le format suivant.

$$R^{(j)} : \text{IF } x_1 \text{ is } A_1^j \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_n^j, \text{ THEN } y \text{ is } B^j \quad (\text{III-21})$$

Où : - A_i^j et B^j sont des ensembles flous dans $U_i \subset R^n$ et $V \subset R$

- $\underline{x} = (x_1, \dots, x_n)^T \in U_1 \times \dots \times U_n$ et $y \in V$ sont respectivement des variables linguistiques.
- $j = 1, 2, \dots, M$, avec M est le nombre de règles floues dans la base de règles M .
- L'entrée et la sortie du système flou sont désignées respectivement par x et y .

III.5.1.4 Méthode d'inférence floue

Elle repose sur l'utilisation d'un opérateur d'implication permettant d'évaluer le degré de vérité d'une règle R de la forme « *Si X est A et X 2 Alors Y est B* ». En d'autres termes, cet opérateur quantifie la force de la liaison entre la prémisse et la conclusion de la règle.

Les opérateurs les plus courants en commande sont de type conjonctif :

- Implication de Mamdani : $\mu'_B(x) = \min(\mu_A(x_0), \mu_B(y))$.
- Implication de Larsen : $\mu'_B(x) = \mu_A(x_0) \cdot \mu_B(y)$.

Nous utilisons un opérateur disjonctif pour agréger ces règles afin de produire une conclusion basée sur toutes les règles actives, ce qui équivaut à employer un opérateur OR pour rejoindre les règles. Généralement, un ensemble de n règles : $\mu_B(y) = \max_{i=1, \dots, n} \mu_{Bi}(y)$ est agrégé à l'aide de l'opérateur max.

III.5.1.5 Processeur de sortie (Défuzzification)

Une valeur floue est produite par le traitement des règles d'inférence, l'ensemble flou est transformé à l'aide de la technique de défuzzification, qui émerge la combinaison des règles en un paramètre de contrôle exact qui peut être utilisé dans le processus.

En conséquence, un ensemble dans V est transformé par la procédure de défuzzification en une valeur ordinaire (non floue) $y \in V$. Plusieurs procédures dont la moyenne des maxima, centre de la région et le centre des maxima, sont présentées dans la littérature pour réaliser cette opération. La technique de défuzzification la plus couramment utilisée en contrôle flou est la méthode du centre de gravité, car elle donne la meilleure valeur dans l'ensemble flou produite par l'assemblage de règles de manière intuitive. La fonction d'appartenance qui en résulte est utilisée pour identifier le centre de gravité de la surface. Un système flou de type Takagi-Sugeno répond aux règles suivantes :

$$R^{(j)} : \text{IF } x_1 \text{ est } A_1^i \text{ et } x_2 \text{ est } A_2^j \text{ et } x_n \text{ est } A_n^j$$

$$\text{THEN } y = b_{j,0} + b_{j,1} x_1 + b_{j,2} x_2 + b_{j,n} x_n \quad (\text{III-22})$$

$j = 1, 2, \dots, M$

$A_1^j, A_2^j, \dots, A_n^j$ sont les présomptions des ensembles floues, $b_{j,i}$ $i = 1, 2, \dots, n$ sont les coefficients de la j^{eme} conséquence linéaire et y^i la sortie numérique de la j^{eme} règle flou où $j \in [1, M]$.

La valeur de sortie reçoit une valeur numérique par, [85]:

$$y = \sum_{j=1}^M \bar{y}^j \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i}(x_i) \right) / \sum_{j=1}^M \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i}(x_i) \right) \quad (III-23)$$

Tel que : $\omega_j = \mu_{A_1}(x_1) \cdot \mu_{A_2}(x_2) \dots \mu_{A_n}(x_n)$ (III-24)

autrement:

$$\omega_j = \min \{ \mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_n}(x_n) \} \quad (III-25)$$

ω_j : Le degré d'activation de la j^{eme} règle flou.

Lorsque $b_{j,i} = 0$ dans (II.12) pour $i = 1, 2, \dots, n$, le système est connu sous le nom de système flou avec conséquence singleton, ou (modèle flou TS) d'ordre zéro. Ainsi, la valeur numérique de la sortie sera fournie par l'équation [86]:

$$y = \frac{\sum_{j=1}^M \omega_j b_j}{\sum_{j=1}^M \omega_j} \quad (III-26)$$

III.6 Résultats de simulation

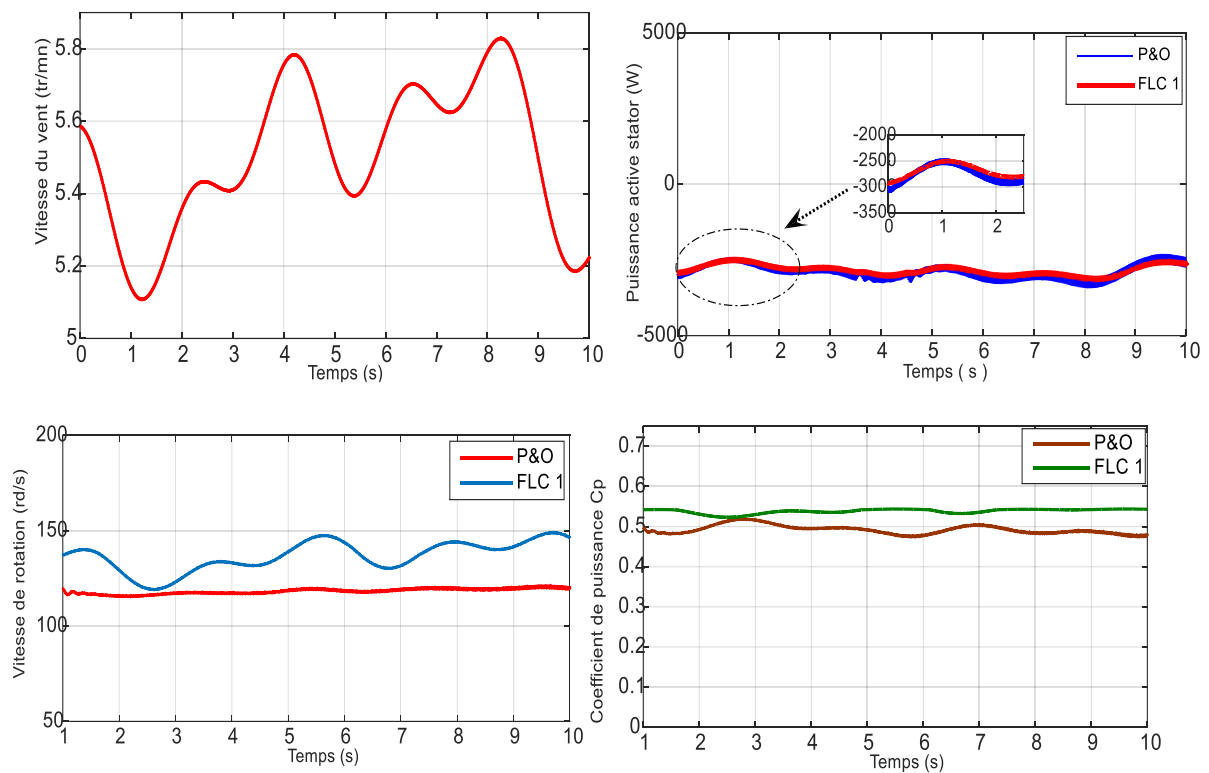


Fig.III.12 Allures des grandeurs à contrôler a) vitesse du vent, b) Puissance active statorique, c) Vitesse de rotation, d) Coefficient de puissance.

La figure (III.12) montre l'allure des différentes grandeurs contrôlées (la courbe de puissance, le coefficient de puissance C_p et la vitesse de rotation) avec une valeur moyenne de la vitesse du vent de 5,8 m/s. Les résultats sont obtenus pour deux méthodes de MPPT (P&O, FLC), et montrent clairement que l'approche basée sur la logique floue de type 1 est plus performante en termes d'efficacité, de robustesse et de temps de réponse.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, deux techniques MPPT sont exposées pour le contrôle de la puissance extraite u système éolien et qui sont P&O et FLC. Les simulations montrent qu'il est possible de maximiser la transmission d'énergie dans les systèmes éoliens en utilisant la logique floue qui permet une grande opportunité d'éviter les problèmes, tant économiques que technologiques, liés aux techniques conventionnelles qui exigent de comprendre les caractéristiques aérodynamiques et nécessitent des tests plutôt coûteux et compliqués.

Chapitre 4

**Application de la logique floue
type-2 dans la poursuite du
point de puissance maximum**

Introduction

L'utilisation des éoliens à vitesse variable basés sur la GADA dans les parcs éoliens se développe actuellement, le plus grand avantage est que les convertisseurs de faible puissance sont utilisés pour gérer la puissance de glissement qui présente une très faible partie de la puissance nominale de la machine. À propos, la GADA connecté au réseau garantit que les convertisseurs seront de moindre taille puisqu'ils permettent de fonctionner dans une gamme de vitesses qui tourne autour de la vitesse de synchronisation de $\pm 30\%$ ou moins, [87, 88, 89, 90]. En fait, il s'agit d'un avantage économique considérable par rapport aux approches alternatives (par exemple le générateur synchrone à aimants permanents), la (figure IV.1) présente le système étudié.

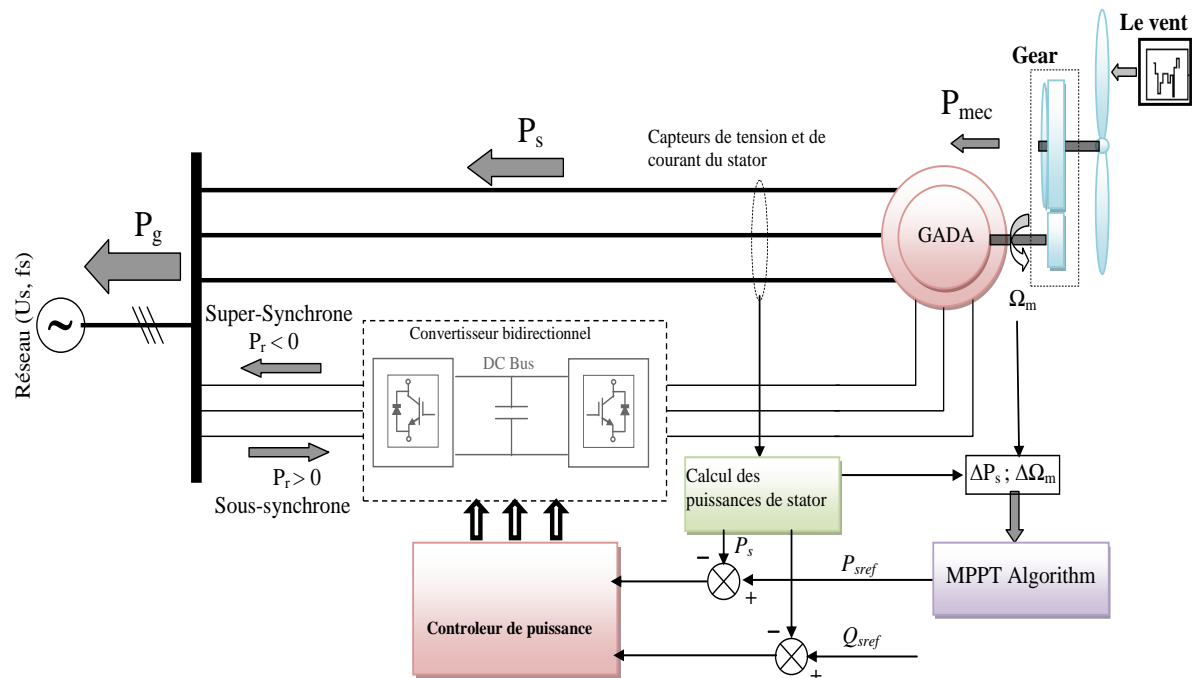


Fig. IV-1. Système de contrôle du GADA

Pour améliorer la transmission de l'énergie, diverses approches MPPT sont disponibles, nous avons proposé l'une de ces méthodes qui est basée sur la logique floue type 2. Les méthodes d'optimisation conventionnelles peuvent être remplacées par un système MPPT flou, l'efficacité pratique des systèmes MPPT conventionnels repose principalement sur la fiabilité des données fournies et la vitesse du vent ou d'autres caractéristiques aérodynamiques du système éolien.

