



Université d'Oran 2
Institut de Maintenance et de sécurité Industrielle
Électromécanique industrielle

Stratégie de commande robuste de l'éolienne

Présentée et soutenue publiquement par :

Berrebih ilyes

Soltani abdallah

Devant le jury composé de :

Mr. BENFFKIR abderrhim	Maître assistant A	Université d'Oran 2	Président
Mr. BELABBES Abdallah	Maître conférence B	Université d'Oran 2	Encadreur
Melle. YACHIR Amina	Ingénieur principal de laboratoire	Université d'Oran 2	Co-encadreur
Mr. ADDA NEGGAZ samir	Maître conférence A	Université d'Oran 2	Examineur

2023/2024

Stratégie de commande robuste de l'éolienne

Résumé :

Cette étude présente une simulation d'un système de contrôle avancé pour les générateurs synchrones à aimant permanent (PMSG) dans les applications d'éoliennes. Dans un premier temps, nous avons établi un modèle du PMSG, puis détaillé deux méthodes de contrôle distinctes, y compris la logique floue. Bien que le contrôle proportionnel-intégral soit largement utilisé, il rencontre des difficultés dans la gestion des systèmes non linéaires. Cependant, des avancées dans diverses méthodes de contrôle ont émergé, offrant de meilleures performances. Les simulations ont été réalisées avec MATLAB/SIMULINK.

Robust Control Strategy for Wind Turbines

Abstract:

This study presents a simulation of an advanced control system for permanent magnet synchronous generators (PMSG) in wind turbine applications. Initially, we established a model of the PMSG and then detailed two distinct control methods, including fuzzy logic. While proportional-integral control is widely used, it faces challenges in managing non-linear systems. However, advancements in various control methods have emerged, offering improved performance. The simulations were conducted using MATLAB/SIMULINK.

استراتيجية التحكم القوي لتوربينات الرياح

الملخص:

تقدم هذه الدراسة محاكاة لنظام تحكم متقدم للمولدات المتزامنة ذات المغناطيس الدائم PMSG في تطبيقات توربينات الرياح. في البداية، أنشأنا نموذجًا لـ PMSG ثم قمنا بتفصيل طريقتين متميزتين للتحكم، بما في ذلك FLC. على الرغم من استخدام التحكم التناسبي التكامل على نطاق واسع، إلا أنه يواجه تحديات في إدارة الأنظمة غير الخطية. ومع ذلك، فقد ظهرت تطورات في طرق التحكم المختلفة، مما أدى إلى تحسين الأداء. تم إجراء عمليات المحاكاة باستخدام MATLAB/SIMULINK.

Remerciements

Nous exprimons d'abord notre gratitude envers notre Dieu tout-puissant, qui nous a accordé la force et le courage nécessaires pour réaliser ce travail.

Nous sommes profondément reconnaissants envers nos parents pour leurs encouragements, leur soutien et les sacrifices qu'ils ont consentis.

Enfin, nous tenons à remercier notre encadrant M. Belabbes, pour son sérieux, sa compétence et ses précieux conseils.

Sommaire

Remerciements	3
Sommaire	4
Liste des Figures	6
Liste des Abréviations et notations	8
Introduction Générale	10
Chapitre 1: Généralité sur système éolienne	11
1.1 Introduction	12
1.1 Définition et principe de l'énergie éolienne	12
1.2 Types D'EOLIENNES	13
1.2.1 Éoliennes à axe horizontal	13
1.1.1 Éoliennes à axe vertical	15
1.1.1 Éoliennes spécifiques à leur usage	16
1.2 Principaux composants d'une éolienne à axe HORIZONTAL	17
1.3 L'état d'art des system de commandes	19
1.3.1 Contrôle proportionnel-dérivé-intégral (PID)	19
1.3.2 Contrôle logique flow (FLC)	21
1.4 Conclusion	24
Chapitre 2: Modélisation de la chaine éolienne	25
2.1 Modélisation de la turbine	26
2.1.1 Modélisation de la turbine	26
2.1.2 Maximisation de la puissance et control de l'angle	38
2.2 Modélisation de GSAP	39
2.2.1 Les aimants permanents	40
2.2.2 Structure des machines synchrones triphasées	44
2.3 Modélisation des convertisseurs dos à dos	50
2.3.1 Modélisation du convertisseur cote génératrice (CCM)	50
2.3.2 Modélisation du convertisseur cote réseau (CCR)	51
2.4 Conclusion	52
Chapitre 3: Les commandes avancés dans la chaine éolienne	53
3.1 commande classic (PI)	54
3.1.1 Calcul du régulateur (PI)	55
3.1.2 Modèle de contrôleur de convertisseur côté génératrice MSC	55
3.1.3 Modèle de contrôleur de convertisseur côté réseau GSC	56
3.2 La commande à logique flow (FLC)	58
3.2.1 Principes généraux d'une commande par logique floue	58
3.2.2 Fuzzification	63
3.2.3 Inférence	64
3.2.4 Défuzzification	66
3.2.5 Commande de vitesse par logique floue	67
3.3 Conclusion	68

Chapitre 4: Simulation.....	69
4.1.1 Simulation de la commande (PI).....	71
4.1.2 Simulation de la commande (FLC).....	74
4.1.3 Comparaison.....	77
4.2 Conclusion.....	81
4.2 Conclusion Générale.....	82
Bibliographie.....	83
Annexes.....	86

Liste des Figures

- Figure I-1 : classification des éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pale
- Figure I-2 : classification des éoliennes à axe vertical
- Figure I-3 : Composition d'une éolienne
- Figure II-1 : Entrées – sorties du modèle de la voilure
- Figure II-2 : colonne d'air animée d'une vitesse v
- Figure II-3 : Caractéristiques coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique
- Figure II-4 : Influence de l'angle de calage β sur le coefficient de puissance C_p
- Figure II-5 : Tube de courant autour d'une éolienne
- Figure II-6 : Modèle simplifié de la turbine
- Figure II-7 : Schéma fonctionnel de la commande d'angle de l'orientation de pale.
- Figure II-8 : Modèle de PARK pour la GSAP
- Figure II-9 : Schéma de principe d'un redresseur MLI
- Figure II-10 : Schéma de principe d'un onduleur MLI
- Figure III-1 : la structure générale de la commande PI
- Figure III-2 : Schéma block du régulateur PI
- Figure III-3 : Configuration de base d'un régulateur par logique floue (FLC).
- Figure III-4 : Intersection des sous-ensembles flous « PETITE » et « MOYENNE » pour la variable linguistique (VITESSE).
- Figure III-5 : Union des sous-ensembles flous « petite » et « moyenne » pour la variable linguistique (vitesse).
- Figure III-6 : Complémentation du sous-ensemble flou « petite ».
- Figure III-7 : Fonctions d'appartenance des entrées et de la sortie du régulateur flou choisi
- Figure III-8 : Matrice d'inférence du régulateur flou
- Figure III-9 : Défuzzification
- Figure III-3 : Rules of fuzzy logic
- Figure III-4 : schéma du système de contrôle MPPT-Fuzzy
- Figure IV-1 : vent perturbé
- Figure IV-2 : couple (PI)
- Figure IV-3 : puissance active (PI)
- Figure IV-4 : vitesse mécanique (PI)
- Figure IV-5 : V_{dc} (PI)
- Figure IV-6 : courant réseaux (PI)
- Figure IV-7 : courant réseaux zoom (PI)

Figure IV-8 : vitesse mécanique (FLC)
Figure IV-9 : couple (FLC)
Figure IV-10 : puissance active (FLC)
Figure IV-11 : Vdc (FLC)
Figure IV-12 : courant réseaux (FLC)
Figure IV-13 : courant réseaux zoom (FLC)
Figure IV-14 : puissance active (FLC-PI)
Figure IV-15 : vitesse mécanique (FLC-PI)
Figure IV-16 : couple (FLC-PI)
Figure IV-17 : Vdc (FLC-PI)
Figure IV-18 : courant réseaux (PI)
Figure IV-19 : courant réseaux zoom (PI)
Figure IV-20 : courant réseaux (FLC)
Figure IV-21 : courant réseaux zoom(FLC)

Liste des Abréviations et notations

GSAP	Génératrice Synchrone à Aimant Permanent.
PI	Proportionnel, integral control.
FLC	Fuzzy logic control.
C_p	Le coefficient de puissance.
$C_{p_{max}}$	Le coefficient de puissance maximale.
λ	Le coefficient de vitesse réduite optimale.
λ_{opt}	Le coefficient de vitesse réduite optimale.
Q	L'angle d'orientation des pales.
C_t	Le couple électromagnétique.
J	Moment d'inertie de la partie tournante (kg.m ²).
f	Coefficient de frottement visqueux (N.m.s/rad).
$V_{s_{abc}}$	Tension de phases statoriques.
$I_{s_{abc}}$	Courant de phases statoriques.
d	Indice de l'axe direct.
q	Indice de l'axe en quadrature.
Ω_t	Vitesse de rotation avant multiplicatrice en rad/s

R_s	La résistance des phases statoriques.
L_d, L_q	Inductances d'axes directe et en quadrature.
φ_f	Représente le flux des aimants.
$I_{g_{abc}}$	Courant de réseau.
$V_{g_{abc}}$	Tension de réseau.
P_g	Puissance mécanique
A	la valeur moyenne de la vitesse du vent
ak	Amplitude de l'harmonique de l'ordre K
wk	Pulsation de l'harmonique de l'ordre K
ir	Le rang du dernier retenu dans le calcul du profil du vent.

Introduction Générale

Les énergies renouvelables sont de plus en plus considérées à l'échelle mondiale en tant qu'alternative viable aux générateurs à combustibles fossiles classiques. C'est une réponse directe au défi de l'épuisement des réserves de combustibles fossiles et de son impact sur la pollution de l'environnement. L'énergie éolienne continue de jouer un rôle important et peut être considérée comme la source d'énergie renouvelable la plus déployée. Toutefois, le contrôle d'un système éolien influence en grande partie son niveau d'efficacité et sa rentabilité par rapport à son application.

Il existe différents types de commandes qui permettent de contrôler la chaîne éolienne et d'obtenir des courants avec une fréquence fixe et avec moins de perturbations, une de ces commandes est la commande logique floue, elle est la plus récente et l'une des meilleures commandes.

Ce mémoire est structuré en 4 chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons abordé un aperçu général de la chaîne éolienne et retracé l'historique des commandes utilisées.

Le deuxième chapitre a pour but de modéliser la turbine éolienne et la génératrice à aimant permanent dans le plan de Park, ainsi que les convertisseurs..

Le troisième chapitre est consacré pour les deux commandes utilisées.

Le quatrième chapitre vise à comparer les deux commandes. Enfin, une conclusion est présentée en apportant quelques perspectives.

Chapitre 1

Généralité sur système éolienne

Introduction :

L'énergie éolienne est une forme d'énergie renouvelable qui est générée par la force du vent. Cette énergie est captée par des éoliennes, qui convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en électricité. Voici quelques définitions et principes fondamentaux de l'énergie éolienne :

I-1 Définition et principe de l'énergie éolienne :

I-1.1 Définitions de l'énergie éolienne

1. **Énergie éolienne** : "L'énergie éolienne est l'énergie obtenue par la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique à l'aide de turbines éoliennes."

2. **Turbine éolienne** : "Une turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie du vent en électricité en utilisant des pales qui captent le mouvement du vent pour faire tourner un générateur." [21]

3. **Parc éolien** : "Un parc éolien est un groupe de turbines éoliennes installées dans une même zone géographique, utilisées collectivement pour produire de l'électricité." [22]

I.1.2Principes de fonctionnement de l'énergie éolienne

1. **Conversion de l'énergie cinétique** : Le principe fondamental de l'énergie éolienne repose sur la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Les pales de l'éolienne captent le vent, qui fait tourner un rotor. Cette rotation est ensuite convertie en énergie électrique par un générateur. [23]

2. **Loi de Betz** : Selon la loi de Betz, une turbine éolienne ne peut capter qu'au maximum 59,3% de l'énergie cinétique du vent qui la traverse. Cette limite théorique est due à la nécessité de laisser une partie du vent continuer à se déplacer après avoir traversé les pales de l'éolienne, afin de maintenir le flux d'air.

3. **Facteur de capacité** : Le facteur de capacité d'une éolienne est la mesure de l'efficacité avec laquelle une turbine convertit l'énergie du vent disponible en électricité. Ce facteur dépend de la vitesse du vent, de la conception de la turbine, et de la configuration du site d'installation. Un facteur de capacité élevé indique une plus grande efficacité et une meilleure exploitation des ressources éoliennes disponibles. [24]

4. **Avantages environnementaux** : L'énergie éolienne est considérée comme une source d'énergie propre et durable, car elle n'émet pas de gaz à effet de serre lors de la production d'électricité. De plus, elle contribue à réduire la dépendance aux combustibles fossiles et à promouvoir la transition énergétique vers des sources renouvelables. [25]

I-2 Type d'éolienne

I-2.1 Éoliennes à axe horizontal (HAWT - Horizontal Axis Wind Turbines)

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus courantes et sont souvent utilisées pour la production d'électricité à grande échelle.

1. Éolienne tripale : "Les éoliennes tripales représentent le design le plus répandu dans le monde en raison de leur efficacité aérodynamique et de leur faible niveau de bruit, ce qui en fait le choix préféré pour les grands parcs éoliens terrestres et offshore." [22]

2. Éolienne bipale : "Bien que moins courantes que les éoliennes tripales, les éoliennes bipales peuvent être plus économiques à construire et à entretenir, surtout dans des régions où les coûts doivent être minimisés." [26]

3. Éolienne monopale : "Les éoliennes monopales, bien que rares, présentent des avantages en termes de réduction de poids et de coûts de fabrication, mais souffrent de limitations en matière de stabilité et de rendement énergétique."