IV.1 Théories des ensembles flous type-2

La notion d'ensemble flou type 2 a été suggérée par Zadeh en 1975 en prolongement de l'idée de l'ensemble flou ordinaire qui est par la suite appelé ensemble flou type-1. Une fonction d'appartenance floue est utilisée pour définir le degré d'appartenance d'un ensemble flou type 2 dans $[0,1]$. À la différence d'un ensemble de type 1 où le degré d'appartenance est un nombre discret dans l'intervalle $[0,1]$. Ces ensembles peuvent être appliqués dans des situations où il existe incertitude sur les degrés d'appartenance eux-mêmes, par exemple une incertitude sur certains des paramètres ou de la fonction d'appartenance. Pensez au passage des ensembles ordinaires aux ensembles flous, lorsqu'un élément tel que 0 ou 1 n'est pas clairement identifiable comme appartenant à un ensemble, nous utilisons des ensembles flous de type 1, car la situation est tellement floue que nous avons du mal à déterminer le degré d'appartenance même sous la forme d'un nombre précis dans $[0,1]$, nous utilisons des ensembles flous type 2, [91].

Les fonctions d'appartenance antécédentes ou conséquentes sont des ensembles flous type 2, ces ensembles sont très utiles pour déterminer la fonction d'appartenance précise d'un ensemble flou, car il s'agit d'ensembles flous dont les degrés d'appartenance est également des ensembles flous type 1. Nous appelons "empreinte d'incertitude" (FOU), la région délimitée qui comprend l'incertitude dans les fonctions d'appartenance primaires d'un ensemble flou type 2.

La définition officielle de ces deux types d'ensembles type 2 est la suivante :

- **Ensemble flou type-2 gaussien:** Lorsque chaque point dans le domaine a un degré d'appartenance égal à un ensemble gaussien de type 1 trouvé dans $[0,1]$, l'ensemble est désigné sous le nom d'ensemble flou gaussien de type 2.
- **Ensemble flou type-2 intervalle :** est un ensemble dans lequel le degré d'appartenance de chaque domaine d'appartenance de tout point de son domaine est un ensemble flou qui comprend le domaine est un intervalle contenu dans $[0,1]$.

IV.2 Terminologie de la logique floue type-2

- **Définition 1**

Une fonction d'appartenance à trois dimensions $\mu_{\tilde{A}}(x,u)$ pour identifier un ensemble flou type 2 désigné par \tilde{A} :

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} \mu_{\tilde{A}}(x, u) / (x, u) \quad J_x \subseteq [0, 1] \tag{IV-1}$$

Où $\int \int$ signifie que tout le composant du produit cartésien sont combinés sur x et u avec :

$$0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x, u) \leq 1.$$

La variable primaire désigne l'appartenance primaire de x à chaque point fixe de X, J_x .

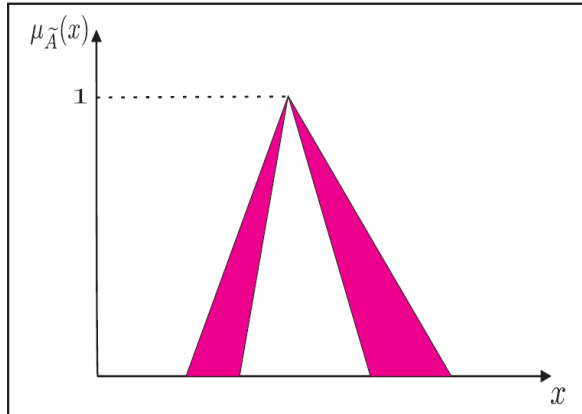


Fig. IV-2. Fonction d'appartenance triangulaire d'un ensemble flou type 2, représentation bidimensionnelle

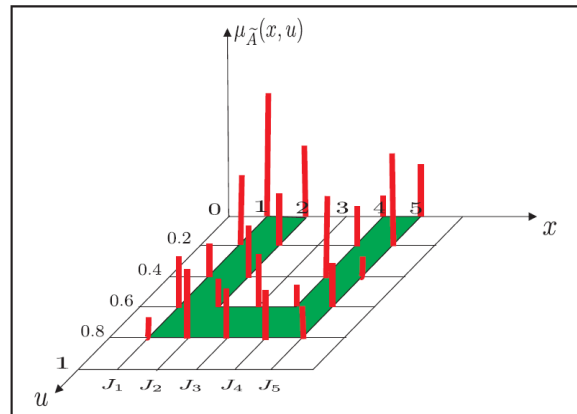


Fig. IV-3. Fonction d'appartenance trapézoïdale d'un ensemble flou type 2, représentation trois dimensions, [95]

• **Définition 2**

A chaque valeur de x , indiquée par $x = x'$, le plan à 2 dimensions dont les axes sont u et $\mu_{\tilde{A}}(x', u)$ est connu sous le nom de tranche verticale de $\mu_{\tilde{A}}(x, u)$, tandis que la tranche verticale de $x' = 5$ est représentée dans la (figure. IV.4), une fonction d'appartenance secondaire correspond à une tranche verticale de $\mu_{\tilde{A}}(x, u)$.

Ainsi, pour $x' \in X$ et $\forall u \in J_{x'} \subseteq [0, 1]$, il y a:

$$\mu_{\tilde{A}}(x = x', u) \mu_{\tilde{A}}(x') = \int_{u \in J_{x'}} f_{x'}(u) / u \quad J_{x'} \subseteq [0, 1] \tag{IV-2}$$

Où $0 \leq f_{x'}(u) \leq 1$. Car $\forall x'$, ce x' va appartenir à X ,

Donc, nous notons alors une fonction d'appartenance floue type 1 appelée fonction d'appartenance secondaire par $\mu_{\tilde{A}}(x)$.

L'équation (IV.3) peut être utilisée pour recréer un ensemble flou type 2 en le considérant comme le regroupement de tous les ensembles secondaires sur la base du concept d'ensembles secondaires. Cela peut s'exprimer comme suit :

$$\tilde{A} = \left\{ (x, \mu_{\tilde{A}}(x)) / \forall x \in X \right\} \tag{IV-3}$$

Où dans le format:

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \mu_{\tilde{A}}(x) / x = \int_{x \in X} \left[\int_{u \in J_x} f_x(u) / u \right] / x \quad J_x \subseteq [0,1] \tag{IV-4}$$

Les grandeurs floues déjà expliquées sont représentées à la (figure.IV.4).

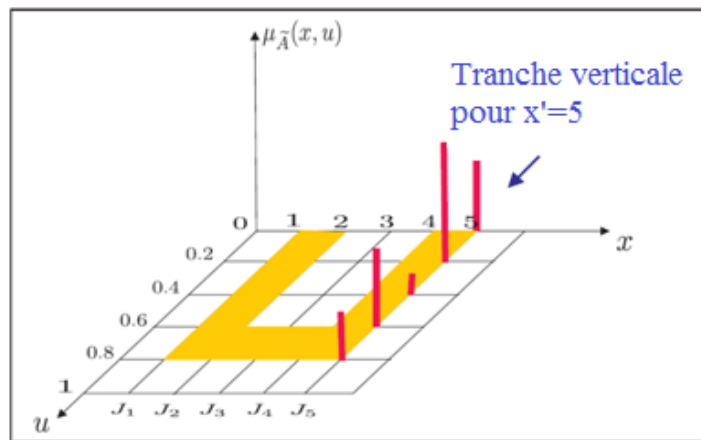


Fig. IV-4. Tranche verticale pour x'=5, [92].

- **Définition 3**

J_x A noté l'appartenance primaire de x comme $J_x \subseteq [0,1] \quad \forall x \in X$ est le domaine de la fonction d'appartenance secondaire.

- **Définition 4**

Le degré d'appartenance secondaire $f_x(u)$ est l'amplitude de la fonction d'appartenance secondaire.

- **Définition 5**

Tel que $f_x(u) = 1, \quad \forall u \in J_x \subseteq [0,1], \quad \forall x \in X$, possède tous les ensembles de type 1 de formes d'intervalle comme fonctions d'appartenance secondaires, il est appelé ensemble flou d'intervalle type 2.

Pour représenter cette forme de fonction d'appartenance on utilise uniquement ses domaines (intervalles) qui pourraient être définis en termes de limites gauche et droite $[l, r]$ ou en fonction de leurs centres et largeurs $[c-s, c+s]$ où $c = (l+r)/2$ et $s = (r-l)/2$.

- **Définition 6**

Assurons qu'il n'y ait qu'un seul degré d'appartenance unitaire dans un ensemble type 2, pour chacune de ses fonctions d'appartenance secondaires. Ensuite, nous identifions l'union de tous ces points comme la fonction d'appartenance principale :

$$u_{\text{principale}}(x) = \int_{x \in X} u / x \quad \text{où } f_x(u) = 1 \quad (\text{IV-5})$$

Les valeurs moyennes de la fonction d'appartenance principale avec des intervalles d'un flou type 2 sont regroupées pour former la fonction d'appartenance principale.

Il convient de noter que la fonction d'appartenance d'un flou type 2 se limite à la fonction d'appartenance primaire lorsque l'incertitude des fonctions d'appartenance est éliminée, [93].

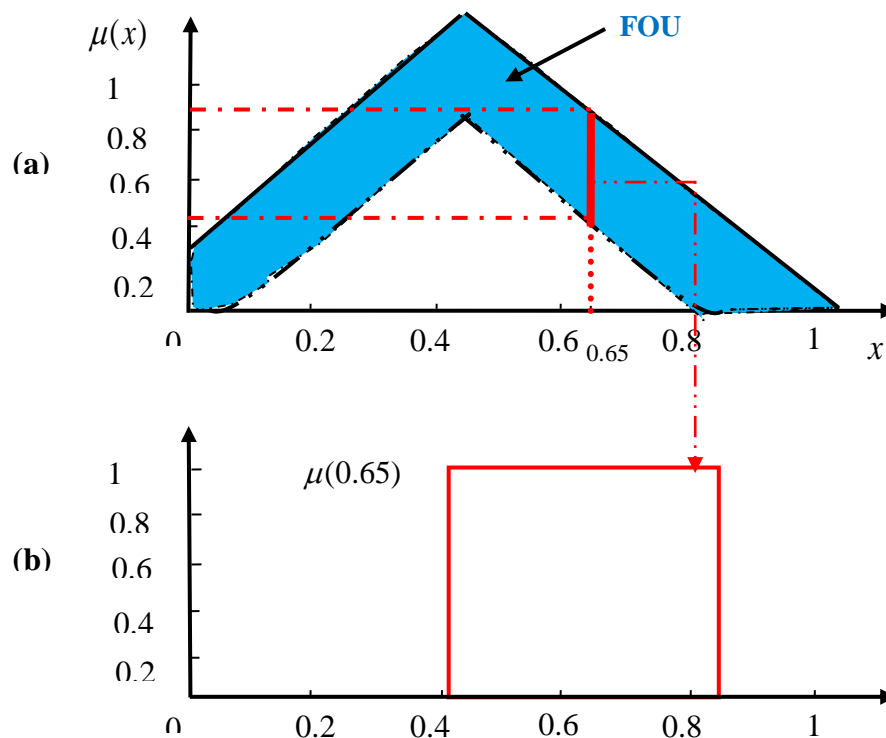


Fig. IV-5. Schémas d'un ensemble flou type-2.

(a) Appartenance primaire.

(b) Appartenance secondaire.