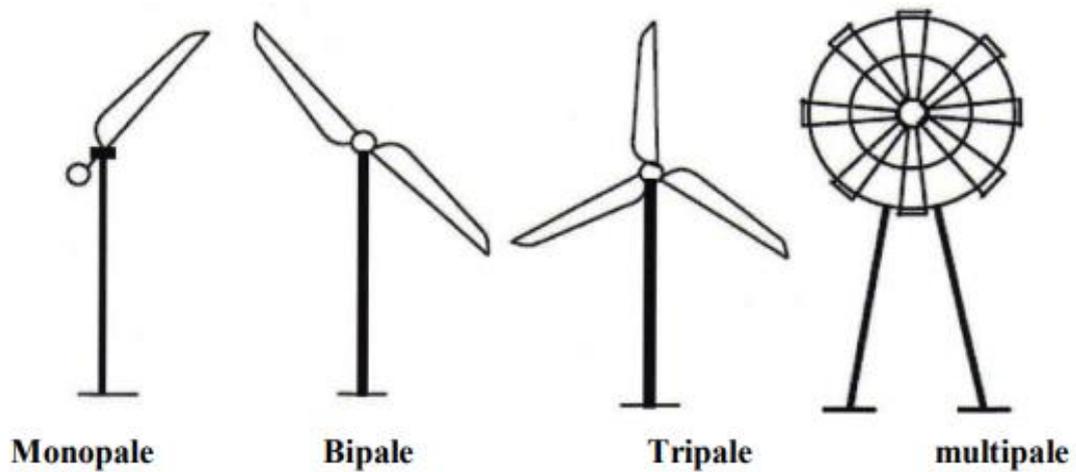


Figure I-1 : classification des éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pale

I-2.2 Éoliennes à axe vertical (VAWT - Vertical Axis Wind Turbines)

Les éoliennes à axe vertical sont moins courantes mais présentent des avantages dans certaines conditions spécifiques.

1. Éolienne de type Darrieus : "Les éoliennes de type Darrieus sont particulièrement adaptées aux environnements où les vents sont turbulents ou changent souvent de direction, car elles peuvent capter le vent de toutes les directions sans nécessiter de mécanisme d'orientation."

2. Éolienne de type Savonius : "Les éoliennes de type Savonius, bien que généralement moins efficaces en termes de rendement énergétique, sont robustes et capables de fonctionner à des vitesses de vent très faibles, ce qui les rend idéales pour des applications urbaines ou à petite échelle." [24]

3. Éolienne hybride : "Les éoliennes hybrides, combinant des éléments des types Darrieus et Savonius, tentent d'optimiser à la fois le démarrage à basse vitesse et l'efficacité à des vitesses de vent plus élevées."

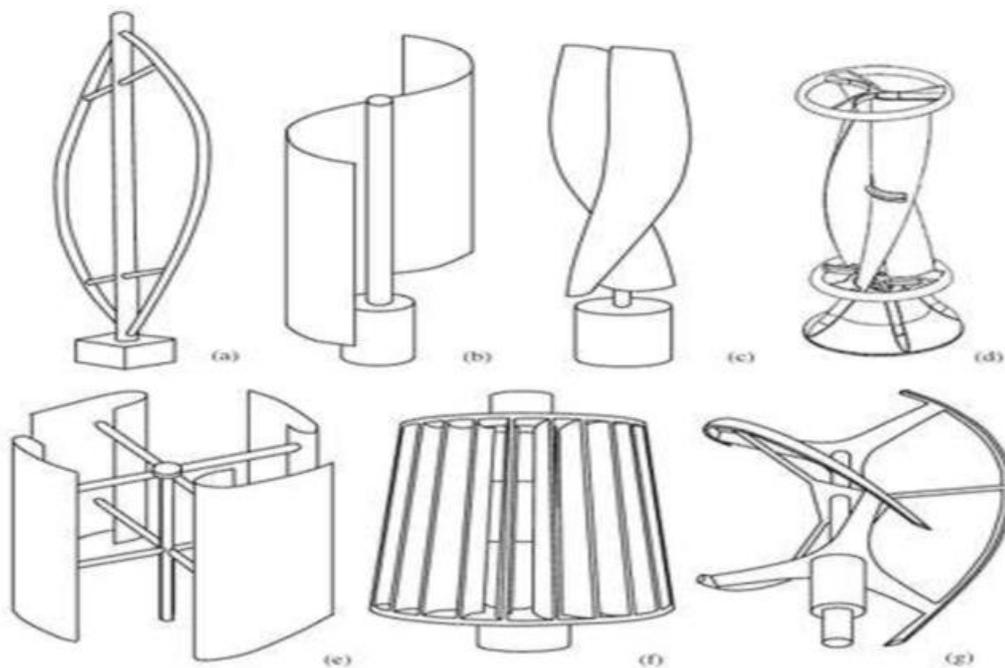


Figure I-2 : classification des éoliennes à axe vertical

I-2.3 Éoliennes spécifiques à leur usage

1. Éoliennes terrestres : "Les éoliennes terrestres varient considérablement en taille et en capacité, allant des petites turbines résidentielles aux grandes installations industrielles qui dominant le paysage dans les zones à fort potentiel éolien."

2. Éoliennes offshore : "Les éoliennes offshore sont conçues pour capturer des vents plus forts et plus constants en mer, offrant un potentiel de production d'énergie beaucoup plus élevé que leurs homologues terrestres, bien que les coûts d'installation et de maintenance soient également plus élevés."

3. Éoliennes de toit (urbaines) : "Les éoliennes de toit, généralement de petite taille, sont utilisées dans des environnements urbains pour fournir une source d'énergie complémentaire aux bâtiments, bien qu'elles soient souvent moins efficaces en raison des conditions de vent perturbées en milieu urbain."

I-3 Principaux composants d'une éolienne a axe horizontal

Machine qui transforme l'énergie cinétique du Vent (déplacement d'une masse d'air) en énergie électrique.

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

a. Rotor : partie rotative de l'éolienne placée en hauteur afin de capter des vents forts et réguliers. Il est composé de pales (en général 3) en matériau composite qui sont mises en mouvement par l'énergie cinétique du vent. Reliées par un moyeu, ces dernières peuvent en moyenne mesurer chacune 25 à 60 m de long et tourner à une vitesse de 5 à 25 tours par minute.

b. Nacelle : structure soutenue par le mât abritant les différents éléments mécaniques. On distingue les éoliennes à entraînement direct de celles équipées de train d'engrenages (multiplicateur/réducteur) selon le type d'alternateur utilisé. Les alternateurs classiques requièrent une adaptation de la vitesse de rotation par rapport au mouvement initial du rotor. Elle est composée de :

- Le multiplicateur de vitesse : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques.

- L'arbre secondaire : comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.

- La génératrice : Différents types de génératrices peuvent être rencontrés.

c. Tour : composée du mât, du système de commande électrique et du transformateur. Généralement de forme conique, le mât supporte la nacelle. Il mesure entre 50 et 130 m de haut et a un diamètre à son pied compris entre 4 et 7 m. Une ouverture en bas du mât permet d'accéder aux différents équipements de l'éolienne,

parmi lesquels le transformateur, qui permet d'augmenter la tension de l'électricité produite afin de l'injecter sur le réseau.

d. Base : souvent circulaire et en béton armé dans le cas des éoliennes terrestres, qui permet de maintenir la structure globale.

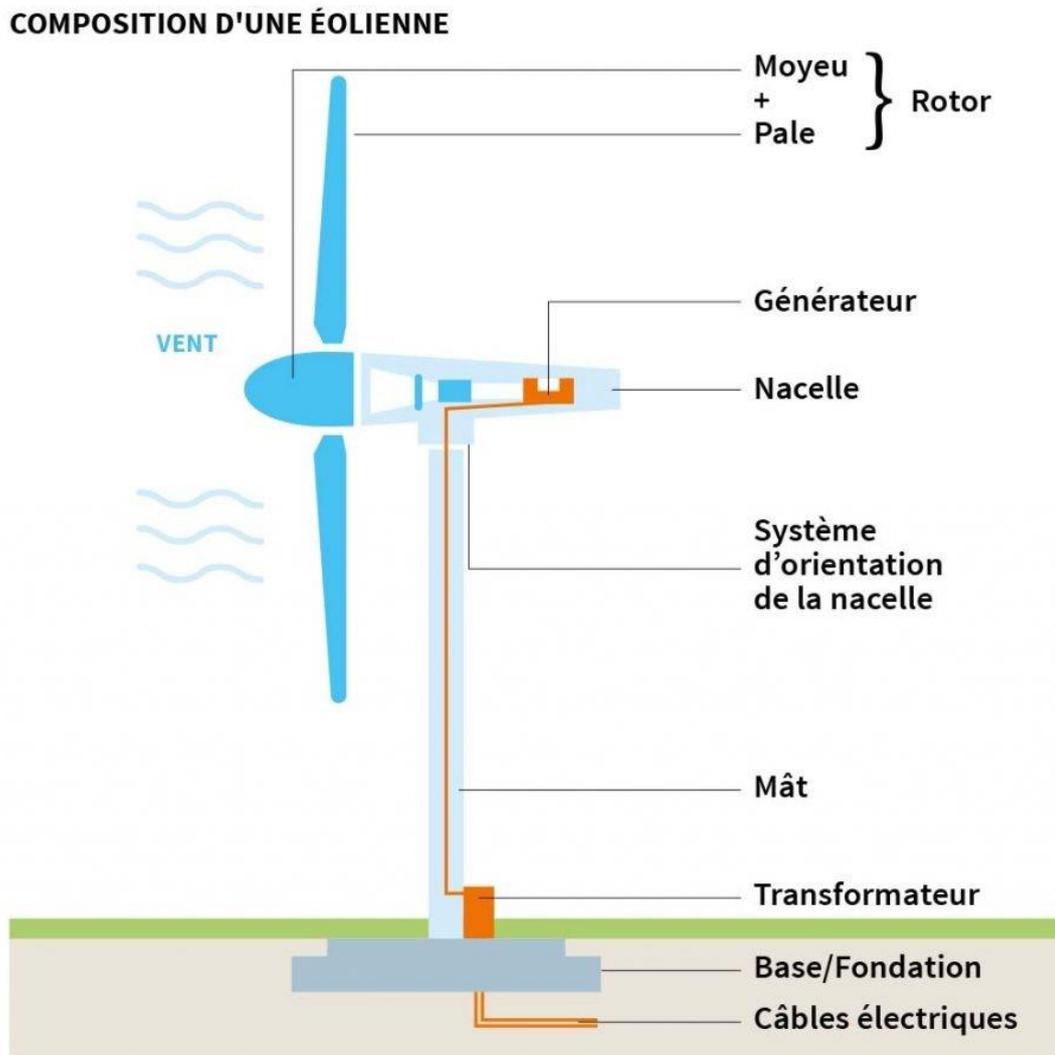


Figure I-3 : Composition d'une éolienne

I-4 L'état d'art des systèmes de commandes :

I-4.1 Contrôle proportionnel-dérivé-intégrale (PID)

C'est l'une des méthodes de contrôle les plus couramment utilisées dans les systèmes d'automatisation industrielle et d'ingénierie. Le contrôleur PID combine trois actions de contrôle différentes (proportionnelle, intégrale et dérivée) pour réguler une variable de processus et minimiser l'erreur entre la mesure réelle et la valeur de consigne.

1. Origines et développement initial

L'idée du contrôle proportionnel (P) a vu le jour au début du 19e siècle. Le concept a été utilisé pour les régulateurs de vitesse des moteurs à vapeur. James Watt, avec son régulateur à boule tournant, a posé les bases d'un contrôle par rétroaction en 1788.

- Régulateur de vitesse de James Watt (1788) : "Le régulateur à boule de Watt est l'un des premiers exemples de mécanisme de rétroaction pour contrôler la vitesse des moteurs à vapeur, en utilisant un système mécanique pour ajuster l'entrée du moteur en fonction de sa sortie." (Astrom et Kumar, 2014)

2. Développement du contrôle proportionnel et intégral (PI)

Les années 1920 marquent le début de l'application formelle du contrôle proportionnel et intégral dans l'industrie. Nicolas Minorsky, un ingénieur américain, a été l'un des premiers à proposer des concepts qui deviendront les fondements du contrôle PID.

- Travail de Nicolas Minorsky (1922) : "Minorsky a introduit l'idée de contrôle proportionnel et intégral pour améliorer la stabilité des navires en utilisant

la théorie des systèmes dynamiques et a démontré les avantages de combiner les actions de contrôle proportionnelles et intégrales." (Minorsky, 1922)

3. Introduction du contrôle dérivé (PID complet)

Dans les années 1930, la troisième composante, le contrôle dérivé, a été introduite pour améliorer la stabilité et la réactivité des systèmes de contrôle. La combinaison de ces trois actions de contrôle a conduit à la formulation du contrôleur PID moderne.

- Introduction du contrôle dérivé : "La composante dérivée a été ajoutée pour anticiper les erreurs futures et améliorer la stabilité du système, complétant ainsi le développement du contrôleur PID tel que nous le connaissons aujourd'hui." (Bennett, 1993)
- Application industrielle et standardisation (années 1940-1950) : Le PID est devenu largement utilisé dans l'industrie avec le développement de l'électronique analogique et des systèmes de contrôle pneumatiques dans les années 1940 et 1950. Le premier contrôleur PID électronique a été fabriqué par Taylor Instruments dans les années 1940.
- Premier contrôleur PID électronique : "Le premier contrôleur PID électronique, développé dans les années 1940, a permis une utilisation plus large du PID dans l'industrie, grâce à sa capacité à offrir un contrôle plus précis et ajustable." (Morrison, 1960)

4. Avancées avec l'électronique numérique

Avec l'avènement des microprocesseurs et des ordinateurs dans les années 1980, le contrôle PID est devenu encore plus répandu. Les contrôleurs PID numériques permettent des ajustements plus précis et la mise en œuvre de fonctions supplémentaires comme la gestion de plusieurs entrées et sorties.

- Contrôleurs PID numériques : "Les progrès dans la technologie des microprocesseurs ont permis l'introduction de contrôleurs PID numériques, offrant des capacités de traitement plus flexibles et précises que leurs homologues analogiques." (Åström and Hägglund, 1995)

5.Évolution moderne et applications avancées

De nos jours, les contrôleurs PID sont utilisés dans une grande variété d'applications, des systèmes d'automatisation industrielle aux drones, en passant par les systèmes de contrôle de processus complexes.

- Utilisation moderne et applications : "Le contrôleur PID reste l'une des stratégies de contrôle les plus populaires en raison de sa simplicité, de sa robustesse et de son efficacité dans une vaste gamme d'applications." (Dorf and Bishop, 2011)

I-4.2 Contrôle logique flou (FLC)

C'est une méthode de contrôle utilisée pour gérer l'incertitude et l'imprécision dans les systèmes complexes. Cette approche de contrôle est basée sur la logique floue, qui a été développée pour modéliser les raisonnements humains en utilisant des valeurs imprécises ou incertaines.

1. Origines de la logique floue

La logique floue a été introduite par Lotfi A. Zadeh, un professeur à l'Université de Californie, Berkeley, en 1965. Zadeh a proposé la logique floue comme une extension de la logique booléenne pour mieux gérer le concept d'imprécision et d'incertitude.

- Travail de Lotfi A. Zadeh (1965) : "La logique floue a été introduite par Zadeh pour fournir un cadre mathématique permettant de traiter des données vagues

ou imprécises, en utilisant des valeurs de vérité qui peuvent varier continuellement entre 0 et 1." (Zadeh, 1965)

Premières applications : "Les premières applications de la logique floue au contrôle des systèmes se sont concentrées sur des processus industriels simples, démontrant que la logique floue pouvait gérer des systèmes avec une dynamique incertaine ou non linéaire." (Mamdani, 1974)

2.Développement du premier contrôleur logique flou (années 1970)

Le premier contrôleur logique flou opérationnel a été développé par Ebrahim Mamdani en 1974, un pionnier dans le domaine de la logique floue appliquée au contrôle. Il a utilisé la logique floue pour contrôler un générateur de vapeur, démontrant ainsi l'efficacité de cette approche dans des applications industrielles.

- Contrôleur de Mamdani (1974) : "Mamdani a développé le premier contrôleur logique flou opérationnel pour un générateur de vapeur, montrant que les techniques de logique floue pouvaient être utilisées pour contrôler des systèmes industriels avec succès." (Mamdani, 1974)

- Popularisation et adoption industrielle (années 1980) : Dans les années 1980, le contrôle logique flou a commencé à gagner en popularité en dehors des cercles universitaires. Le Japon a été l'un des premiers pays à adopter cette technologie dans l'industrie automobile et dans les systèmes de transport, où les conditions de fonctionnement étaient trop complexes pour les contrôleurs conventionnels.

- Adoption au Japon : "Le Japon a été un leader dans l'adoption des contrôleurs logiques flous, intégrant cette technologie dans des produits commerciaux tels que les transmissions automatiques de voitures et les systèmes de contrôle des trains." (Yasunobu et Miyamoto, 1985)

3.Expansion mondiale et applications avancées (années 1990-2000)

Les années 1990 ont vu une expansion mondiale de l'utilisation du contrôle logique flou, notamment dans l'électronique grand public, les systèmes d'automatisation industrielle, la robotique, et les appareils ménagers. Les contrôleurs logiques flous ont été intégrés dans des machines à laver, des caméscopes et des systèmes de climatisation pour améliorer les performances et l'efficacité énergétique.

- Applications grand public : "Les contrôleurs logiques flous ont trouvé de nombreuses applications dans les appareils ménagers et l'électronique grand public, en raison de leur capacité à améliorer les performances tout en simplifiant les conceptions de contrôle." (Kosko, 1992)

I-5 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté les principes généraux et l'historique de la turbine éolienne

Ainsi que les différents types de commande utilisés pour contrôler un système éolien et les avis des chercheurs précédents.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation de la turbine éolienne, GSAP et les convertisseur dos à dos.

Chapitre 2

Modélisation de la chaîne éolienne

Introduction :

Dans ce chapitre, nous nous concentrons exclusivement sur la modélisation d'une turbine éolienne, GSAP et des convertisseur dos à dos.

Les modèles et les lois de commande associées sont rapidement développés et sont parfaitement adaptés à la simulation des phénomènes de nature mécanique et électromécanique étudiés ici.

II-1 MODELISATION DE LA TURBINE

Considérons une turbine éolienne à trois pales orientables, fixées sur un l'arbre de la turbine formant ainsi un bloc mécanique capable de tourner grâce à l'énergie du vent. Ceci permet de déduire que chaque partie de cet ensemble subit trois contraintes à savoir sa propre inertie, le frottement et la contrainte élastique. D'une manière générale l'arbre de la turbine est solidaire d'un multiplicateur de vitesse, qui, à son tour et lié à l'arbre de la génératrice.

II-1.1 La turbine éolienne

La voilure éolienne est un élément tridimensionnel, ayant des formes complexes, en mouvement et plongée dans un flux d'air. Un modèle prenant en compte toutes ces propriétés n'est à l'heure actuelle pas envisageable. Toutefois, et c'est un point important, le modèle en question doit décrire la dynamique mécanique réelle de la voilure, et non pas uniquement le comportement quasi-statique.

Une voile éolienne transforme l'énergie de la masse d'air en mouvement et délivre une puissance mécanique caractérisée par la vitesse de rotation et le couple mécanique [10] [15]



Figure II- 1 Entrées – sorties du modèle de la voile

1.2 Modèle du profil de vent

Pour une éolienne, le vent est la source principale d'énergie. Il est nécessaire d'avoir un modèle mathématique du profil de vent. Ce dernier peut être une simple loi exponentielle ou des distributions spectrales et spatiales très complexes qui rendent compte de sa phénoménologie turbulente [16]

La modélisation du profil du vent est primordiale pour :

- Définir les conditions de fonctionnement de l'éolienne ;
- Définir les solutions qui s'appliquent sur les pales ;
- Développer et affiner la modélisation du rotor ;
- Evaluer le potentiel d'énergie utilisable ;
- Fournir une aide pour l'implantation des machines

La définition du modèle du profil du vent nécessite la connaissance des données climatiques et géographiques du site concerné, ainsi que la période de l'an concerné par l'étude. Le modèle du profil du vent est donné par une série de Fourier qui représente le vent comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques.

Il est donné par l'équation II.1 [16]

$$Vv(t) = A + \sum_{k=1}^{ir} ak \sin(wkt) \quad (\text{II.1})$$

Avec :

- **A** : la valeur moyenne de la vitesse du vent
- **ak** : Amplitude de l'harmonique de l'ordre K
- **wk** : Pulsation de l'harmonique de l'ordre K
- **ir** : Le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent.

1.3 La puissance du vent

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur l'arbre. L'énergie cinétique des particules d'air d'une masse **m** et qui se déplacent à une vitesse **V** est donnée par :

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad (\text{II.2})$$

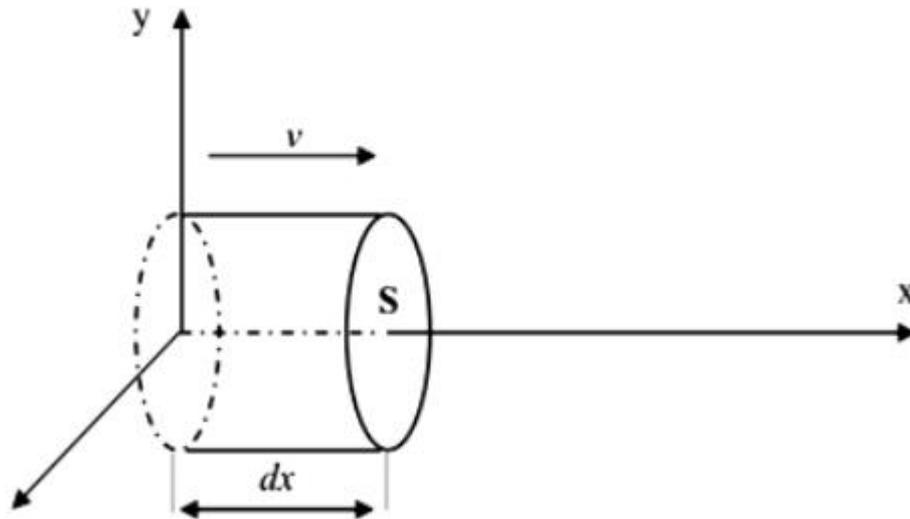


Figure II- 2 colonne d'air animée d'une vitesse v

D'où :

E_c : C'est l'énergie cinétique en (joule)

V : C'est la vitesse du vent en (m/s)

m : C'est la masse de l'air en (Kg)

Si on applique cette relation sur les éoliennes donc on doit préciser sur la masse qui tourne les pâles de l'éolienne, cette masse est donner par la formule

$$m = \rho V_{ol} \quad (II.3)$$

Avec :

ρ : Est la masse volumique de l'air en général elle est égale à 1,25 (Kg/m³).

V_{ol} : C'est le volume de l'air qui fait tourner les pâles de l'éolienne en (m³) et ce volume est donner par la formule suivante

$$V_{ol} = S e \quad (\text{II.4})$$

D'où :

S : C'est la surface balayée par les pâles de l'éolienne en (m²)

e : Est l'épaisseur des pales en (m)

Donc on peut introduire l'énergie théoriquement récupérable par les éoliennes est donnée par la formule :

$$Ec = \frac{1}{2} \rho S e V^2 \quad (\text{II.5})$$

Mais on sait que la puissance **P** est donnée par la relation suivante :

$$P = \frac{E}{t} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

P : La puissance en watts (W)

E : L'énergie en joule (j)

t : Le temps en seconde (s)

Donc si on remplace la formule (II.6) on obtient la formule suivante :

$$P = \frac{\frac{1}{2} \rho S e V^2}{t} \quad (\text{II.7})$$

Avec

$$\frac{e}{t} = V \quad (\text{II.8})$$

Donc la formule sera

$$P = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (\text{II.9})$$

Peut être donné par la formule $S = \pi R^2$ avec R c'est le rayon de rotor en (m), donc la formule sera :

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 \quad (\text{II.10})$$

Ce qui nous montre que la puissance absorbée de l'éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent et de carrée de rayon de rotor (la longueur de la pale).

Une éolienne ne pourra jamais récupérer l'énergie totale fournie par le vent donc il y a un coefficient que nous sommes obligées d'en tenir compte dans notre formule c'est le coefficient de puissance C_p .

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3 \quad (\text{II.11})$$

Ce coefficient de puissance indique l'efficacité avec laquelle l'éolienne convertit l'énergie mécanique du vent en électricité. Ce coefficient diffère suivant les turbines car il est proportionnel à la vitesse spécifique λ et l'angle de calage β (l'angle du vent par rapport à l'axe de pale).