• **Définition 7**

« Footprint Of Uncertainty » *FOU* est une zone délimitée qui représente l'incertitude dans un ensemble type 2 \tilde{A} , c'est la fusion de toutes les affiliations de base :

$$FOU(\tilde{A}) = \bigcup_{x \in X} J_x \tag{IV-6}$$

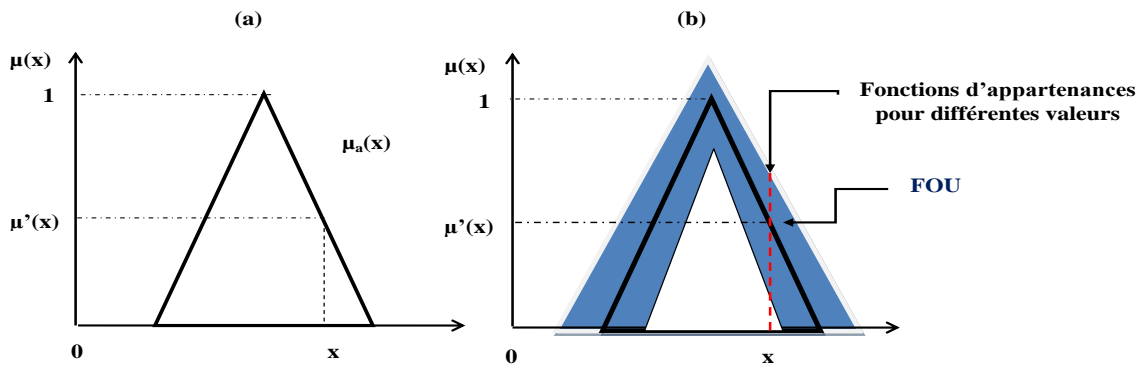


Fig. IV-6. Un ensemble flou type-2 de forme triangulaire.

(a) Appartenance primaire. (b) Appartenance secondaire.

• **Définition 8**

Les bornes du FOU d'un ensemble type 2 correspondent aux fonctions d'appartenance supérieure et inférieure qui sont des fonctions d'appartenance type 1. Ou la fonction d'appartenance supérieure est représentée par $\bar{\mu}_{\tilde{A}}(x) \forall x \in X$, tandis que la fonction d'appartenance inférieure est représentée par $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x) \forall x \in X$.

$$\bar{\mu}_{\tilde{A}}(x) = \overline{FOU(\tilde{A})} \quad \forall x \in X \tag{IV-7}$$

Et
$$\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x) = \underline{FOU(\tilde{A})} \quad \forall x \in X \tag{IV-8}$$

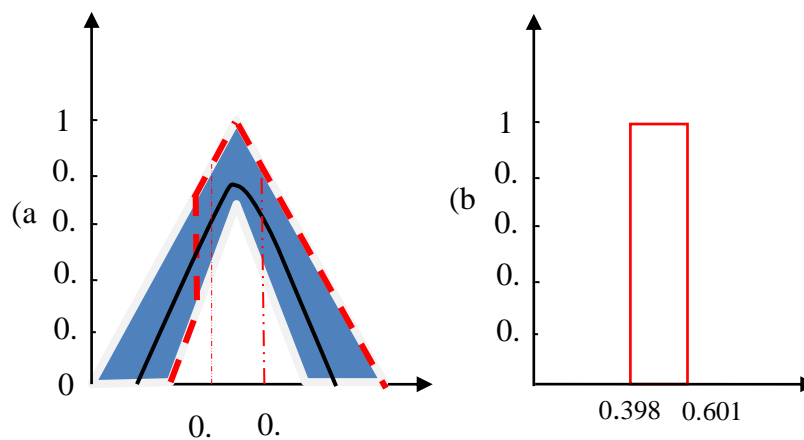


Fig. IV-7. Vue d'ensemble flou type-2.

IV.2.1 Systèmes flous type-2

Un système flou à principe de base de type 2 est un système flou dans lequel au moins un des ensembles flous présents dans l'antécédent ou le conséquent d'une règle est un ensemble flou de type 2, [94]. Le système flou à base de règles de type 2 se compose de cinq éléments : le fuzzifier, l'inférence, la base de règles, le réducteur de type 1 et le défuzzifieur. La figure : IV.8 présente l'architecture fondamentale d'un flou type 2, un flou type 1 est très similaire à sa structure, [95].

Le réducteur de type est la principale caractéristique qui distingue les systèmes flous de type 2 qui est un élément du traitement de sortie du type 2.

Bien qu'il y ait de nombreux exemples de systèmes flous, notamment Larsen, Tsukamoto, Mamdani et Takagi-Sugeno-Kang (TSK). Mamdani et TSK sont les plus souvent utilisés, ils sont tous deux définis par des règles IF-THEN et par la même structure dans les antécédents comme dans la méthode de type 1.

Les ensembles flous génétiquement type 2 se trouvent selon le modèle de Mamdani, comme dans la méthode de type 1. En revanche, le modèle TSK est un modèle paramétrique qui dépend des entrées et qui comprend des paramètres fréquemment sont des représentants des ensembles type 1.

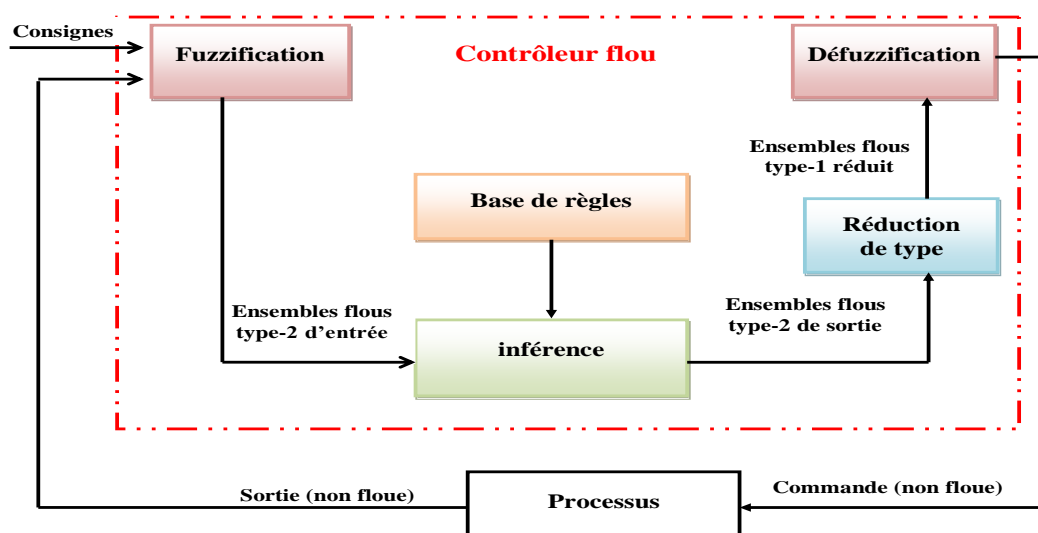


Fig. IV-8. Schéma de système flou type 2.

A partir des ensembles flous délivrés par chaque règle, la défuzzification peut mesurer une sortie exacte, [95]. L'ensemble de sortie de chaque règle d'un système flou type 2

(figure IV.9(a)). Dans ce cadre, il y a des techniques de défuzzification généralisées qui permettent de dériver un ensemble type 1 depuis l'ensemble de sortie type 2.

Plutôt que d'appeler ce processus "défuzzification", nous l'appelons "réduction de type" [96, 97, 98], et l'ensemble type 1 qui en résulte est appelé "ensemble réduit" (figure IV.9 (b)).

L'ensemble réduit peut ensuite être défuzzifier par le défuzzificateur pour produire une sortie non floue ordinaire (figure IV.9(c)).

La (figure.IV.9) illustre clairement la sortie d'un système flou de type 2 :

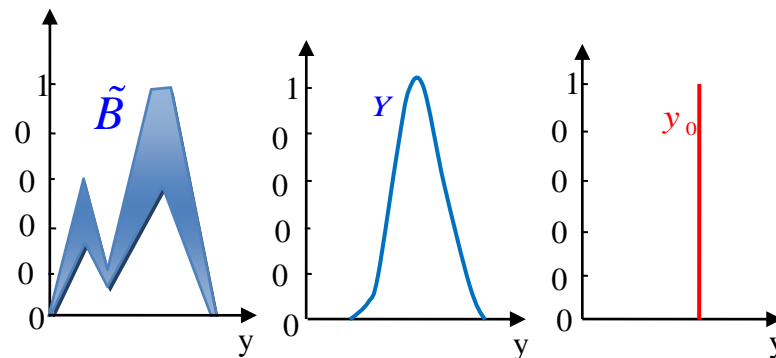


Fig. IV-9. Sortie d'un système flou type-2

(a) Ensemble flou type-2, (b) Ensemble flou type-1, (c) Singleton.

Dans cette étude, on utilise une fuzzification de type singleton où l'entrée floue contient un point dont la valeur d'appartenance n'est pas négligeable.

IV.2.2 MPPT par la logique floue type-2

La (figure.IV.10) illustre un contrôleur flou qui est constitué de :

- 2 blocs de calcul de la variation de la puissance (ΔP) et de la vitesse de rotation ($\Delta\Omega_m$) au cours du temps.
- 1 Bloc ($\Delta\Omega_m$) qui calcul la variation de la vitesse de rotation au fil du temps .
- 1 Bloc (ΔP) qui calcul la variation de la de la puissance avec le temps.
- Les facteurs d'échelle (normalisation) liés à la variation de la puissance (G_p), à la variation de la vitesse de rotation (G_Ω) et à la variation $\Delta\Omega_{m_ref}$.
- Ensemble de fuzzification floue type 2 utilisé pour la modification de la valeur de ΔP et $\Delta\Omega_m$
- Logique type-2 d'inférence.

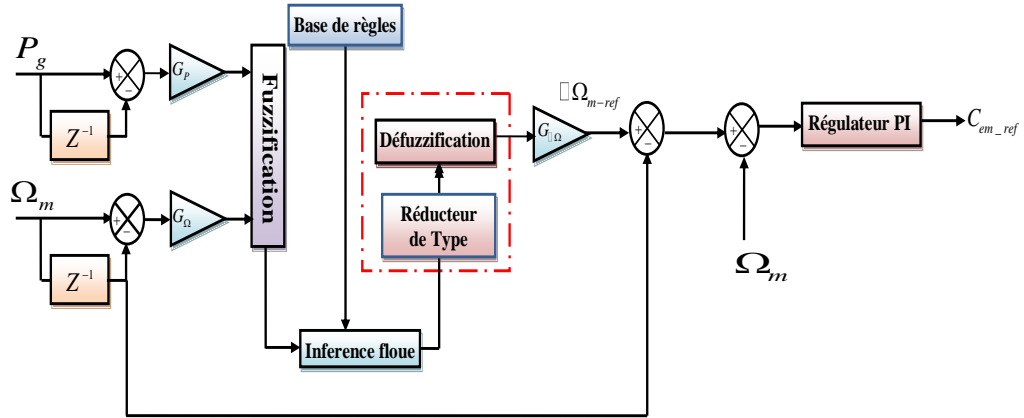


Fig. IV-10. Contrôleur flou type-2 proposé

Les deux entrées du flou ΔP et $\Delta \Omega_m$ sont définies par la variation de l'erreur, [99] :

$$\begin{cases} \Delta P_g = P_g(t + \Delta t) - P_g(t) = P_g(k + 1) - P_g(k) \\ \Delta \Omega_m = \Omega_m(t + \Delta t) - \Omega_m(t) = \Omega_m(k + 1) - \Omega_m(k) \end{cases} \quad (IV-9)$$

La variation des instructions de vitesse de rotation $\Delta \Omega_{mref}$ détermine la sortie du régulateur.

La normalisation des trois quantités est présentée ci-dessous :

$$\begin{cases} \Delta P_g = G_p \Delta P_g \\ \Delta \Omega_m = G_{\Omega} \Delta \Omega_m \\ \Delta \Omega_{mref} = G_{\Delta \Omega} \Delta \Omega_{mref} \end{cases} \quad (IV-10)$$

Où G_p, G_{Ω} et $G_{\Delta \Omega}$ sont des éléments importants qui déterminent les performances de contrôle sont à la fois dynamiques et statiques. Nous les appelons également facteurs d'échelle ou de normalisation.

Les fonctions d'appartenance type 2 choisies pour les variations de la puissance ΔP et de la vitesse $\Delta \Omega_m$ sont des formes gaussiennes équivalentes. ΔP est défini sur l'intervalle $[0,1]$ (figure.IV.11(a)), tandis que $\Delta \Omega_m$ est défini sur l'intervalle $[-1,1]$ (figure. IV.11(b)). La (figure IV.11(c)) montre que les fonctions d'appartenance de type 2 de la variation $\Delta \Omega_{m_ref}$ sont sélectionnées à partir de formes d'intervalle sur $[0.1, 2]$.

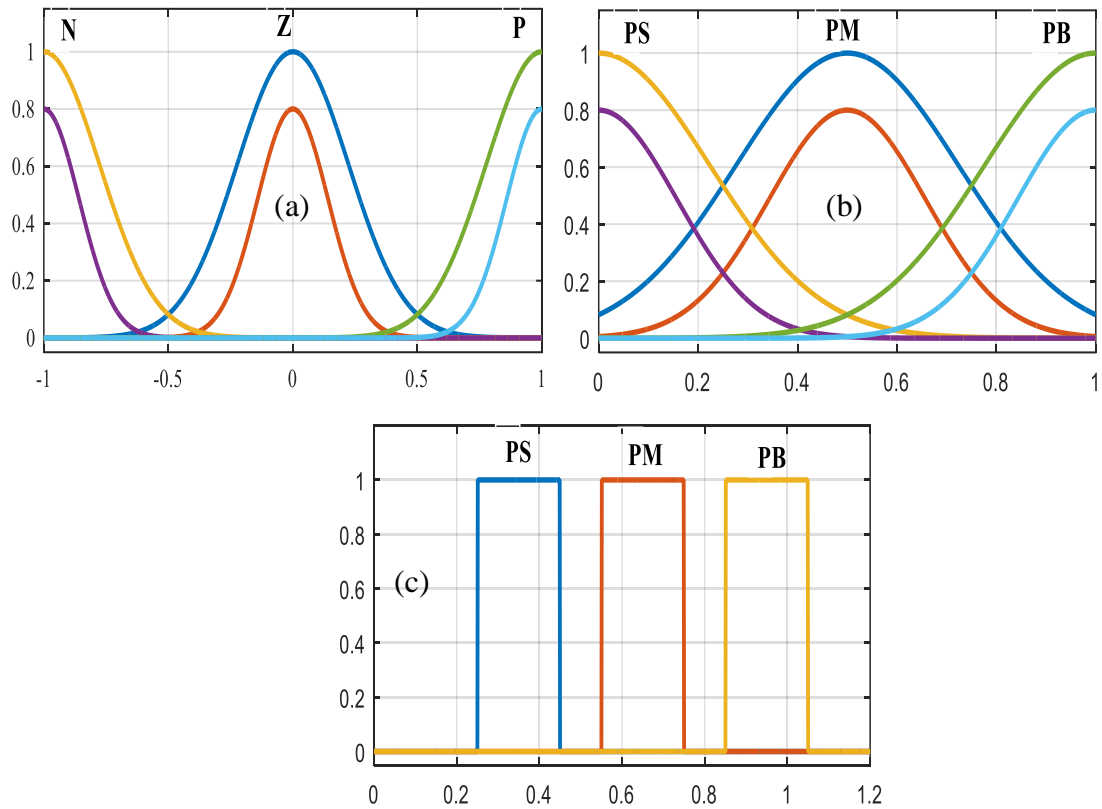


Fig. IV-11. Fonctions d'appartenance floues type 2 de la variation de :

- (a) de la puissance (ΔP), (b) la vitesse de rotation ($\Delta \Omega_m$) et
 (c) la vitesse de rotation ($\Delta \Omega_{m_{ref}}$)

IV.3 Nouvelle approche MPPT

On propose une nouvelle approche MPPT pour surveiller le point de puissance maximale basé sur le développement d'un algorithme flou de type 2, afin d'améliorer les performances de contrôle par la régulation des puissances active et réactive développées par le stator et permettre une commande robuste de la GADA connecté au réseau. En raison des caractéristiques aérodynamiques des éoliennes, l'obtention d'un rendement élevé de conversion de l'énergie éolienne nécessite le suivi du point de puissance maximale (MPPT), ce qui signifie que la vitesse de rotation de l'éolienne doit être ajustée en temps réel.

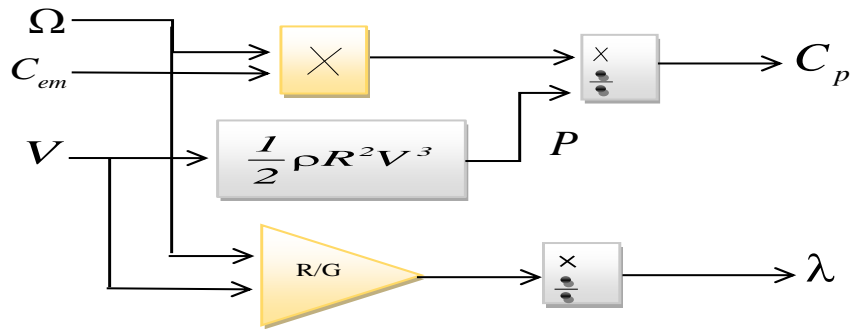


Fig. IV-12. MPPT à base de la logique floue type 2

En raison de la nature de l'énergie cinétique du vent, sa magnitude dépend de la densité de l'air et de la vitesse du vent.

$$P = 0.5\rho R^2V^3 \quad (\text{IV-11})$$

La relation entre la vitesse du vent et la vitesse linéaire des pales s'appelle rapport de vitesse:

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V} \quad (\text{IV-12})$$

Le coefficient de puissance est défini comme suit :

$$C_p = \frac{\omega C_{em}}{P} \quad (\text{IV-13})$$

Dans cette recherche, une interpolation empirique non linéaire pour représenter le C_p est utilisée comme suit:

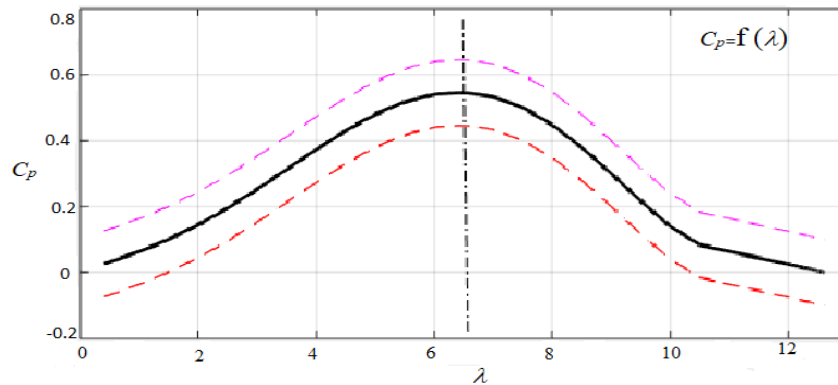


Fig. IV-13. Rapport vitesse-pointe λ avec différents coefficient C_p

Le coefficient C_p peut être considéré comme faisant partie de l'énergie éolienne disponible, ça dépend sur le type et les dimensions de la turbine. La (figure. IV.13) montre le rapport de la vitesse de pointe λ pour plusieurs valeurs du coefficient C_p . Afin d'optimiser le système éolien, il est important de maximiser C_p . Pour atteindre cet objectif, il faut maintenir le rapport de vitesse de pointe à sa valeur optimale et contrôler la vitesse. Ces dernières années, de nombreux chercheurs ont concentré sur l'amélioration de la stratégie de contrôle

de la puissance maximale suivi de points (MPPT) basé sur l'utilisation d'un algorithme flou, [100,101].

IV.3.1 Résultats de simulation

Le rôle d'un ensemble flou type 2 est d'assurer un maintien approprié de la vitesse du vent qui est réglée pour correspondre au point optimal. Les résultats de la simulation obtenus montrent une amélioration importante des performances du système de conversion d'énergie éolienne en utilisant la méthode de logique floue de type 2. Donc, la méthode de la logique floue type 2 peut être une solution raisonnable pour améliorer la conversion de l'énergie dans les systèmes éoliens puisqu'elle offre une grande opportunité de prévenir les difficultés techniques ou technologiques associées aux stratégies conventionnelles.

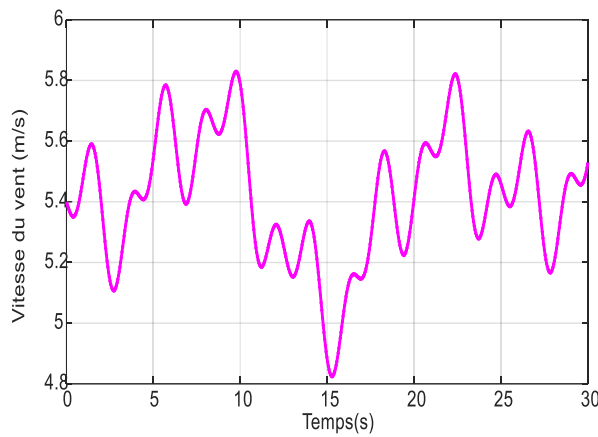


Fig. IV-14. Profile du vent

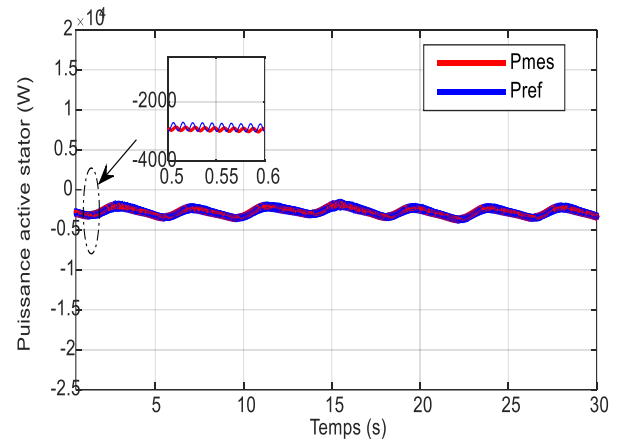


Fig. IV-15. Puissance active statorique

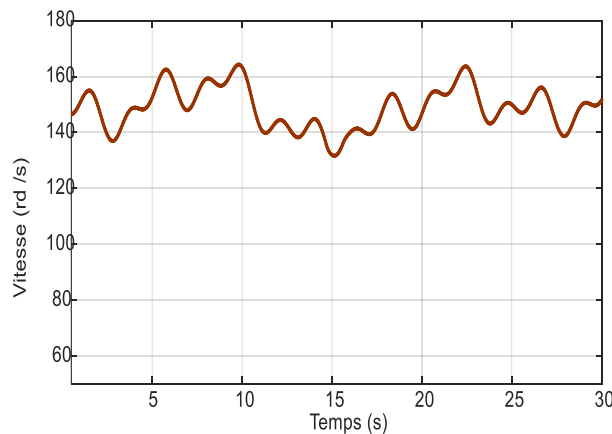


Fig. IV-16. Vitesse de la turbine

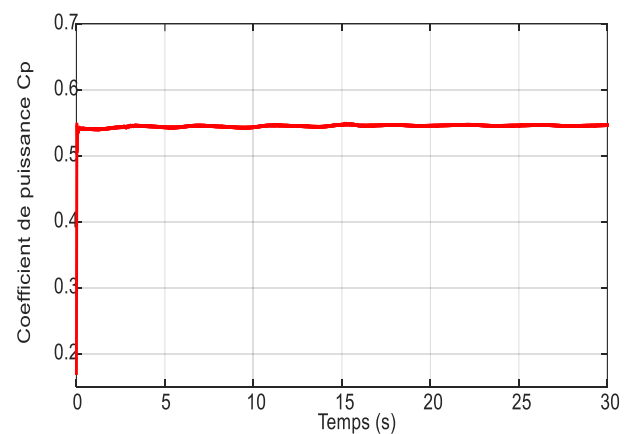


Fig. IV-17. Coefficient de puissance C_p

IV.4 MPPT par la logique floue type-1

L'établissement des règles d'attitude à suivre pour converger vers le point optimal est assez facile, même en l'absence de connaissances sur la caractéristique $C_p(\lambda)$ de l'éolienne, [102]. Les variations de vitesse $\Delta\Omega_m$ et de puissance ΔP affectent ces règles.

Par exemple, si j'observe une augmentation de la puissance après une augmentation de vitesse positive, je dois poursuivre l'accélération de la voilure ($\Delta\Omega_{m_{ref}} > 0$). Elle se trouve à gauche de la cloche $P(\Omega)$, un appareil MPPT basé sur les ensembles flous est implémenté sur la base de l'existence de ces normes linguistiques. Le dispositif MPPT propose de modifier le point de consigne de la vitesse de rotation ($\Omega_{m_{ref}}$) de l'éolienne par ($\Delta\Omega_{m_{ref}}$) sur la base de l'évaluation de la variation de la puissance (ΔP) et de la vitesse de rotation ($\Delta\Omega_m$). La (figure IV.18) illustre la structure du contrôleur logique flou (FLC), la vitesse du générateur est contrôlée pour correspondre à la vitesse de référence ($\Omega_{m_{ref}}$) obtenu de la sortie du contrôleur flou, la référence du couple électromagnétique du générateur est alors déterminée par le contrôleur de vitesse.