La vitesse spécifique λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent. La vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne est donnée par la formule :

$$v = R \Omega \quad (\text{II.12})$$

Avec :

v : C'est la vitesse de l'extrémité des pales en (m/s)

R : La longueur des pales en (m)

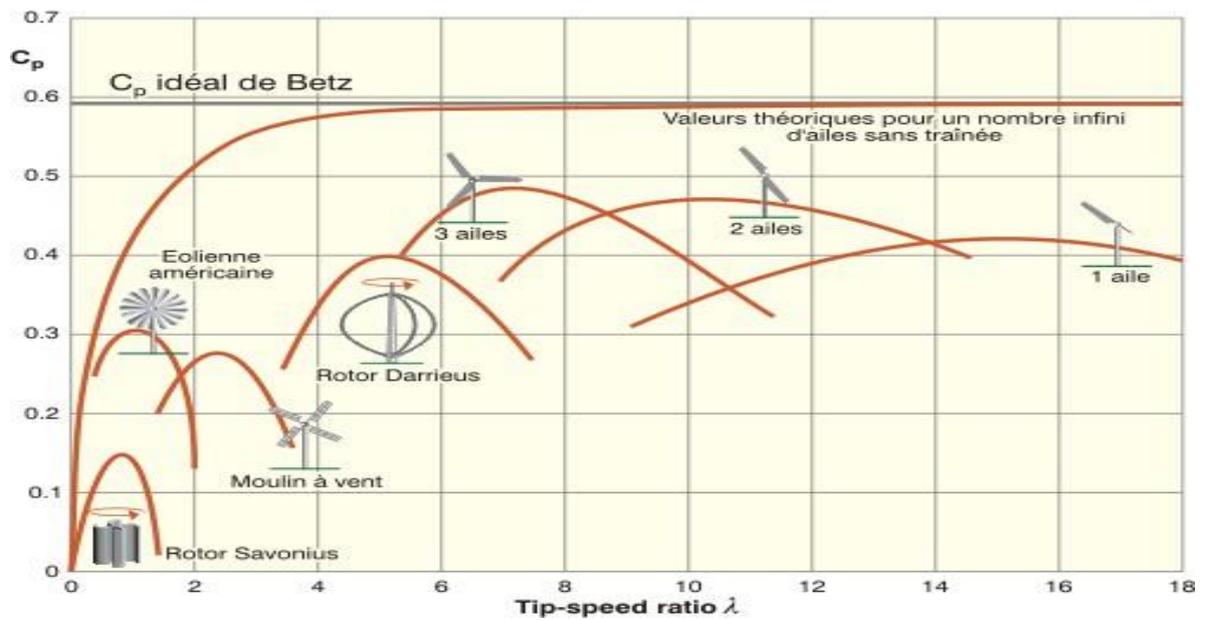
Ω : La vitesse angulaire des pales en (**rad/s**)

Et comme les éoliennes ont différentes longueurs de pales donc chaque éolienne est caractérisée par sa vitesse résultante de déplacement des pales. On peut introduire maintenant le rapport entre cette vitesse v et la vitesse du vent primaire par la vitesse spécifique :

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V_1} \quad (\text{II.13})$$

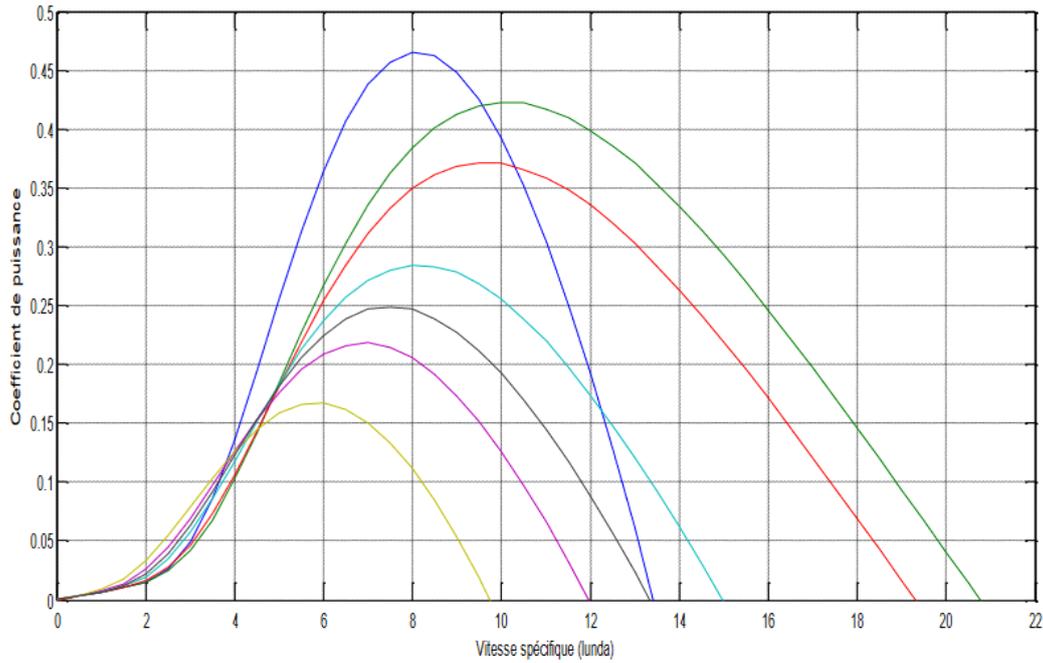
Cette vitesse est une caractéristique importante pour les éoliennes, chaque éolienne a son vitesse spécifique nominale λ_{nom} et d'après cette vitesse on peut classer les éoliennes.

Dans la pratique il Ya des rotors avec $0,9 < \lambda < 15$, dans des cas exceptionnels $\lambda = 20$. La vitesse spécifique nominale λ_{nom} permet cataloguer les rotors de la suivante façon : ceux qui avec λ jusqu'à les environs de 3 on les appelé éoliennes lents et ceux qui avec λ supérieur à 4 on les appelé éoliennes rapides figure (II.3).



Figure(II-3) : Caractéristiques coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique

L'autre paramètre qui influe sur le coefficient de puissance est l'angle de calage β . La figure (II.3) illustre la variation du C_p en fonction de λ pour différentes valeurs de β .



Figure(II-4) : Influence de l'angle de calage β sur le coefficient de puissance C_p

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (\text{II.14})$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) \quad (\text{II.15})$$

$$c_1 = 0.5$$

$$c_4 = 5$$

$$c_2 = 116$$

$$c_5 = 21$$

$$c_3 = 0.4$$

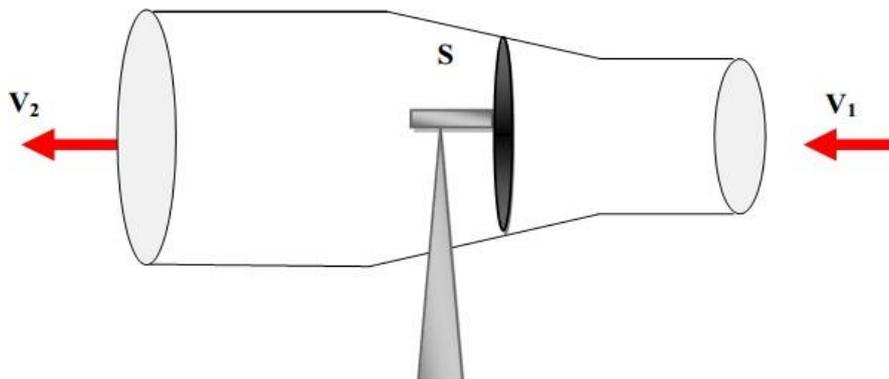
$$c_6 = 0.0086 \text{Tapez une équation ici.}$$

Sur la (Figure II.4), plusieurs courbes sont distinguées, mais nous sommes intéressés à celle qui possède le plus haut sommet ($\beta=0$). Cette courbe est caractérisée par le point optimal ($\lambda_{opt}=8.1$; $C_{pmax} =0.475$) qui est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance C_{pet} donc au

maximum de la puissance mécanique récupérée. Nous remarquons que l'augmentation de β permet de réduire le coefficient C_p et par conséquent, provoque la diminution de la puissance mécanique récupérée sur l'axe de la turbine éolienne.

1.4 La limite de BETZ

La loi de BETZ détermine qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de $\frac{16}{27}$ (ou **59%**) de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Ce fut l'Allemand Albert Betz qui, en 1929, formula la loi de Betz pour la première fois. Considérons le système de la figure 1-2 qui représente un tube de courant autour d'une éolienne à axe horizontal. V_1 représente la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.



Figure(II-5) : Tube de courant autour d'une éolienne.

La masse d'air en mouvement traversant ce tube en une seconde est donnée par le produit de la densité d'air, la surface, et la vitesse moyenne.

$$m_0 = \frac{\rho s(V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{II.16})$$

La puissance réelle extraite par le rotor des pales est la différence des puissances du vent en amont et en aval.

$$P_m = \frac{m_0(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{II.17})$$

Soit en remplaçant m_0 par son expression dans :

$$P_m = \frac{\rho s (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (\text{II.18})$$

La puissance totale théoriquement disponible sur la surface S est extraite sans diminution de vitesse de vent en mettant $v_2=0$ dans l'expression :

$$P_m = \frac{\rho s V_1^3}{4} \quad (\text{II.19})$$

1.5 Modèle de l'arbre

Par le principe de conservation de l'énergie cinétique de rotation échangée via le multiplicateur de vitesse, entre le rotor de la turbine et le rotor de génératrice, l'inertie totale peut s'écrire sous la forme :

$$J = \frac{J_{\text{turbine}}}{G^2} + J_g \quad (\text{II.22})$$

$$J \cdot \frac{d\Omega_{\text{mec}}}{dt} = C_{\text{mec}} \quad (\text{II.23})$$

Le couple mécanique C_{mec} prend en compte le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple de frottement visqueux C_{vis} et le couple moteur issu du multiplicateur C_g . (Figure II.6)

$$C_{\text{mec}} = C_g - C_{\text{em}} - C_{\text{vis}} \quad (\text{II.24})$$

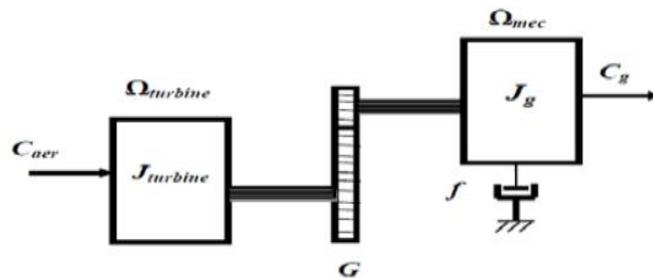


Figure II-6 : *Modèle simplifié de la turbine*

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottement Visqueux f :

$$C_{\text{vis}} = f \cdot \Omega_{\text{mec}} \quad (\text{II.25})$$

II-2 Maximisation de la puissance et contrôle de l'angle

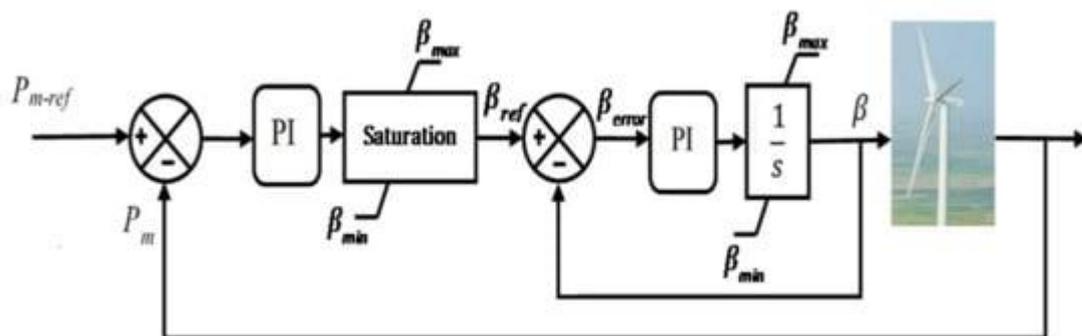
La structure de la commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, le couple éolien peut être déterminé à partir de la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent et de la mesure de la vitesse mécanique.

$$C_t^* = \frac{P_{t,max}}{\omega_m^*} = \frac{1}{2\omega_m^*} C_{p,max} \rho S V_{ref}^3 \quad (II.26)$$

La mesure de la vitesse du vent apparaissant au niveau de la turbine étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue à partir de l'équation suivante.

$$V_{ref} = \frac{\omega_m^* R}{\lambda} \quad (II.27)$$

De plus, pour garantir la protection et la sécurité du système éolien et maintenir la Puissance à sa valeur nominale, une technique mécanique appelée contrôle de l'angle de l'orientation de pale est généralement utilisée pour ajuster l'angle d'inclinaison des pales en fonction de la vitesse du vent. Cette technique limite la puissance de sortie et la vitesse une fois que la vitesse du générateur dépasse 30 % de sa valeur nominale vitesse. La figure montre la structure de contrôle de l'angle de l'orientation de pale.



FigureII-7 : Schéma fonctionnel de la commande d'angle de l'orientation de pale.

II-3 Modélisation de GSAP :

Les machines électriques sont généralement modélisées par des équations non linéaires. Cette non-linéarité provient des inductances et des coefficients des équations dynamiques qui varient en fonction de la position du rotor, et donc en fonction du temps. Pour simplifier ce modèle dynamique, un changement de variable est souvent appliqué, ce qui permet de réduire le nombre de variables et de supprimer la dépendance de la position du rotor dans les coefficients des équations différentielles. Cela facilite la détermination des conditions de régime permanent, ainsi que l'analyse de stabilité et la synthèse de commande.

Une machine synchrone est une machine électrique qui :

- Soit génère un courant électrique dont la fréquence est déterminée par la vitesse de rotation du rotor, fonctionnant en mode « génératrice » dans deux quadrants du plan couple-vitesse. L'alternateur est une forme spécifique de machine synchrone, opérant en mode génératrice dans un seul quadrant du plan couple-vitesse.
- Soit consomme un courant électrique dont la fréquence fixe la vitesse de rotation du rotor, fonctionnant en mode « moteur ».

II-2.1 Les aimants permanents :

Les aimants permanents sont des matériaux capables de produire un champ magnétique continu sans nécessiter de source d'énergie extérieure. Selon **Jacques Lacaze et Marcel Lambert** dans *Magnétisme et électromagnétisme*, "un aimant permanent est un objet fabriqué à partir d'un matériau ferromagnétique qui, après avoir été magnétisé, conserve une aimantation rémanente de manière durable." Ils sont largement utilisés dans diverses applications technologiques, notamment dans les moteurs électriques, les générateurs, et les dispositifs de stockage de données, en raison de leur capacité à maintenir un champ magnétique constant.

Les aimants permanents sont fabriqués à partir de divers matériaux, chacun ayant des propriétés magnétiques spécifiques adaptées à des applications particulières. Voici quelques-uns des matériaux couramment utilisés pour fabriquer des aimants permanents :

1. Ferrites : Composées principalement d'oxyde de fer et de divers autres métaux, les ferrites sont utilisées dans des applications telles que les transformateurs et les haut-parleurs. Elles sont généralement peu coûteuses et résistantes à la corrosion.