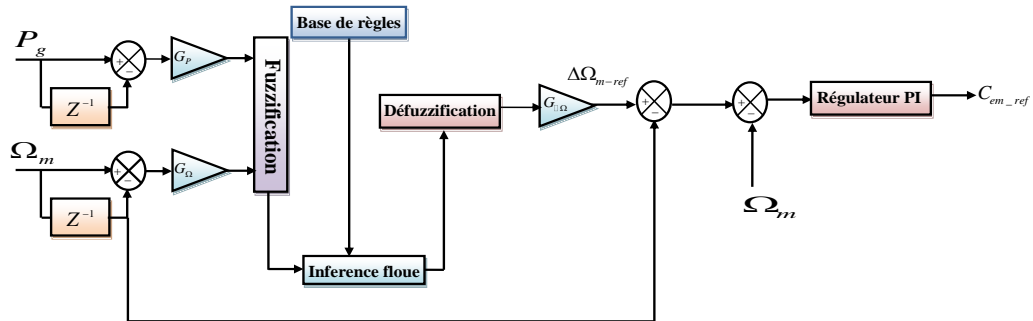


Fig. IV-18. Contrôleur flou type-1 proposé.

Le contrôleur flou (figure IV.18) est composé des éléments suivants :

- Deux blocs sont utilisés pour calculer les variations de la puissance (ΔP) et de la vitesse de rotation ($\Delta\Omega_m$) au fil du temps.
- Facteurs d'échelle (normalisation) liées aux variations ($\Delta\Omega_{m_{ref}}$) du gain (G_{Ω}), de la variation de puissance (G_p) et de la vitesse (G_{Ω}).
- Bloc de fuzzification pour les variations du (ΔP) et du ($\Delta\Omega_m$).
- Logique d'inférence.
- Les deux entrées floues sont les erreurs de puissance et de vitesse, [103].

Les définitions de la variation de l'erreur ΔP et $\Delta\Omega_m$ est le suivant:

$$\begin{cases} \Delta P_g = P_g(t + \Delta t) - P_g(t) = P_g(k + 1) - P_g(k) \\ \Delta\Omega_m = \Omega_m(t + \Delta t) - \Omega_m(t) = \Omega_m(k + 1) - \Omega_m(k) \end{cases} \quad (IV-14)$$

La fluctuation du point de consigne de la vitesse de l'éolienne $\Delta\Omega_{m_{ref}}$ se reflète dans la sortie du contrôleur.

Les trois valeurs sont normalisées de la manière décrite ci-dessous :

$$\begin{cases} \Delta P_g = G_p \Delta P_g \\ \Delta\Omega_m = G_\Omega \Delta\Omega_m \\ \Delta\Omega_{m_{ref}} = G_{\Delta\Omega} \Delta\Omega_{m_{ref}} \end{cases} \quad (IV-15)$$

Où G_p, G_Ω et $G_{\Delta\Omega}$ sont des éléments importants qui déterminent les performances de contrôle et qui peuvent être à la fois dynamiques et statiques. Nous les appelons également facteurs d'échelle ou de normalisation. Les figures (IV.19.a) et (IV.19.b) montrent que les fonctions d'appartenance pour la variation de puissance (ΔP) et la vitesse de rotation ($\Delta\Omega_m$) sont définies sur l'intervalle [-1,1] et sont sélectionnées pour avoir des formes gaussiennes.

La figure (IV.19.c) montre la forme triangulaire dans laquelle les fonctions d'appartenance de la variation $\Delta\Omega_{m_{ref}}$ sont sélectionnées sur l'intervalle [-1,1].

La table (IV.1) fournit l'ensemble de règles utilisées pour l'inférence floue. Les facteurs d'échelle sont présentés ci-dessous.

		ΔP						
		GN	MN	PN	ZE	PP	MP	GP
$\Delta\Omega_m$	GN	GP	GP	MP	ZE	MN	GN	GN
	MN	GP	MP	PP	ZE	PN	MN	GN
	PN	MP	PP	PP	ZE	PN	PN	MN
	ZE	GN	MN	PN	ZE	PP	MP	GP
	PP	MN	PN	PN	ZE	PP	PP	MP
	MP	GN	MN	PN	ZE	PP	MP	GP
	GP	GN	GN	MN	ZE	MP	GP	GP

Tab. IV-1. Table des règles du flou

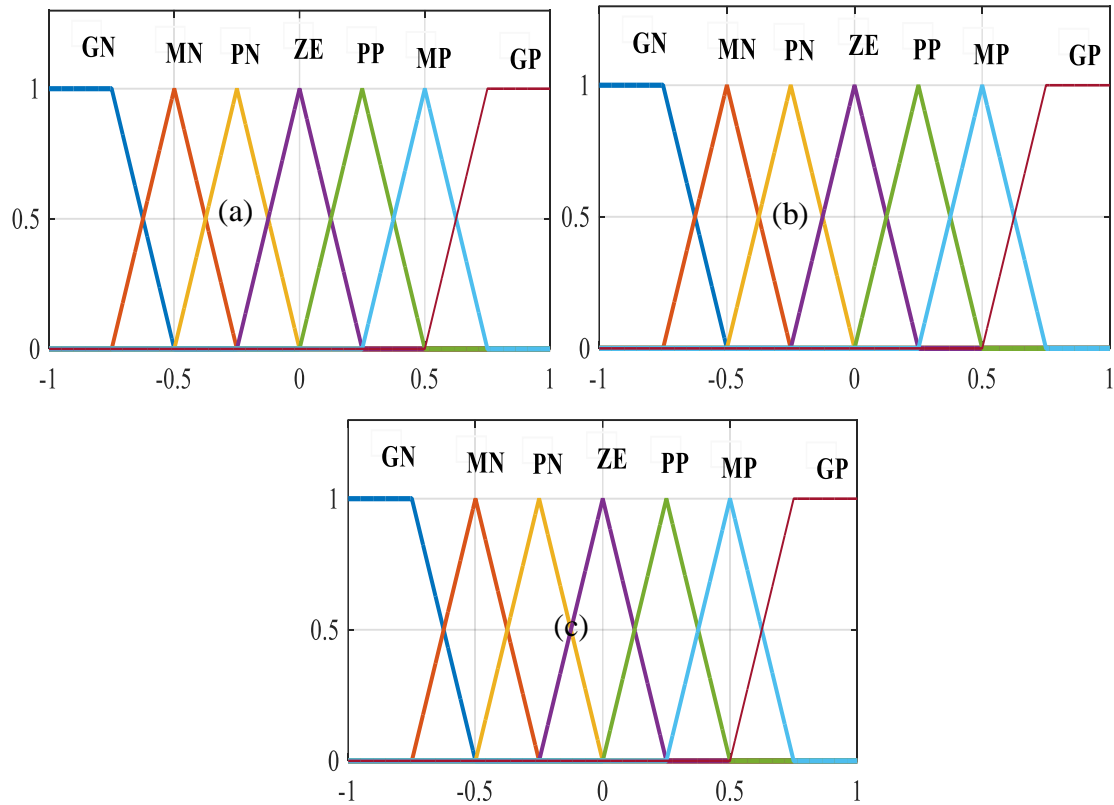


Fig. IV-19. Les fonctions d'appartenance de la variation du floues.

(a) de la puissance (ΔP) , (b) la vitesse de rotation ($\Delta \Omega_m$) et (c) la vitesse de rotation ($\Delta \Omega_{m_{ref}}$)

IV.5 Étude comparative avec l'algorithme flou de type 1 et P&O.

Les méthodes permettant de développer un modèle mathématique pour la production d'énergie éolienne est un système complexe peuvent être fortement affectées par la variation du vent et constituent un problème non linéaire. Les résultats des performances de notre algorithme flou type 2 ont été comparés à ceux de l'algorithme flou type 1 et du P&O suggérés dans la littérature.

IV.5.1 Résultats de simulations.

Comme illustré dans la figure (IV.20), on a simulé le système en utilisant différentes vitesses de vent, avec une valeur moyenne de 5,8 m/s. Les figures (IV.21, 22 et 23) montrent la variation de la vitesse de rotation, le coefficient de puissance C_p , la puissance obtenues respectivement. On peut déduire que la technique appliquée sur le contrôle de la GADA d'une éolienne à vitesse variable et qui est basée sur la logique floue type 2, donne de meilleurs résultats en termes d'efficacité, de robustesse et de temps de réponse par rapport aux autres méthodes MPPT (P&O et logique floue de type 1).

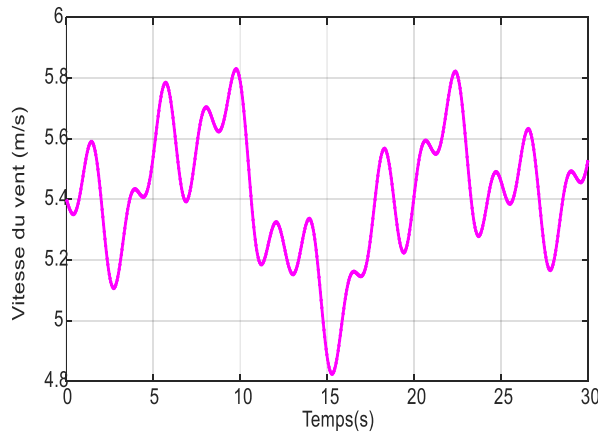


Fig. IV-20. Profile du vent

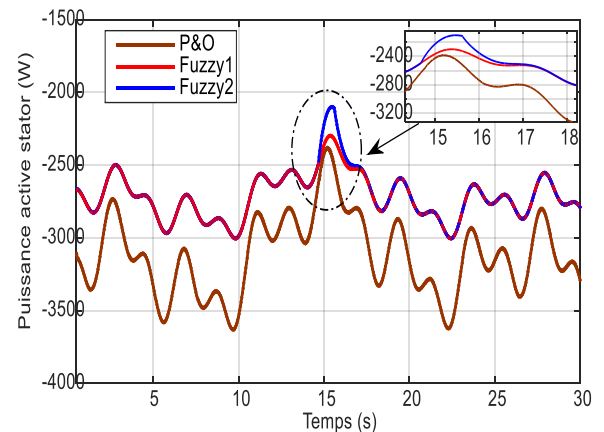


Fig. IV-21. Puissance active statorique

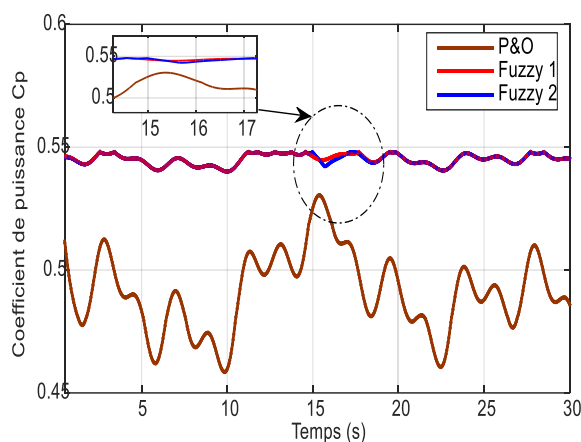


Fig. IV-22. Coefficient de puissance C_p

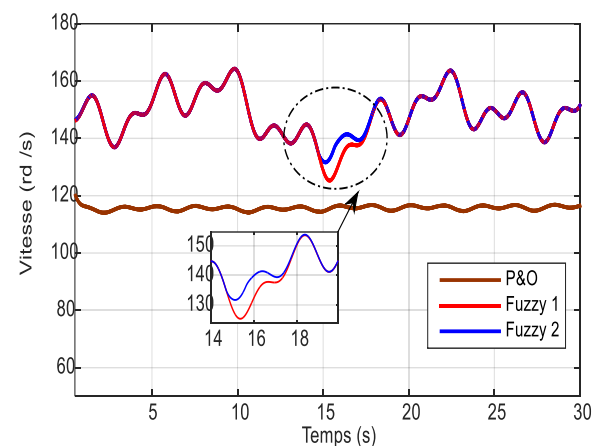


Fig. IV-23. Vitesse de la turbine

IV.6 Conclusion

En réalité, l'exactitude des données fournies et la vitesse du vent ou d'autres caractéristiques aérodynamiques du système éolien déterminent l'efficacité des approches MPPT conventionnelles.

Dans ce chapitre, en premier lieu on a présenté les notions de base pour un système flou de type-2 (opérateurs, structure, réduction de type, ...). Par la suite, on a proposé une nouvelle méthode du MPPT basée sur un flou type-2 pour le but d'améliorer les performances dynamiques de la commande par la logique floue type-1. Les résultats obtenus montrent clairement l'efficacité du MPPT basé sur la technique floue type 2 par rapport aux deux autres techniques (P&O) et flou type 1 surtout en termes d'efficacité, de robustesse et de temps de réponse.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Ces dernières années avec la hausse des coûts et la disponibilité limitée des combustibles fossiles, l'énergie éolienne est devenue l'une des principales sources de production d'électricité renouvelable les plus populaires. Cependant, le vent est naturellement une source d'énergie très intermittente suite à la variation importante et brusque de la vitesse du vent, ce qui rend nécessaire d'extraire une puissance maximale de l'éolienne dans des conditions normales de fonctionnement. Dans la littérature, plusieurs méthodes de contrôle et de suivi du point de puissance maximale (MPPT) ont été développées, notamment l'utilisation des techniques d'intelligence artificielle.

Actuellement, le contrôleur MPPT basé sur la logique floue est conçu pour surmonter les limitations de toutes les méthodes existantes pour sa réponse la plus rapide en cas de fluctuations rapides de la vitesse du vent.

Dans ce travail, on a présenté une nouvelle approche pour le suivi du point de puissance maximale pour le système de conversion d'énergie éolienne basé sur la logique floue type 2, afin de nous permettre d'améliorer la qualité de l'énergie fournie au réseau électrique et d'obtenir de meilleures performances par rapport aux méthodes conventionnelles comme le P&O.

Dans cette étude, on a effectué:

- ❖ Le contrôle et la modélisation d'un générateur asynchrone à double alimentation en utilisant en plusieurs stratégies de contrôle. La méthode de commande non linéaire robuste basée sur la théorie de Lyapunov combinée avec un contrôleur mode glissant GADA intégré au réseau donne de bons résultats particulièrement une stabilité du système aux incertitudes paramétrique et des bonnes performances de la technique de contrôle.
- ❖ Utilisation de deux techniques (P&O, FLC) pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) afin de permettre d'extraire la puissance maximale du générateur. Les résultats obtenus ont démontré que la technique de la logique floue peut être utilisée pour maximiser le transfert d'énergie dans les systèmes éoliens, ce qui lui rend un excellent moyen de minimiser les problèmes liés à la technologie et à l'économie.
- ❖ Une présentation détaillée de la nouvelle logique floue, connue sous le nom de logique floue type-2 a été présentée ainsi que le développement d'un contrôleur à logique floue type-2 pour améliorer le suivi du point de puissance maximale MPPT des éoliennes à base de la machine asynchrone à double alimentation.

- ❖ Les résultats obtenus montrent clairement l'efficacité du MPPT basé sur la technique FLC type 2 par rapport aux deux autres techniques (P&O) et FLC type 1 surtout en termes d'efficacité, de robustesse et de temps de réponse.

En tant que perspectives, nous suggérons les différentes orientations de recherche suivantes:

- En ce qui concerne la configuration des fonctions d'appartenance floues type 2 des prémisses, il est conseillé d'ajuster les paramètres suivants : les centres, les largeurs et les amplitudes des fonctions d'appartenance inférieures en utilisant des algorithmes évolutifs tels que (l'algorithme génétique, le PSO). La mise en œuvre des divers régulateurs suggérés dans cette thèse, en lien avec d'autres commandes, comme le réseau neuronal et l'intelligence artificielle.
- Effectuer une étude globale sur une ferme éolienne de plusieurs mégawatts utilisant des GADAs.

Annexe 'A'

A.1 Commande par modulation de largeur d'impulsion

En général, on utilise l'approche de MLI pour générer les commandes "Si" de l'onduleur de tension triphasé en comparant un signal de référence normalement sinusoïdal $V_{ref}(t)$ (modulant) avec un signal triangulaire (porteur) $V_p(t)$ de fréquence plus élevée. Lorsque le module est supérieur à la porteuse, la valeur du signal de commande "Si" est de 1, et car le module est inférieur à la porteuse, il est égal à 0. La fonction MLI est un lien entre la machine électrique connectée à un variateur de vitesse et sa partie de contrôle. Cette fonction a un impact important sur l'onduleur de tension de la partie de puissance du variateur et a une influence considérable sur toutes les performances du système. Ce principe de contrôle est démontré dans la figure (A.1).

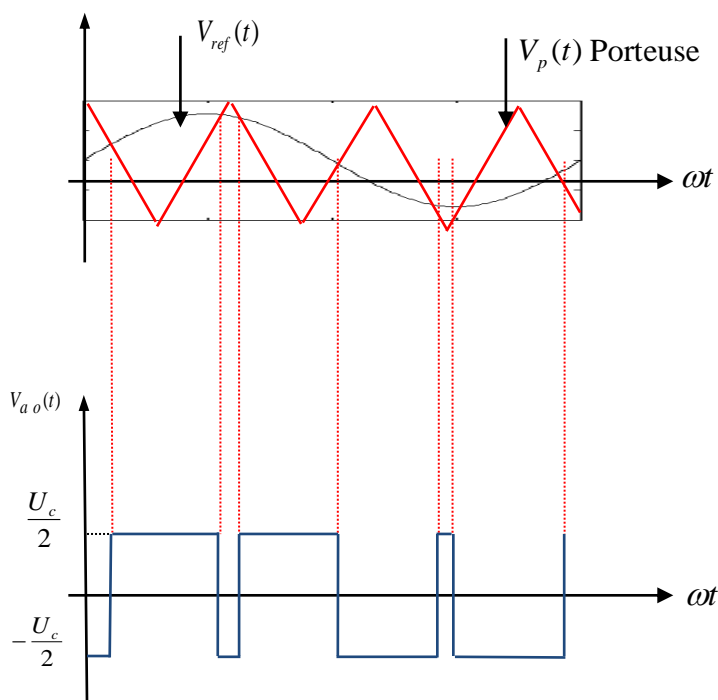


Fig A.1 Principe de la commande MLI

Cette méthode de commande est caractérisée par deux paramètres:

- La relation entre la fréquence de porteuse f_p et celle du signal de référence est connue sous le nom de coefficient de modulation m .
- Le rapport entre l'amplitude de référence et celle de la porteuse est connu sous le nom de coefficient de réglage de la tension r .

A.2 Modélisation du convertisseur côté réseau

La conception du convertisseur côté réseau et du convertisseur côté machine est identique.

- La résistance R et l'inductance L indiquent l'impédance de la ligne.
- La tension de ligne est représentée par V .
- U_c la tension de sortie redressée.

Les trois parties du redresseur MLI triphasé sont la source, le convertisseur et la charge est illustrée dans la (figure A.2).

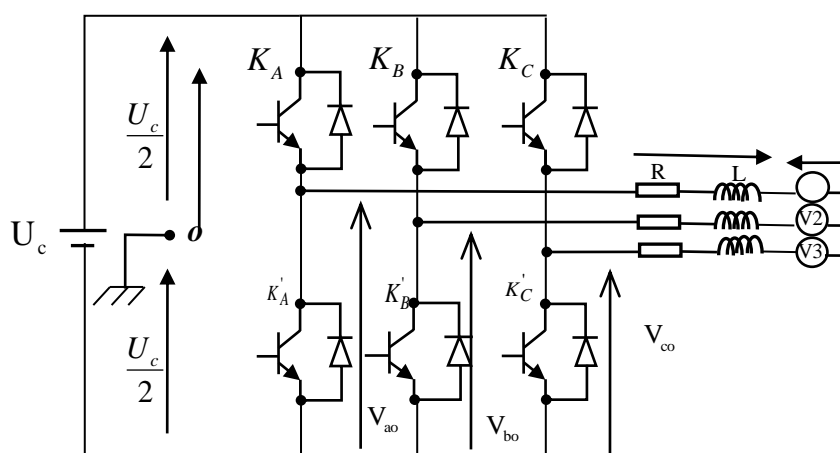


Fig A.2 Configuration du convertisseur côté réseau

• La source d'alimentation

Il s'agit d'une source triphasée équilibrée en série et considérée comme parfaitement sinusoïdale. La résistance R et l'inductance L sont considérées comme la résistance totale et l'inductance de la ligne respectivement, [104,105].

Les tensions des lignes proviennent de :

$$\begin{cases} V_1 = Ri_1 + L \frac{di_1}{dt} + V_{an} \\ V_2 = Ri_2 + L \frac{di_2}{dt} + V_{bn} \\ V_3 = Ri_3 + L \frac{di_3}{dt} + V_{cn} \end{cases} \quad \text{A.1.}$$

La tension simple V_{an} , V_{bn} et V_{cn} est définie entre la source et l'entrée du convertisseur, le système d'équations différentielles suivant fournit les courants de chaque phase:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_1 - V_{an} \\ V_2 - V_{bn} \\ V_3 - V_{cn} \end{bmatrix} \quad \text{A.2.}$$

• Partie Convertisseur

La structure du redresseur et l'onduleur déjà modélisés dans la section précédente sont les mêmes, la matrice de connexion du pont ressemble à l'équation (A.3), [106].

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{U_c}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad \text{A.3.}$$

En outre, le courant redressé est produit par :

$$[i_s] [S_1 \ S_2 \ S_3] \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad \text{A.4.}$$

• Partie Charge

Ce composant est constitué d'une résistance qui représente une charge de courant continu et d'un condensateur C connecté en parallèle. Les deux équations électriques suivantes le contrôlent, [107].

$$\begin{cases} \frac{dU_c}{dt} = \frac{1}{C} (i_s - i_{ch}) \\ U_c = R_{ch} \cdot i_{ch} \end{cases} \quad \text{A.5.}$$

$$\frac{U_c}{i_s} = \frac{R_{ch}}{1 + R_{ch} \cdot C \cdot p} \quad \text{A.6.}$$

Le schéma général d'un redresseur MLI peut être créé, la tension redressée U_c est utilisée comme source d'entrée et la commande des gâchettes des interrupteurs (S_1, S_2, S_3) supérieure est utilisée comme sortie.

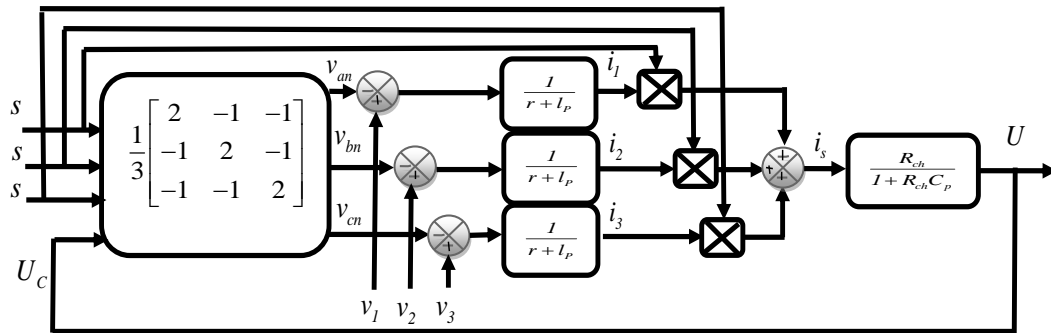


Fig A.3 Schéma du redresseur à MLI

A.2.1 Modèle du filtre côté réseau

La figure (A.4) montre comment un filtre triphasé est utilisé pour relier le convertisseur côté réseau au premier, le but est de réduire les harmoniques de courant.