2. Aimants en néodyme (NdFeB) : Ce type d'aimant est fabriqué à partir d'un alliage de néodyme, de fer et de bore. Il offre une puissance magnétique élevée et est utilisé dans des applications nécessitant des aimants compacts et puissants, comme dans les moteurs électriques, les disques durs, et les générateurs.

3. Aimants en samarium-cobalt (SmCo) : Composé principalement de samarium et de cobalt, ce type d'aimant est très résistant à la chaleur et à la corrosion. Il est utilisé dans des environnements extrêmes ou des applications hautement spécialisées où la stabilité thermique est cruciale.

4. Aimants en alnico : Ce type d'aimant est fabriqué à partir d'un alliage d'aluminium, de nickel et de cobalt. Les aimants en alnico offrent une bonne stabilité thermique et magnétique, et sont souvent utilisés dans des applications telles que les micros de guitare et les capteurs.

5. Aimants en terre rare : Les aimants fabriqués à partir d'éléments de terres rares (comme les composés de néodyme ou de samarium) offrent des performances magnétiques élevées. Ils sont souvent utilisés dans des technologies de pointe nécessitant des champs magnétiques puissants.

II-2.2 Machine synchrone à aimant permanent

Le terme "machine synchrone" désigne l'ensemble des machines dont la vitesse de rotation du rotor correspond à celle du champ tournant du stator. Pour assurer ce fonctionnement, le champ magnétique du rotor est créé soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique du rotor reste alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose un synchronisme entre le champ tournant du stator et le rotor, d'où l'appellation de "machine synchrone".

Structure des machines synchrones : La structure des machines synchrones triphasées comprend plusieurs éléments clés qui permettent de transformer l'énergie électrique en énergie mécanique (ou vice versa). Voici une description détaillée des principaux composants de ces machines :

Le Stator : Le stator est la partie fixe de la machine synchrone. Il est constitué d'un noyau en acier laminé, composé de fines feuilles d'acier empilées pour réduire les pertes dues aux courants de Foucault. Les encoches à la surface interne du stator abritent les enroulements statoriques.

Le rotor : Le rotor est la partie mobile du moteur synchrone. Couplé mécaniquement à un treuil d'ascenseur par exemple, il va créer un couple moteur capable de fournir un travail de montée et de descente de la cabine d'ascenseur. Il se compose essentiellement d'une succession de pôles Nord et Sud intercalés sous forme d'aimants permanents ou de bobines d'excitation parcourues par un courant continu. On distingue donc deux types de moteurs :

- à aimants permanents,
- à rotor bobinés.

Rotor à aimant permanent : Ce sont des moteurs qui peuvent accepter des courants de surcharge importants pour démarrer rapidement. Associés à des variateurs de vitesse électronique, ils trouvent leur place dans certaines applications

de motorisation d'ascenseurs lorsque l'on cherche une certaine compacité et une accélération rapide (immeuble de grande hauteur par exemple).

Rotor bobiné : Ce type de machines est réversible car elles peuvent fonctionner en régime moteur comme en régime alternateur. Pour les moyennes et grosses puissances, les moteurs synchrones à rotor bobiné, associé avec un variateur de vitesse, sont des machines performantes.

Comme le montre la figure ci-dessous, le rotor est composé d'un empilement de disques ferro-magnétiques. Comme dans le stator du moteur, des enroulements sont logés dans des encoches pratiquées sur le rotor et reliés électriquement aux bagues de bout d'arbre. L'alimentation en courant continu s'effectue via l'ensemble bagues-balais. [13]

II-2.3 La génératrice synchrone à aimants permanents

L'une des pièces maîtresses d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne est la génératrice [10].

A l'heure actuelle, grâce à la mise au point d'aimants permanents de grande qualité, permettant l'obtention de couples massiques élevés, les machines à aimants sont de plus en plus utilisées. Lorsque leur nombre de pôles est élevé, leurs puissances peuvent atteindre quelques centaines de kilowatts. Toutefois, Elles sont surtout utilisées pour les petites et moyennes puissances de l'ordre de quelques dizaines de kilowatts. Dans ce cas, l'aimant permanent permet d'obtenir, à taille égale, une induction dans l'entrefer plus élevée que pour les machines à rotor bobiné. Par ailleurs, l'emploi d'aimants permanents annule les pertes par effet joule au rotor et augmente le rendement [11], [12].

2.3.1 Modèle mathématique de la machine synchrone

Le modèle mathématique de la machine synchrone est établi sur la base de certaines hypothèses simplificatrices essentielles [9] :

- absence de saturation dans le circuit magnétique,
- distribution sinusoïdale de la FMM créée par les enroulements du stator,
- hystérésis, courants de Foucault et effet de peau négligés,
- effet d'encochage négligeable,
- résistance des enroulements ne variant pas avec la température.

La structure de la machine synchrone à aimants permanents comporte un enroulement triphasé au stator. L'excitation rotorique est créée par des aimants permanents au rotor. Ces aimants sont supposés rigides et de perméabilité voisine de celle de l'air

Les équations de tension et flux : La machine à aimant possède trois enroulements statoriques fixes, a, b, c. Au rotor

On trouve des aimants permanents. Le flux créé par les aimants permanents est supposé à répartition sinusoïdale le long de l'entrefer, les expressions des flux mutuelles inducteur- phases sont donnée par :

φ_f : est la valeur crête du flux crée par l'aimant permanent à travers les enroulements statorique.

Les équations électriques de la machine synchrone à aimants permanents dans le référentiel triphasé sont

$$[va] = [Rs][Ia] + \frac{d\varphi_a}{dt} \quad (\text{II.28})$$

$$[vb] = [Rs][Ib] + \frac{d\varphi_b}{dt} \quad (\text{II.29})$$

$$[vc] = [Rs][Ic] + \frac{d\varphi_c}{dt} \quad (\text{II.30})$$

$[\varphi_a \varphi_b \varphi_c]$: Vecteurs des flux dans les enroulements statoriques.

$[R_s]$: Résistance d'une phase d'enroulement statorique.

Equation mécanique : L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble

Turbine et générateur est donnée par

$$(f_m - f_t)\Omega + (j_t + j_m)\frac{d\Omega}{dt} = C_{eol} - C_{em} \quad (\text{II.31})$$

Où : j_t et j_m sont les inerties de la turbine et de la machine respectivement, le f_m

Coefficient de frottement de la machine, le f_t coefficient de frottement des pâles et c_{eol} le couple statique fournie par l'éolienne.

Dans notre application, nous ne considérons que le coefficient de frottement associé à la génératrice (celui de la voilure ne sera pas pris en compte). Par suite, le modèle qui caractérise le comportement mécanique de la chaine éolienne est donné par l'équation différentielle suivante :

$$C_{eol} = j_t \frac{d\Omega}{dt} + c_m + f_m \Omega \quad (\text{II.32})$$

La transformation de Park : La transformation de Park consiste à transformer les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système.

Dans la théorie de PARK, on utilise la transformation unique permettant le passage direct du système triphasé au système diphasé tournant, cette transformation est notée par [P] d'où :

$$P(\theta) \frac{3}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

Nous appliquons donc le changement de variables défini par la matrice $P(\theta)$ aux équations des tensions, courant, et flux on obtient [18] :

$$I_{dq} = P(\theta)[I_{abc}] \quad (\text{II.34})$$

$$V_{dq} = P(\theta)[V_{abc}] \quad (\text{II.35})$$

$$\varphi_{dq} = P(\theta)[\varphi_{abc}] \quad (\text{II.36})$$

La matrice inverse de Park notée, est donnée par la matrice suivante :

$$P(\theta)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

Equations électriques : En transformant les équations statoriques en leurs nouvelles équations dans le repère (d, q) par l'application de la transformation de Park on obtient le système d'équation suivant

Les composantes de la tension statorique sont données dans le repère de Park par :

$$\text{Avec } \theta_q = \int i_{qi} dt \quad (\text{II.38})$$

$$\theta_d = \int i_{di} dt + \phi_f \quad (\text{II.39})$$

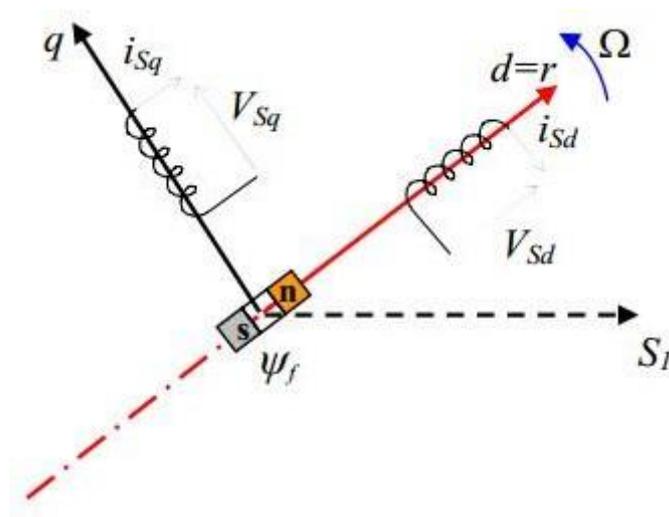


Figure II-8 Modèle de PARK pour la GSAP.

Equation du couple électromagnétique : Si on néglige le frottement sec, le couple électromécanique fourni est transmis à la charge et d'autre part, sert à l'accélération du rotor et à la comparaison du frottement visqueux. Selon la loi de Newton, l'équation fondamentale de la mécanique est :

Le couple électromagnétique C_t est exprimé par la dérivée partielle de stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor [6]:

$$C_t = \frac{3}{2} P i_{sq} \varphi_f \quad (\text{II.40})$$

Model d'équation d'état : Le modèle général de l'entrée-sortie de la machine synchrone à aimants permanents est lié au choix de vecteur d'état. Dans le cas des équations de la GSAP, dans le repère lié au rotor, les composantes des vecteurs d'entrées de la machine sont les tensions V_{sd} , V_{sq} et les courants i_{sd} et i_{sq} statoriques sont les composantes du vecteur de sortie. Notre objectif dans ce qui suit est de mettre les équations sous la forme d'équations d'état suivant :

$$[i] = [A][I] + [B][V] \quad (\text{II.41})$$

$$\frac{di_{sd}}{dt} = -\frac{V_{sd}}{L_d} - \frac{R_s}{L_d} i_{sd} - \omega \frac{L_q}{L_d} i_{sq} \quad (\text{II.42})$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = -\frac{V_{sq}}{L_d} - \frac{R_s}{L_d} i_{sq} - \omega \frac{L_q}{L_d} i_{sq} + \frac{\omega}{L_q} \varphi_f \quad (\text{II.43})$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & \omega \frac{L_q}{L_d} \\ -\omega \frac{L_d}{L_q} & \frac{R}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_q} & \frac{\omega}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ \varphi_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.44})$$

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & \omega \frac{L_q}{L_d} \\ -\omega \frac{L_d}{L_q} & \frac{R}{L_q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.45})$$

$$[B] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_q} & \frac{\omega}{L_q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.46})$$

$$[A] = [A1] + \omega[A2] = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{R}{L_q} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_q}{L_d} \\ -\frac{L_d}{L_q} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.47})$$

$$[B] = [B1] + \omega[B2] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_q} & 0 \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.48})$$

Donc la forme générale d'état de la GSAP est :

$$[I] = ([A1] + \omega [A2]) [I] + ([B1] + \omega [B2])[V] \quad (\text{II.49})$$

A partir des dernières équations d'état on peut résumer le schéma global de la GSAP

II-3 MODELISATION DES CONVERTISSEURS DOS A DOS :

La configuration de deux convertisseurs dos à dos à commande MLI est populaire dans les systèmes éoliens, placée soit au niveau du stator ou du rotor de la génératrice. L'un des deux convertisseurs est lié à la machine (CCM) et l'autre est lié au réseau électrique ou à une charge autonome via un filtre inductif de courant (CCR), les deux convertisseurs sont interconnectés par un bus continu qui autorise ainsi un transfert de puissance bidirectionnel entre une source à fréquence variable et l'autre à fréquence fixe. Supposons qu'on travaille en régime hyper-synchrone de la génératrice, cela veut dire que le CCM fonctionne en onduleur et le CCR prend la fonction d'un redresseur. [7]

II-3.1 Modélisation du convertisseur cote génératrice (CCM) :

L'onduleur triphasé à deux niveaux de tension possédant six cellules de commutation constituée chacune d'un IGBT et une diode antiparallèle est montré sur la (figure II-9). On considère que la source continue (V_{dc}) est parfaite et les tensions

simples alimentant, le bobinage triphasé couplé en étoile, présentent un système triphasé équilibré. [7]

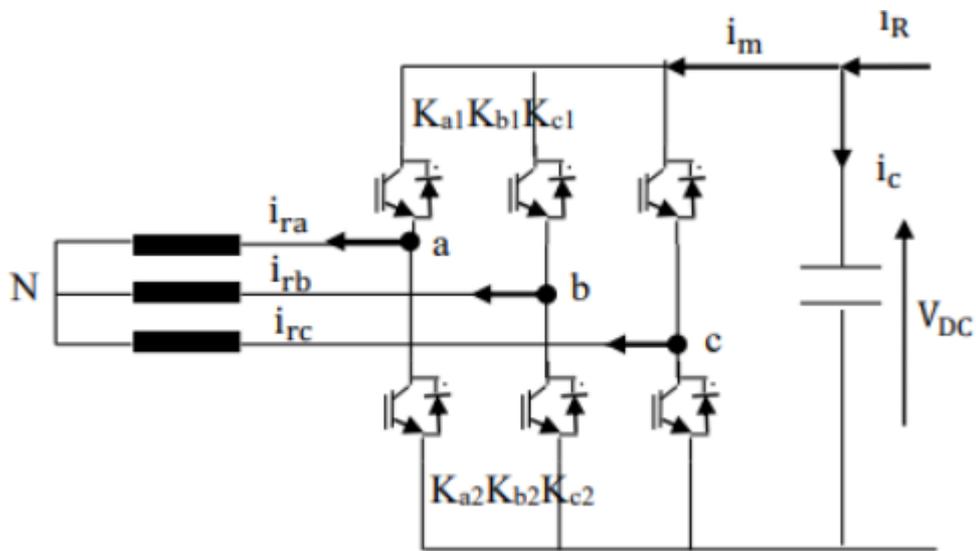


Figure II-9 : Schéma de principe d'un redresseur MLI

$$\left(L \frac{d}{dt} + R\right) i_n = V_n - V_{dc} \left(S_n \frac{1}{3} \sum S_{n=a}^c\right) \quad (\text{II.50})$$

$$c \frac{d}{dt} V_{dc} = V_n - V_{dc} \left(S_n \frac{1}{3} \sum i_n S_n - i_{ch_{k-a}}^c\right) \quad (\text{II.51})$$

La combinaison des équations (II.50) et (II.51) permet de représenter un schéma fonctionnel triphasé

II-3.2 Modélisation du convertisseur cote réseau (CCR) :

Le redresseur triphasé à deux niveaux de courant possédant six cellules de commutation constituée chacune transistors IGBT ou thyristor GTO pour les fortes puissances, en anti parallèle avec des diodes. Pour la commande on utilise la technique de la modulation de largeur d'impulsion.