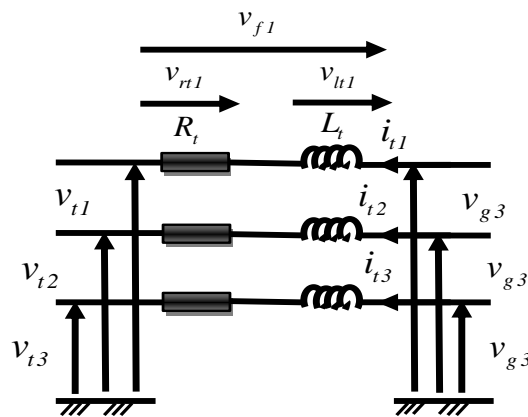


Fig A.4 Filtre côté réseau

$$i_{t_1}(t) = \frac{1}{L_t} \int_{t_1}^{t_0 + \Delta T} v_{lt_1} dt + i_{t_1}(t_0) \quad \text{A.7.}$$

$$i_{t_2}(t) = \frac{1}{L_t} \int_{t_1}^{t_0 + \Delta T} v_{lt_2} dt + i_{t_2}(t_0) \quad \text{A.8.}$$

$$i_{t_3} = -(i_{t_1} + i_{t_2}) \quad \text{A.9.}$$

Les tensions des impédances de ligne du filtre sont écrites comme suit :

$$v_{lt_1} = v_{g_1} - v_{t_1} - v_{rt_1} \quad \text{A.10.}$$

$$v_{lt_2} = v_{g_2} - v_{t_2} - v_{rt_2} \quad \text{A.11.}$$

En mettant :

$$v_{l1} = R_t \cdot i_{t1} \quad \text{A.12.}$$

$$v_{l2} = R_t \cdot i_{t2} \quad \text{A.13.}$$

La définition des vecteurs v_t, i_t et v_g est la suivante :

$$v_t = \begin{bmatrix} v_{t1} \\ v_{t2} \end{bmatrix} \quad \text{A.14.}$$

$$i_t = \begin{bmatrix} i_{t1} \\ i_{t2} \end{bmatrix} \quad \text{A.15.}$$

$$v_g = \begin{bmatrix} v_{g1} \\ v_{g2} \end{bmatrix} \quad \text{A.16.}$$

Dans la figure(A.5), on peut observer le schéma bloc du filtre de sortie.

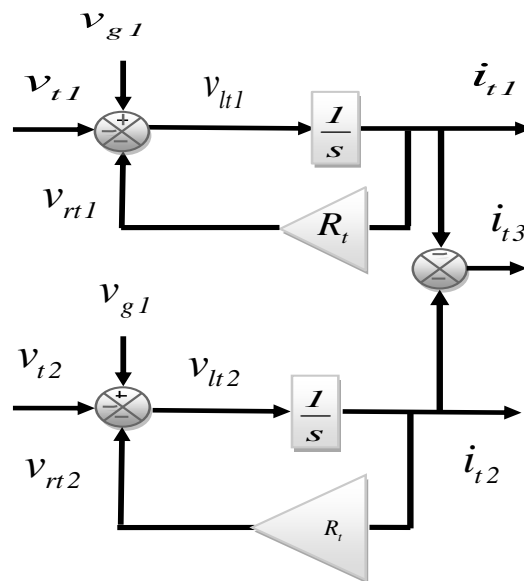


Fig A.5 Schéma bloc du filtre coté réseau.

Annexe 'B'

Tableau 2 : Paramètres de la GADA utilisés lors des simulations

Paramètre	Valeur	Description
P_n	4 Kw	Puissance nominale de la turbine
P	2	Nombre de paire de pole
R_s	1.2 Ω	Résistance d'enroulement du stator
R_r	1.8 Ω	Résistance d'enroulement du rotor
L_s	0.158 H	Inductance des enroulements du stator
L_r	0.156 H	Inductance des enroulements du rotor
C_{p_max}	0.5472	Coefficient de puissance maximal
λ_{opt}	6.5311	Vitesse spécifique optimale
R	1.08 m	Rayon de l'éolienne
J	0.02 Kg.m ²	Moment d'inertie
G	1	Gain de multiplicateur de vitesse
M	0.15	Inductance mutuelle
g	0.1	Glissement de la génératrice asynchrone

Références Bibliographiques

- [1] Ki-Seon Kim; Dept. of Electr. Eng., Chonnam Nat. Univ., Gwangju; Young-Gook Jung; Young-cheol Lim, 2009. A New Hybrid Random PWM Scheme , IEEE Transactions on Power Electronics, (Volume:24 , Issue: 1), 192 – 200.
- [2] P. Nagasekhara Reddy, J. Amarnath, P. Linga Reddy “Space Vector Based Hybrid Random PWM Algorithm for DTC IM Drive To Achieve Superior Waveform Quality” Innovative Systems Design and Engineering, ISSN 2222-1727 (Paper) ISSN 22222871, Vol 2, No 3.
- [3] E. Koutroulis and K. Kalaitzakis, “Design of a Maximum Power Tracking System for Wind-Energy-Conversion Applications”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 53, No. 2, pp. 486-494, Avril 2006.
- [4] F. Valenciaga, P.F. Puleston, P.E. Battaiotto, “Power Control of a Solar/Wind Generation System Without Wind Measurement: A Passivity/Sliding Mode Approach”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 18, No. 4, pp. 501-507, Dec. 2003.
- [5] 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 éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation ». Thèse de doctorat, Ecole militaire polytechnique d’Alger 2011.
- [6] M. Koumri « Commande Intelligente d’une Éolienne à Vitesse Variable ». Thèse de doctorat, Université Sidi Mohammed Ben Abdallah Fès, Maroc 2017.
- [7] J. Martin, P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi « Énergies éoliennes» ;Techniques de l’Ingénieur, traité de Génie Énergétique pp. B 8 585 1- B 8 585 21
- [8] F. Poitiers, « Etude et commande des génératrices asynchrone pour l’utilisation de l’énergie éolienne : machine asynchrone à cage autonome et machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau ». Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de Nantes. 2003.
- [9] B. Multon, «Energie électrique : les enjeux». Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2008.
- [10] <https://gwec.net/global-wind-report-2023/>
- [11] S.M. Boudia. « Optimisation de l’Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l’Atlas des Vents en Algérie». Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen, Algérie,2013.
- [12] <https://www.cder.dz>.
- [13] P. Leconte, M. Rap in and E. Szechenyi, « Eoliennes », Techniques de l’Ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. 1-21, 2009.
- [14] G. B. Huang, Q. Y. Zhu and C. K. Siew, « Extreme learning machine: Theory and applications», Neurocomputing, vol. 70, pp. 489–501, 2006.
- [15] N. Kasbadji Merzouk, « Evaluation du gisement énergétique éolien. Contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie ». Thèse de doctorat. Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, (2006).
- [16] O. D. Vries, « On the theory of the horizontal axis wind turbine », Annual Review of Fluid Mechanics, 15(1), pp. 77-96, 1983.
- [17] A. Boyette, « Contrôle-commande d’un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de doctorat de l’université de Henri Poincaré, Nancy I, Décembre 2006.

- [18] R. Cheikh, « Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents et d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation », Thèse de doctorat de l'université de Biskra, Algérie, 2018.
- [19] F. Poitiers, M. Machmoum, and R. Le Doeuff, « Simulation of wind energy conversion system Based on a doubly - fed induction generator » , In 10th European Conference on Power Electronics And Applications Toulouse, France, September 2003.
- [20] N. Abu-Tabak, « Stabilité dynamique des systèmes électriques multimachines: modélisation, commande, observation et simulation », Thèse de Doctorat, École centrale de LYON, 2008.
- [21] H. Camblong, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la production d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM) Bordeaux, 2004.
- [22] S.Ghoudelbourk, «Etude Et Modélisation Des Convertisseurs Statiques Dans Une Chaîne Eolienne A Base De La Gada»,Thèse Doctorat, Université Annaba, Algérie, 2016.
- [23] F. Kendouli, « Centrale Eolienne Et Qualité De Energies Electrique ». Thèse Doctorat, Université De Constantine, Algérie, 2012.
- [24] F. Z. Belaimeche, « Contribution à la commande d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) dédié à l'énergie renouvelable ». Thèse Doctorat, Université De Sidi-Bel-Abbès, Algérie, 2018.
- [25] S. Mokrane, «Modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération ». mémoire de maîtrise d'ingénierie, Université du Québec en Abitibi-Témiscaminque, 2013.
- [26] M. El Mokadem, « Modélisation et simulation d'un système hybride pour un site isolé. Problématique liées aux fluctuations et variations d'énergie au point de couplage ». Thèse Doctorat, Université du Havre, France, 2006.
- [27] L. Ludovic, « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services système». Thèse Doctorat, Université des Sciences et technologies de Lille, France, 2004.
- [28] B. Meghni, « Contribution à l'amélioration des performances d'une chaîne énergétique éolienne ». Thèse Doctorat, Université d'Annaba, Algérie, 2015.
- [29] S. Drid, « Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'une machine à induction double alimentée à flux orienté avec optimisation de la structure d'alimentation : théorie & expérimentation ». Thèse de Doctorat de l'Université de Batna, Algérie,2005.
- [30] Y. Bekakra, « Contribution à l'Etude et à la Commande Robuste d'un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation ». Thèse doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2014.
- [31] W. Leonhard, « Adjustable-Speed AC Drives » Invited Paper; Proceedings of the IEEE, Volume: 76, Issue: 4, April 1988, pp.455-471.
- [32] W. Leonhard, « Control Electrical Drives », Springer Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 1997, pp. 287-306.
- [33] H. L. Nakra and B.Duke, « Slip power recovery induction generators for large vertical axis wind turbines, » IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 3, pp. 733–737, Dec. 1988.

- [34] Yong Liao, Li Ran, Ghanim A. Putrus, and Kenneth S. Smith, « Evaluation of the Effects of Rotor Harmonics in a Doubly-Fed Induction Generator with Harmonic Induced Speed Ripple, » IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 18, No. 4, December 2003, pp.508- 515.
- [35] R. Rouabhi, « Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée ». Thèse de Doctorat de l'Université de Batna 2, Algérie, 2016.
- [36] N. Abu-Tabak, «Stabilité dynamique des systèmes électriques multi machines: modélisation, commande, observation et simulation », Thèse de Doctorat, École centrale de LYON, France, 2008.
- [37] K. E. Johnson, Adaptive Torque Control of Variable Speed Wind Turbines, NREL/TP-500-36265, August 2004.
- [38] L. Dodson, K. Busawon and M. Jovanovic, Proceedings of the 44 IEEE Conference on Decision and Control and the European Control Conference, Seville, Spain, December 12-15 2005.
- [39] A. Rahim, M.A. Alam, M.F. Kandlawala, « Dynamic performance improvement of an isolated wind turbine induction generator », Computers and electrical engineering, Vol. 35, pp. 594-607, 2009.
- [40] S. EL AIMANI, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension ». Thèse de doctorat, École Centrale De Lille 2004.
- [41] S. Heier, « Grid integration of wind energy conversion systems », Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998.
- [42] J. Usaola, P. Ledesma, J.M. Rodriguez, J.L. Fernandez, D. Beato, R. Iturbe, J.R. Wihelmi, « Transient stability studies in grids with great wind power penetration. Modeling issues and operation requirements », Proceedings of the IEEE PES transmission and distribution conference and exposition, pp. 7-12, USA, September 2003.
- [43] L. Louze, « Production décentralisée de l'énergie électrique : Modélisation et contrôle d'une génératrice asynchrone auto excitée ». Thèse de doctorat D'Université Mentouri - Constantine. 08/07/2010.
- [44] 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 éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation ». Thèse de doctorat, Ecole militaire polytechnique d'Alger 2011.
- [45] R. Abdessamed, M. Kadjoudj, « Modélisation des machines électriques, » Presses de l'Université de Batna, 1997.
- [46] G. Salloum, « Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation, » Thèse de Doctorat, I.N.P de Toulouse, France, 2007.
- [47] F. Boumaraf, « Commande D'un Aérogénérateur- Apport des Techniques de l'intelligence Artificielle ». Thèse doctorat, Université de Batna, 2014.
- [48] D. Kairous, « Modélisation, Simulation et Commande d'un Système Éolien à Machine Asynchrone à Double Alimentation ». Thèse doctorat, l'Université d'Oran, 2013.

- [49] A. Benaskeur, « Aspects de l'application du Backstepping adaptatif à la commande décentralisée des systèmes nonlinéaires ». Thèse Doctorat, Université du Laval, 2000.
- [50] N. Hamdi, « Amélioration des performances des aérogénérateurs ». Thèse doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2013.
- [51] F. Kendouli, « Centrale éolienne et qualité de énergies électrique ». Thèse doctorat, À l'Université Mentouri de Constantine 2012.
- [52] Y. Soufi a, T. Bahi b, S. Lekhchine b, D. Dib a, « Performance analysis of DFIM fed by matrix converter and multi level inverter ». *Energy Convers Manage.* 72 (2013) 187–193.
- [53] H. Amimeur, « Contribution au contrôle de la machine asynchrone double étoile ». Thèse doctorat, Université de Batna, 2012.
- [54] Y. Bekakra, « Contribution à l'Etude et à la Commande Robuste d'un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation ». Thèse doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2014.
- [55] K. Kouzi, « Contribution des techniques de la logique Floue pour la commande d'une Machine à Induction sans Transducteur Rotatif. », Thèse de doctorat, Université de Batna, 2008.
- [56] Mustafa K. Guven, « Sensorless Control of induction field oriented Induction Machine Drives. », Thèse de doctorat, The Ohio State University, 2001.
- [57] D. Aouzellag, K. Ghedamsi, E.M. Berkouk, “Network power flux control of a wind generator,” *Renewable Energy*, Vol. 34, pp. 615-622, 2009.
- [58] R. Rouabhi, R. Abdessemed, A. Chouder, A. Djerioui, « Hybrid Backstepping Control of a DoublyFed Wind Energy Induction Generator ». *The Mediterranean Journal of Measurement and Control*, Vol: 11, N:1, January 2015, pp. 367-376.
- [59] R. Rouabhi, , R. Abdessemed, A. Chouder, A. Djerioui, « Power Quality Enhancement of Grid Connected Doubly-Fed Induction Generator Using Sliding Mode Control ». *International Review of Electrical Engineering*, Vol: 10, N: 2, March-April 2015, pp. 266-276.
- [60] R. Rouabhi, A. Djerioui, « Control of the power generated by variable speed wind turbine driving a doubly fed induction generator ». *Journal of Electrical Engineering*, Vol: 14 /2014-Edition:3, pp. 1-7.
- [61] G. Grellet and G. Clerc, « Actionneurs électriques-Principes Modèles Commande », Édition Eyrolles, Paris 1997
- [62] Y. Djeriri, « Commande Directe Du Couple Et Des Puissances D'une Mada Associée A Un Système Eolien Par Les Techniques De L'intelligence Artificielle », Thèse De Doctorat, Université De Sidi Bel Abbes 2015.
- [63] A. Boyette, “Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne,” Thèse de doctorat de l'université de Henri Poincaré, Nancy I, Décembre 2006.
- [64] A. Boyette, Ph. Poure and Sh. Saadate, “Direct and indirect control or a doubly fed induction generator wind turbine including a storage unit,” *IECO'06*, November 2006, Paris (CD Rom).
- [65] I. Boldea, « Variable speed generators ». Taylor & Francis 2006.

- [66] F. Poitiers, « Etude et commande des génératrices asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne : machine asynchrone à cage autonome et machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau ». Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de Nantes. 12/2003.
- [67] René Aubrée. « Stratégies de commande sans capteur et de gestion de l'énergie pour les aérogénérateurs de petite puissance. Energie électrique ». Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 2014.
- [68] François.Dezso Séra, « Real-time Modelling, Diagnostics and Optimised MPPT for Residential PV systems », PhD thesis, Aalborg University, Denmark, 2009.
- [69] Ahmad JAWAD, « A Unified Approach to Maximum Power Point Tracking and I-V Curve Determination of Photovoltaic Arrays from Real-time Measurements ». PhD thesis, Politecnico di Torino (Italy), 2017.
- [70] A. Mirecki, X. Roboam, and F. Richardeau, "Architecture Complexity and Energy Efficiency of Small Wind Turbines", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 54, no. 1, pp. 660–670, 2007. 41, 46, 71, 72, 73, 86
- [71] A. Gaillard. "Système Eolien Basé sur une MADA : Contribution à l'Etude de la Qualité de l'Energie Electrique et de la Continuité de Service". Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I ,2010.
- [72] M. Smaili, « modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération », Thèse de doctorat, Université du Quebec En Abitibi-Temiscamingue, 2013.
- [73] A.Gaillard,«Système Eolien Basé Sur Une Mada : Contribution A L'étude De La Qualité De L'énergie Electrique Et De La Continuité De Service », Thèse De Doctorat Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2010.
- [74] SHAW, I. S.; SIMÕES, M. G. Model-based Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Identification Techniques. Sao Paulo : Editora Edgard Blucher Ltda in co-edition with FAPESP, 1999. 165 p.
- [75] K. Chafaa, M. Ghanai and K. Benmahammed, 'Fuzzy Modeling using Kalman Filter', IET(ex IEE) Control theory and applications, Vol. 1, N° 1, pp. 58-64, 2007.B.B.Meunier, « La logique floue et ces applications », Addison, 1995.
- [76] M. Kaouane, « Contribution à la commande d'un système de conversion hybride photovoltaïque-éolien avec stockage de l'énergie ». Thèse de doctorat D'université Houari Boumediene – Alger . 28/05/2018.
- [77] Deepak Verma, S. Nema, A. M. Shandilya, and Soubhagya K. Dash "Comprehensive analysis of maximum power point tracking techniques in solar photovoltaic systems under uniform insolation and partial shaded condition" Journal Of Renewable And Sustainable Energy 7, 042701 (2015).
- [78] Z. M. Dalala, Z. Zahid, W. Yu, Y. Cho, and J. S. Lai, "Design and Analysis of an MPPT Technique for Small-Scale Wind Energy Conversion Systems," Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol. PP, pp. 1-12, 2013.
- [79] M. A.Abdullah, A. H. M.Yatim, C.W.Tan, and R.Saidur, "A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 3220– 3227, 2012.

- [80] S. Abdeddaim, « Optimisation de deux systèmes de génération renouvelable (photovoltaïque et éolienne) connectés au réseau », Thèse de doctorat, Université de Biskra, 2013.
- [81] F. Poitiers, « Etude et commande des génératrices asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne : machine asynchrone à cage autonome et machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau ». Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de Nantes. 12/2003.
- [82] Y. Xia, K. H. Ahmed, and B. W. Williams, "A New Maximum Power Point Tracking Technique for Permanent Magnet Synchronous Generator Based Wind Energy Conversion System," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 3609-3620, 2011.
- [83] B.B.Meunier, « La logique floue et ces applications », Addison, 1995.
- [84] A.ghani El Ougli, « Intégration des techniques floues à la synthèse de contrôleurs adaptatifs », Thèse de doctorat, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Fès- Maroc ,2009
- [85] L.A. Zadeh, « The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning », *Information Science*, Part. I (8) pp. 199-249, Part II (8) pp. 301- 357, Part III (9) pp. 43-80, 1975
- [86] A .Zadah, « Fuzzy set », *Information and control*, vol.8,pp.338-354, 1965.
- [87] Belkacem Y., Drid S., Makouf A., Chrifi-Alaoui L. Multi-agent energy management and fault tolerant control of the micro-grid powered with doubly fed induction generator wind farm. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, online publication,2021,vol.238. doi: <https://doi.org/10.1007/s13198-021-01228-2> .
- [88] Slimane W., Benchouia M.T., Golea A., Drid S. Second order sliding mode maximum power point tracking of wind turbine systems based on double fed induction generator. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2020, pp. 716-727. doi: <https://doi.org/10.1007/s13198-020-00987-8> .
- [89] Galdi V., Piccolo A., Siano P. Exploiting maximum energy from variable speed wind power generation systems by using an adaptive Takagi–Sugeno–Kang fuzzy model. *Energy Convers Manage*, 2009, pp.413-21. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.09.004>
- [90] Abdeddaim S.Achour B.Drid S. Becherif M. Implementation of MRAC controller of a DFIG based variable speed grid connected wind turbine. *Energy Conversion and Management*, Elsvier, 2014, vol.79, pp.281–288. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.12.003>.
- [91] Guezgouz M.Jurasz J. Chouai M., Bloomfield H., Bekkouche B.Assessment of solar and wind energy complementarity in Algeria. *Energy Conversion and Management*, 238,2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114170>.
- [92] Nedjari H.-D, Haddouche S.-K, Balehouane A., Guerri O. Optimal windy sites in Algeria: Potential and perspectives. *Energy*, 2018, Vol.147,pp.1240-1255. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.046>.
- [93] Yazhou L. Mullane A. Lightbody G., Yacamini R. Modeling of the wind turbine with a doubly fed induction generator for grid integration studies. *IEEE Transactions on*

- Energy Conversion, 2006, vol. 21, no. 1, pp. 257–264.
<https://doi.org/10.1109/TEC.2005.847958>.
- [94] Cheikh R., Menacer A., Drid S. Robust control based on the Lyapunov theory of a grid-connected doubly fed induction. *Front. Energy*, 2013, doi: <https://doi.org/10.1007/s11708-013-0245-y>.
- [95] Bodson M., Chiasson J. Differential-geometric methods for control of electric motors. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. 1998, vol. 8, no. 11, pp. 923–954. doi: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1239\(199809\)](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1239(199809)).
- [96] Abdelbasset M. M., Drid S., Sid M.A, Cheikh R. Robust direct power control based on the lyapunov theory of a gridconnected brushless doubly fed induction generator. *Frontiers in Energy*. 2016, , vol. 10, no. 3, pp. 298-307.
 doi: <https://doi.org/10.1007/s11708-016-0411-0>.
- [97] Khalil H. *Nonlinear systems*. 1996, Prentice Hall, 2ed edition USA.
 doi: 10.1109/9.481517.
- [98] Drid S., Makouf A., Nait-Said M.S, Tadjine M. The doubly fed induction generator robust vector control Based on Lyapunov Method. 2009 , *Transactions on Systems, Signals & Devices*, vol. 4, no. 2, pp. 1-13, 1861-5252/c 2009 TSSD.
- [99] Kaddache M., Drid S., Khemis A., Rahem D., Chrifi-Alaoui, L., Drid M. D. Fuzzy-type-2 maximum power tracking controller of the double fed wind generator. 21st international Cnference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA) IEEE, 2022, pp. 512-515.
 doi: <https://doi.org/10.1109/STA56120.2022.10019178>.
- [100] Kim I.S., Kim M.B., Youn M.J. New maximum power point tracker using sliding-mode observer for estimation of solar array current in the grid-connected photovoltaic system. 2006, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 4, pp. 1027-1035. doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2006.878331>.
- [101] Hemeyine, A.V., Abbou A., Tidjani N., Bakouri M. A Robust takagi sugeno fuzzy models control for a variable speed wind turbine based a DFI-generator. *International Journal of Intelligent Engineering Systems*. 2020, vol. 13, no. 5, pp.90-100. doi: <https://doi.org/10.22266/ijies2020.0630.09>
- [102] Hemeyine A.V., Abbou A., Bakouri A., Labbadi M., El-Moustapha S.M.o.M. Power Control for Wind Turbine Driving a Doubly Fed Induction Generator using Type-2 Fuzzy Logic Controller. In *Proceedings of the 7th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, Agadir, Morocco, 2019, pp.27-30doi: <https://doi.org/10.1109/IRSEC48032.2019.9078146>
- [103] Hessad M.A., Bouchama Z., Benagoune S., Behih K. Cascade sliding mode maximum power point tracking controller for photovoltaic systems. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 1, pp. 51-56.
 doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.1.07>.
- [104] F. Boumaraf, « Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle ». Thèse doctorat, Université de Batna, 2014.

- [105] P.Rioual, H. Pouliquen, J-P. Louis, « Control of a PWM rectifier in the unbalanced state by robust voltage regulation ». The European Power Electronics Association, N°13-169, 1993.
- [106] R. Abdelli, D. Rekioua, T. Rekioua, A. Tounzi, « Improved direct torque control of an induction generator used in a wind conversion system connected to the grid ». ISA Transactions 52(2013).pp:525–538