Figure II-10 montré le schéma de principe d'un onduleur MLI :

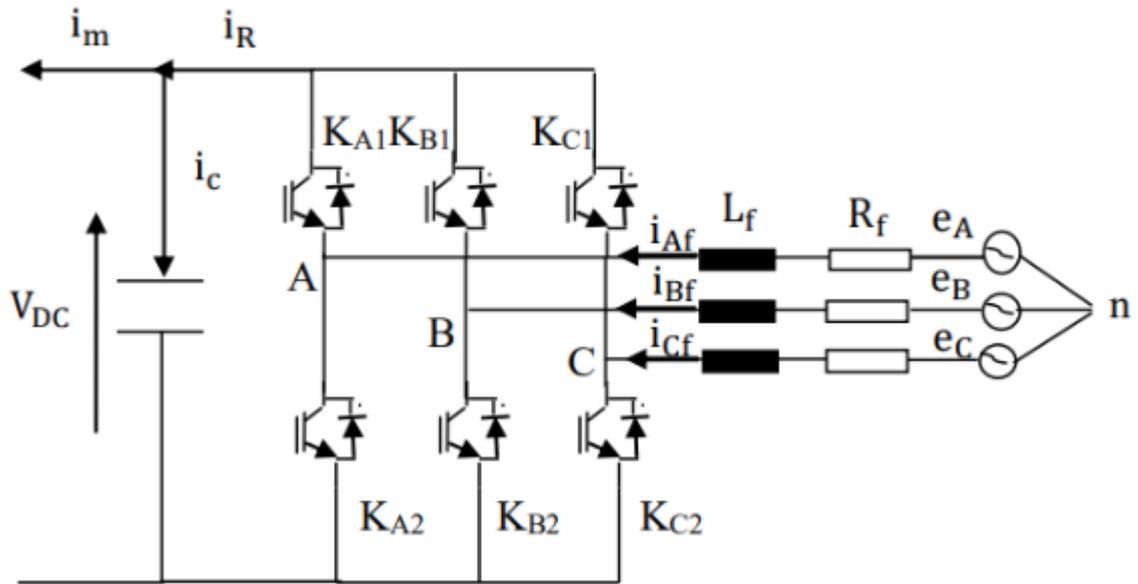


Figure II-10 Schéma de principe d'un onduleur MLI

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = -\frac{1}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II. 52})$$

CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons modélisé la turbine éolienne, La GSAP et les convertisseurs statiques.

Chapitre 3

Les commandes avancés dans la chaîne éolienne

Introduction :

Dans ce chapitre on va expliquer et modéliser 2 types de commandes qu'on va utiliser pour améliorer les performances de notre chaîne éolienne, les 2 commandes sont (PI-FLC).

III-1 COMMANDE CLASSIC (PI)

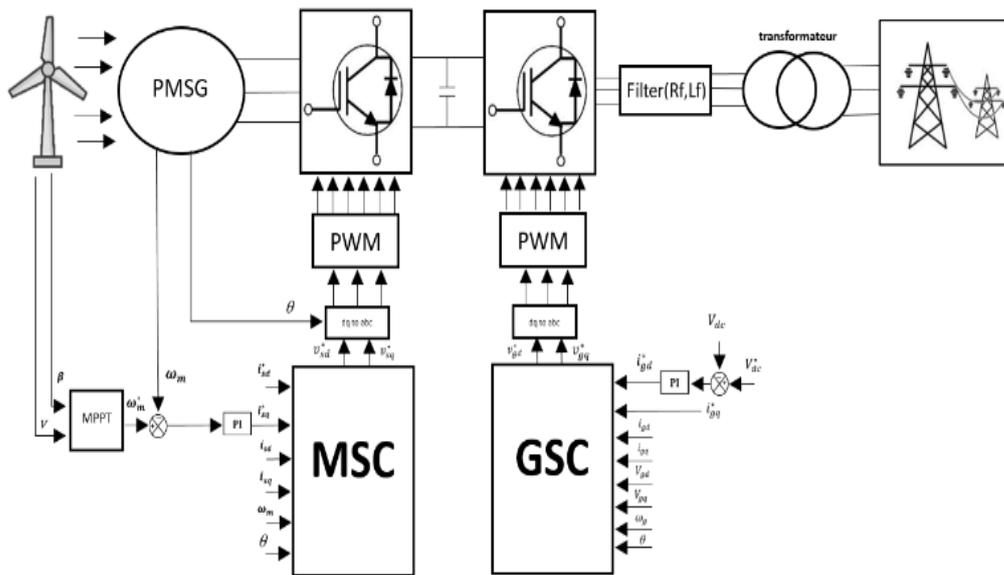


Figure III-1 : la structure générale de la commande PI

Calcul du régulateur (PI)

Le régulateur Intégral Proportionnel (PI) a été appliqué pour la commande des machines synchrones en raison de ses divers avantages. En effet, il permet l'obtention de hautes performances (faible dépassement, écart statique nul et bon rejet de perturbations).

La boucle de régulation de la vitesse avec l'utilisation d'un régulateur de type PID est schématisée par la figure suivante :

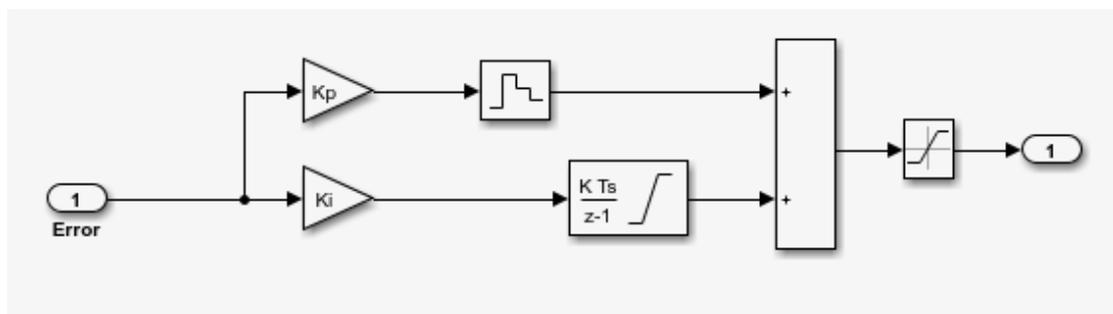


Figure III-2 : Schéma block du régulateur PI

III-1.1 Modèle de contrôleur de convertisseur

Côté génératrice MSC :

Nous utilisons les équations suivantes pour le contrôleur du côté génératrice :

$$V_{sd} = -R_s i_{sd} - L_d \frac{di_{sd}}{dt} - \omega L_q i_{sq} \quad (\text{III.1})$$

$$V_{sq} = -R_s i_{sq} - L_d \frac{di_{sq}}{dt} - \omega L_d i_{sd} + \omega \varphi_f \quad (\text{III.2})$$

$$C_r = \frac{3}{2} P i_{sq} \varphi_f \quad (\text{III.3})$$

$$i'_{sd} = 0 \quad (\text{III.4})$$

$$R_s i_{sd} + L_d \frac{di_{sd}}{dt} = K_{p1}(i'_{sd} - i_{sd}) + K_{i1}\varphi_1 \quad (\text{III.5})$$

$$\frac{d\varphi_1}{dt} = (i'_{sd} - i_{sd}) \quad (\text{III.6})$$

$$R_s i_{sq} + L_q \frac{di_{sq}}{dt} = K_{p2}(i'_{sq} - i_{sq}) + K_{i2}\varphi_2 \quad (\text{III.7})$$

$$\frac{d\varphi_2}{dt} = (i'_{sq} - i_{sq}) \quad (\text{III.8})$$

Où K_{p1} – K_{p2} et K_{i1} – K_{i2} sont les gains des contrôleurs PI, φ_1 – φ_2 sont les variables d'état

Intermédiaires introduites par les contrôleurs PI, i_{sd} et i_{sq} sont le courant de l'axe dq du la partie machine, Imposant $i_{sd} = 0$

III-1.2 Modèle de contrôleur de convertisseur côté réseau GSC :

L'équilibre de tension aux bornes du filtre RL peut être exprimé comme

$$V_d = R_f i_{gd} - L_f \frac{di_{gd}}{dt} - \omega_g L_f i_{gq} + V_{gd} \quad (\text{III.9})$$

$$V_d = R_f i_{gq} - L_f \frac{di_{gq}}{dt} - \omega_g L_f i_{gd} + V_{gq} \quad (\text{III.10})$$

$$R_f i_{gq} + L_f \frac{di_{sd}}{dt} = K_{p3}(i'_{gd} - i_{gd}) + K_{i3}\varphi_3 \quad (\text{III.11})$$

$$\frac{d\varphi_3}{dt} = (i'_{gd} - i_{gd}) \quad (\text{III.12})$$

$$R_f i_{gq} + L_f \frac{di_{gq}}{dt} = K_{p4}(i'_{gq} - i_{gq}) + K_{i4}\varphi_4 \quad (\text{III.13})$$

$$\frac{d\varphi_4}{dt} = (i'_{gq} - i_{gq}) \quad (\text{III.14})$$

$$Q'_g = 0 \text{ Kvar} \quad (\text{III.15})$$

$$i'_{gq} = K_{pq}(Q'_g - Q_g) + K_{iq}\varphi_q \quad (\text{III.16})$$

$$\frac{d\varphi_q}{dt} = (Q'_g - Q_g) \quad (\text{III.17})$$

Où V_d et V_q désignent les tensions sur les axes d et q du côté réseau, R_f et L_f représentent respectivement la résistance et l'inductance du filtre RL, et ω_g est la fréquence angulaire associée à la tension aux bornes du filtre RL, K_{p3} K_{p4} K_{pq} et K_{i3} K_{i4} K_{iq} sont respectivement les gains p et i des contrôleurs PI, et φ_3 φ_4 φ_q sont les variables d'état intermédiaires introduites par les régulateurs PI

III-2 COMMANDE FUZZY LOGIC (FLC)

La commande par Logique floue est en pleine expansion. En effet, cette méthode permet d'obtenir une loi de réglage souvent très efficace sans devoir faire des modélisations approfondies. Par opposition un régulateur standard ou à un régulateur à contre-réaction d'état, le régulateur par logique floue (RLF) ne traite pas une relation mathématique bien définie, mais utilise des inférences avec plusieurs règles, se basant sur des variables linguistiques. Par des inférences avec plusieurs règles, il est possible de tenir compte des expériences acquises par les opérateurs d'un processus technique.

Dans cette section, nous allons présenter les bases générales de la commande par logique floue et la procédure générale de la conception d'un réglage par logique floue.

III-2.1 Principes généraux d'une commande par logique floue

Figure III-3 montre la configuration de base d'un RLF, qui comporte quatre blocs principaux [21] : fuzzification, base de connaissance, inférence et défuzzification

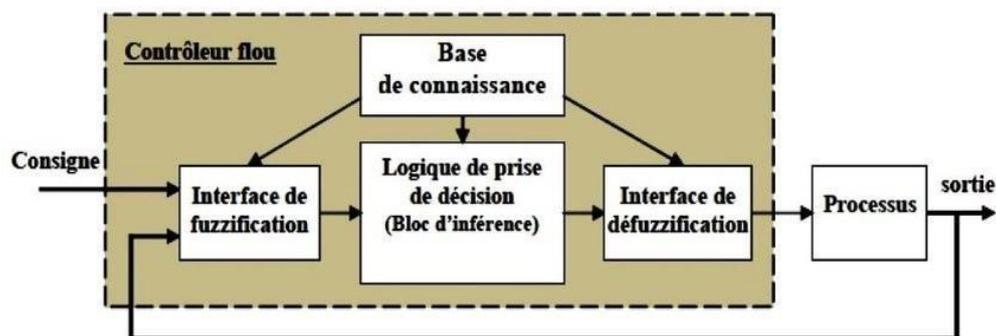


Figure III-3 : Configuration de base d'un régulateur par logique floue (FLC).

Comme le système ii commander ne reçoit que des valeurs déterministes (non-floues ou crisper), un RLF devrait convertir les valeurs déterministes à son entrée en valeurs floues, les traiter avec les règles floues et reconvertir le signal de commande de valeurs floues en valeurs déterministes pour appliquer au procédé. Les rôles de chaque bloc peuvent être résumés comme suit :

- 1) Le bloc fuzzification effectue les fonctions suivantes :
 - Établit les plages de valeurs pour les fonctions d'appartenance à partir des valeurs des variables d'entrées.
 - Effectue une fonction de fuzzification qui convertit les données d'entrée en valeurs linguistiques convenables qui peuvent être considérées comme l'étiquette des ensembles flous.
- 2) Le bloc base de connaissance comporte une connaissance dans le domaine d'application et le résultat de commande prévu. il consiste en "base de données" et en "base de règles linguistiques mues de commande".
 - La base de données effectue des définitions qui sont nécessaires pour établir les règles de commande et manipuler les données floues dans un FLC.
 - La base de règles représente la stratégie de commande et le but désiré par le biais des règles de commande linguistiques.
- 3) Le bloc inférence est le cœur d'un FLC, qui possède la capacité de simuler les décisions humaines et de déduire (inférer) les actions de commande floue l'aide de l'implication floue et des règles d'inférence dans la logique floue.
- 4) Le bloc défuzzification effectue les fonctions suivantes :
 - Établit les plages de valeurs pour tes fonctions d'appartenance B partir des valeurs des variables de sortie.

- Effectue une défuzzification qui fournit un signal de commande non-floue à partir du signal flou déduit.

1.2 Opérateurs de la logique floue :

Dans la théorie des ensembles classiques on définit les relations intersection, union et complémentation qui sont traduites par les opérateurs ET, OU, NON. Ces opérateurs existent également en logique floue, mais sont adaptés aux spécificités de cette logique pour traiter les ensembles flous. Ainsi des opérateurs homologues à ceux de la logique booléenne sont créés en essayant de respecter un certain nombre de propriétés et afin de retrouver les opérations de base existant en logique classique.

Soient S et B, deux sous-ensembles flous d'une variable linguistique définis sur l'univers de discours UD par leurs fonctions d'appartenance respectives μ_E et μ_F .

1.3 Opérateur ET (Intersection floue)

Le sous-ensemble flou, correspondant à l'intersection des sous-ensembles E et F est défini par les éléments de l'univers de discours UD qui appartiennent à E et F.

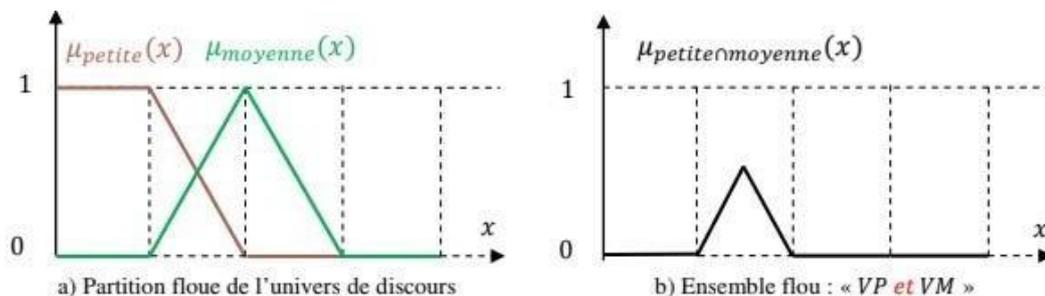


Figure III-4 : Intersection des sous-ensembles flous « PETITE » et « MOYENNE » pour la variable linguistique (VITESSE).

1.4 Opérateur OU (Union floue) :

Le sous-ensemble flou correspondant à l'union des sous-ensembles E et F est un sous-ensemble de l'univers de discours UD défini par tous les éléments de UD qui appartiennent ou bien à E ou bien à F, ce que l'on note $E \cup F$, L'opérateur OU est généralement réalisé par la formation du maximum.

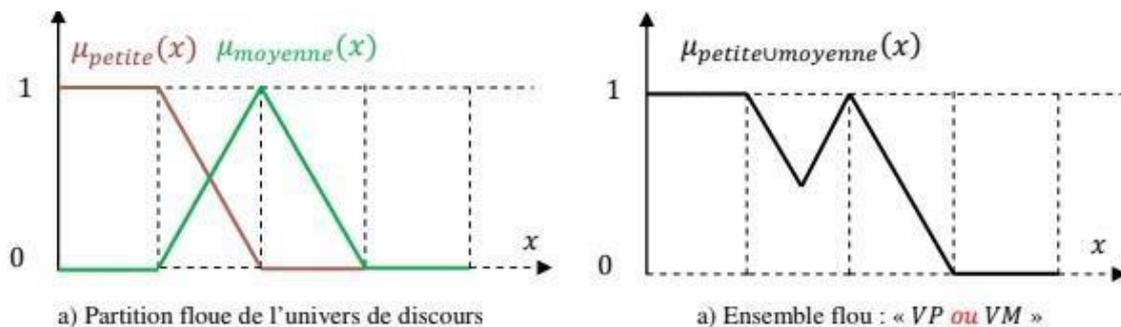


Figure III-5 : Union des sous-ensembles flous « petite » et « moyenne » pour la variable linguistique (vitesse).

1.5 Opérateur NON (complémentation floue) :

Comme l'illustre la figure III-6, le sous-ensemble flou complémentaire du sous-ensemble E est un sous-ensemble de l'univers de discours UD défini par les éléments x de UD qui n'appartiennent pas au sous-ensemble flou E.

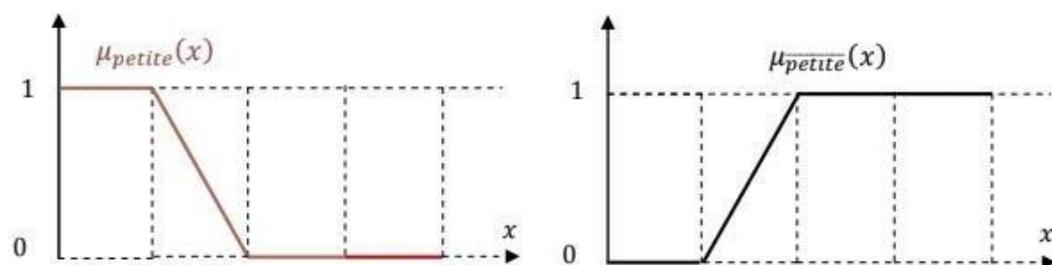


Figure III-6 : Complémentation du sous-ensemble flou « petite ».

2 Avantages et inconvénients de la commande par logique floue :

La commande par logique floue réunit un certain nombre d'avantages et de désavantages.

2.1 Les avantages essentiels sont :

- la non-nécessité d'une modélisation (cependant, il peut être utile de disposer d'un modèle convenable).
- la possibilité d'implanter des connaissances (linguistiques) de l'opérateur de processus.
- la maîtrise du procédé avec un comportement complexe (fortement non-linéaire et difficile à modéliser).
- l'obtention fréquente de meilleures prestations dynamiques (régulateur non-linéaire).
- deux solutions sont possibles : solution par logiciels (par microprocesseur, DSP et PC) ou solution matérielle (par fuzzy processeurs).

2.2 Les inconvénients de la commande par logique floue sont :

- le manque de directives précises pour la conception d'un réglage (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification).
- l'approche artisanale et non systématique (implantation des connaissances des opérateurs souvent difficile).
- l'impossibilité de la démonstration de la stabilité du circuit de réglage en toute généralité (en l'absence d'un modèle valable).
- la possibilité d'apparition de cycles limites à cause de fonctionnement non linéaire.

- la cohérence des inférences non garantie a priori (apparition de règles d'inférence contradictoires possible).

III-2.2 Fuzzification:

3.1 Opérateur de fuzzification

Cette étape s'occupe de la transformation des valeurs numériques aux entrées en valeurs floue en utilisant Les bases de données. Comme le traitement de données dans un RFL est base sur 1 théorie des ensembles flous, la fuzzification doit être faite a priori. Pour la fuzzification proprement dite, il faut choisir la stratégie de fuzzification et effectuer l'opération de fuzzification qui a pour forme symbolique :

$$x = \text{fuzzification}(x_0) \quad (\text{III.4})$$

Où x est la valeur numérique de l'entrée et x est un ensemble flou. Cet opérateur calcule le degré d'appartenance à un ensemble flou pour une entrée déterministe (crispe) donne.

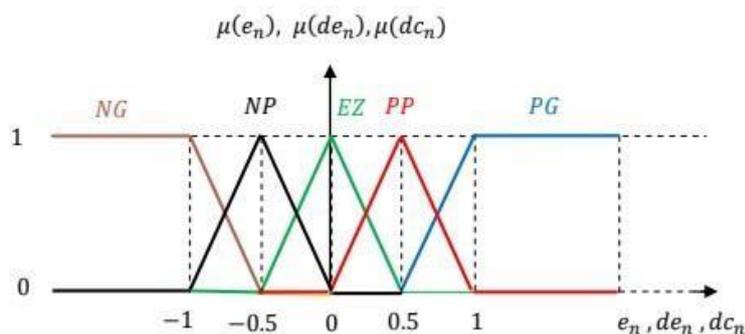


Figure III-7 : Fonctions d'appartenance des entrées et de la sortie du régulateur flou choisi.

Explicitons maintenant les notations des sous-ensembles flous utilisés pour fuzzifier les trois variables précédentes :

- NG: Négatif Grand
- NP: Négatif Petit
- EZ: Environ Zéro
- PP: Positif Petit
- PG: Positif Grand.

3.2 Définition de fonctions d'appartenance :

La stratégie de fuzzification comprend le choix des fonctions d'appartenance. Suivant les plages de valeurs, il existe 2 méthodes de définition : numérique pour les valeurs discrètes et fonctionnelle pour les valeurs continues. Dans notre application les fonctions d'appartenance sous forme fonctionnelle sont avantageusement employées. Comme les données sont perturbées par les bruits blancs, les fonctions de singleton ne sont pas habituellement choisies. Pour que les fonctions d'appartenance soient moins sensibles au bruit, elles doivent être suffisamment larges. Les fonctions d'appartenance des formes trapézoïdale, triangulaire et de cloche sont les plus souvent employées. Nous pouvons choisir la forme triangulaire en raison de sa simplicité. L'opérateur de fuzzification devient donc une interpolation linéaire

III-2.3 Inférence:

Comme nous l'avons mentionné, chacune des deux entrées linguistiques du contrôleur flou possède cinq ensembles flous, ce qui donne un ensemble de vingt-cinq règles. Celles-ci peuvent être représentées par la matrice d'inférence suivante :

		de_n				
		NG	NP	EZ	PP	<u>PG</u>
dc_n	NG	NG	NG	NP	NP	EZ
	NP	NG	NP	NP	EZ	PP
	EZ	NP	NP	EZ	PP	PP
	PP	NP	EZ	PP	PP	PG
	<u>PG</u>	EZ	PP	PP	PG	<u>PG</u>
		Si e_n est PG et de_n est PG Alors dc_n est PG				

Figure III-8 : Matrice d'inférence du régulateur flou

Cette matrice d'inférence est établie par une logique qui tient compte de la physique du système. En effet, il est tout à fait normal de générer une variation du couple de référence positive grande quand l'erreur sur la vitesse de sortie par rapport à sa consigne et sa variation sont positives grandes...etc.

Donc une parfaite connaissance du *comportement* du système à régler nous permet d'établir un ensemble de règles floues, contrairement aux méthodes classiques où il nous faut un modèle mathématique. Après ce, en se basant sur la méthode d'inférence « Somme- produit », la sortie floue du régulateur résultante des 25 règles de la matrice d'inférence est déterminée par la relation suivante :

$$\mu_{RES}(x_r) = \frac{1}{25} \left(\sum \mu_{ci} \mu_{oi} (x_r) \right)_{i=1}^{25} \quad (III.5)$$

Tels que :

μ_{ci} : est le degré de vérification de la condition de la i^{eme} règle (produit du degré d'appartenance d'en et den aux deux ensembles flous de la i^{eme} règle) ;

$\mu_{oi}(x_r)$: est l'ensemble flou de la commande dcn correspondant à la conclusion de la i^{eme} règle de x_r est une valeur de la commande dcn variant dans l'univers de discours.

III-2.4 Défuzzification :

Pour la défuzzification, on utilise la méthode du centre de gravité présentée précédemment, on obtient :

Où S_i est la surface de l'ensemble flou de l'incrément de la commande dcn correspondant à la i^{eme} règle et X_{Gi} est l'abscisse de son centre de gravité.

La différence entre ces 2 méthodes de defuzzification s'illustre la Figure III-9 où l'on fait

Appel B un cas particulier avec deux fonctions d'appartenance de la sortie : positive petite (PP) et positive moyenne (PM).

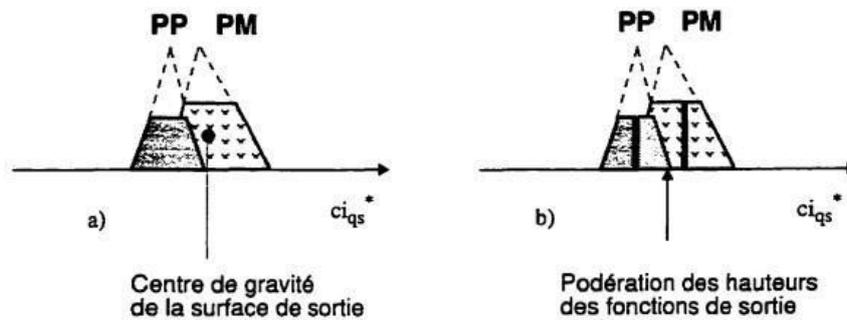


Figure III-9 : Défuzzification

III-2.5 Commande de vitesse par logique floue :

Les variables linguistiques utilisées dans notre simulation: Decrease Big (DB), Decrease Small (DS), Zero (ZE), Increase Small (IS), and Increase Big (IB).

Les règles de contrôle sont mises en place grâce aux connaissances spécialisées et à l'expérience des auteurs. Il existe 25 règles de contrôle qui sont indiqués dans le Figure III.2.

$\Delta\omega_t^{ref}$	ΔP_t					
	DB	DS	ZE	IS	IB	
DB	IB	IS	ZE	DS	DB	
DS	IS	IS	ZE	DS	DS	
ZE	DB	DS	ZE	IS	IB	
IS	DS	DS	ZE	IS	IS	
IB	DB	DS	ZE	IS	IB	

Figure III-3 Rules of fuzzy logic

Nous utilisons les équations suivantes pour notre simulation :

$$\Delta P_t[k] = P_t[k] - P_t[k - 1] \quad (III.18)$$

$$\Delta\omega_t[k] = \omega_t[k] - \omega_t[k - 1] \quad (III.19)$$

$$\omega_{tref}[k] = \omega_t[k - 1] + \Delta\omega_{tref}[k] \quad (III.20)$$

$$\omega_{tref2} = \omega_{tref} - \omega_t \quad (III.21)$$

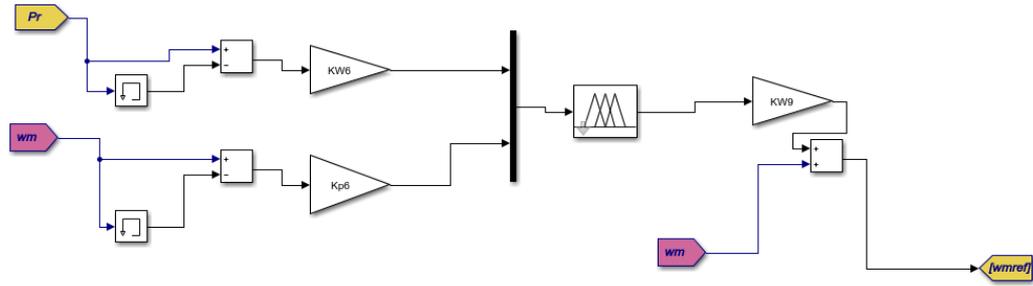


Figure III-4 : schéma du système de contrôle MPPT-Fuzzy

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons fait un bref aperçu des deux commandes et de leur modélisation et dans le chapitre suivant, nous simulerons notre chaîne éolienne avec les deux commandes pour faire une comparaison des résultats de simulation.

Chapitre 4

Simulation

Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons utiliser MATLAB/Simulink pour simuler le modèle d'un GSAP intégré dans un système éolien.

IV-1 Simulation

Notre objectif est d'évaluer le comportement d'une éolienne en régime dynamique sous l'influence d'un vent perturbateur, dont la vitesse varie de 5 m/s à 11,5 m/s, comme illustré dans la figure (IV-1). La simulation sera réalisée sur une période de 5 secondes. Après avoir réalisé ces simulations avec des commandes modernes, nous procéderons à une comparaison des résultats obtenus.

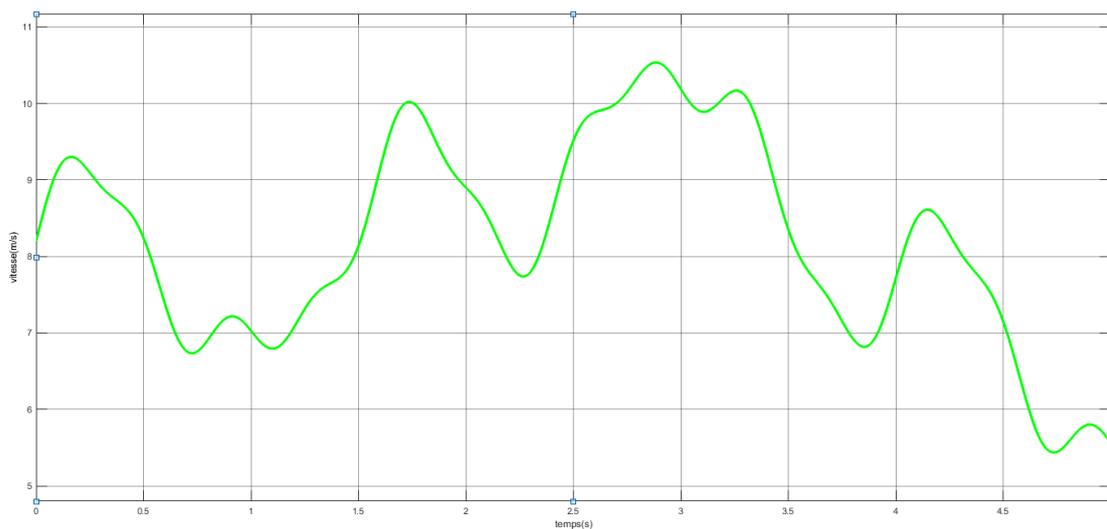


Figure IV-1 vent perturbé

IV-2 Simulation de la commande (PI)

Simulation de la commande (PI) Nous allons d'abord simuler cette commande avec un vent comme indiqué sur la figure (**Figure IV-1**), nous obtiendrons les résultats suivants :

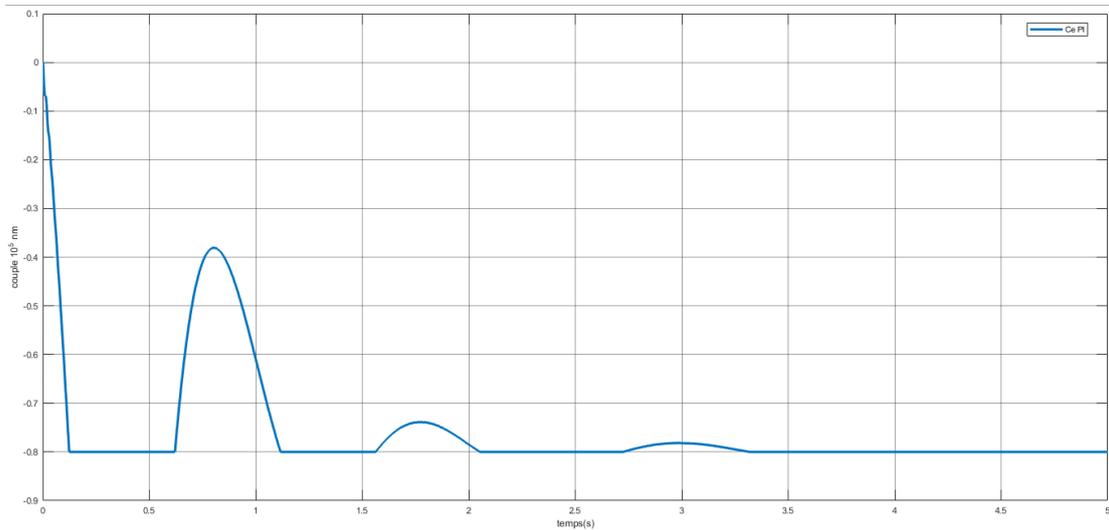


Figure IV-2 couple (PI)

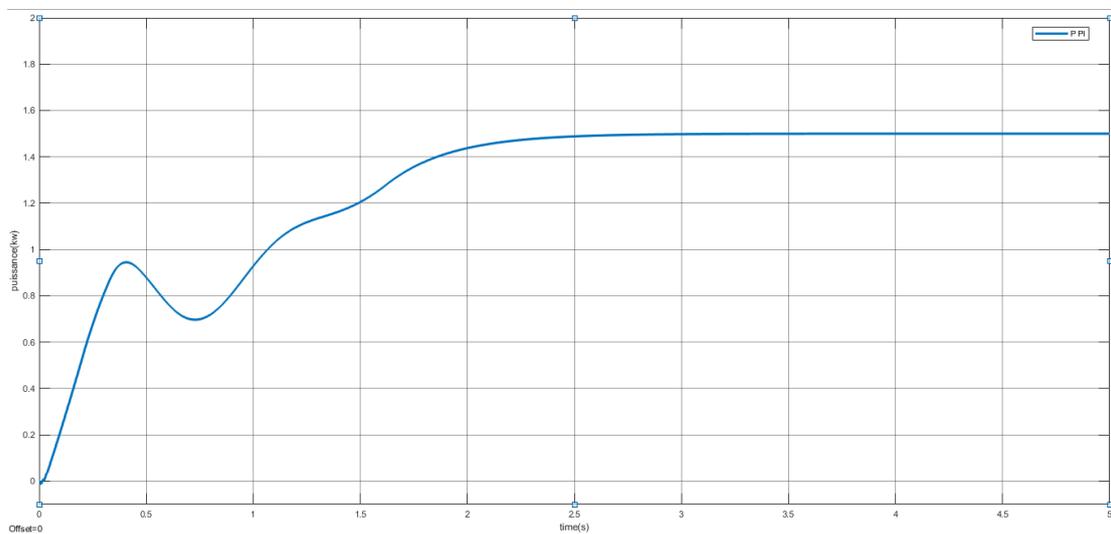


Figure IV-3 puissance active (PI)

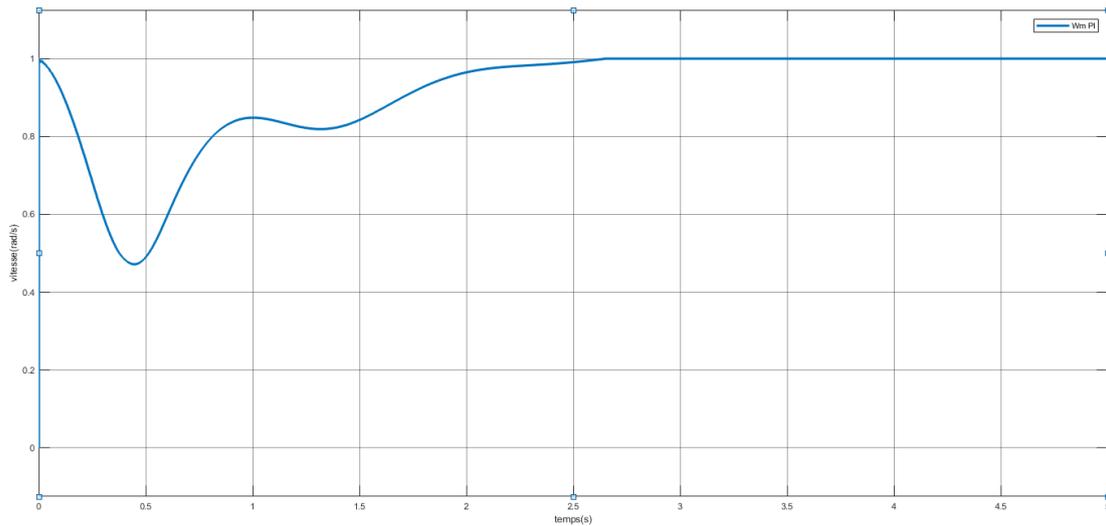


Figure IV-4 vitesse mécanique (PI)

La figure IV-2 montre le couple qui se stabilise à environ (3.4)s ,la Figure IV-3 et la Figure IV-4 montrent respectivement la puissance active et la vitesse mécanique On peut remarquer qu'elles se sont toutes les deux approximativement stabilisées à (2,6)s.

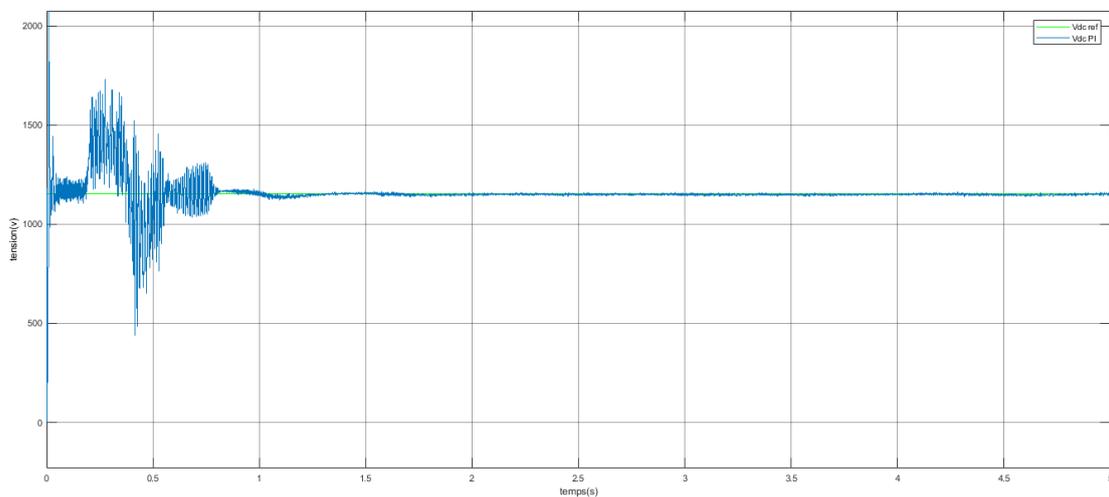


Figure IV-5 Vdc (PI)

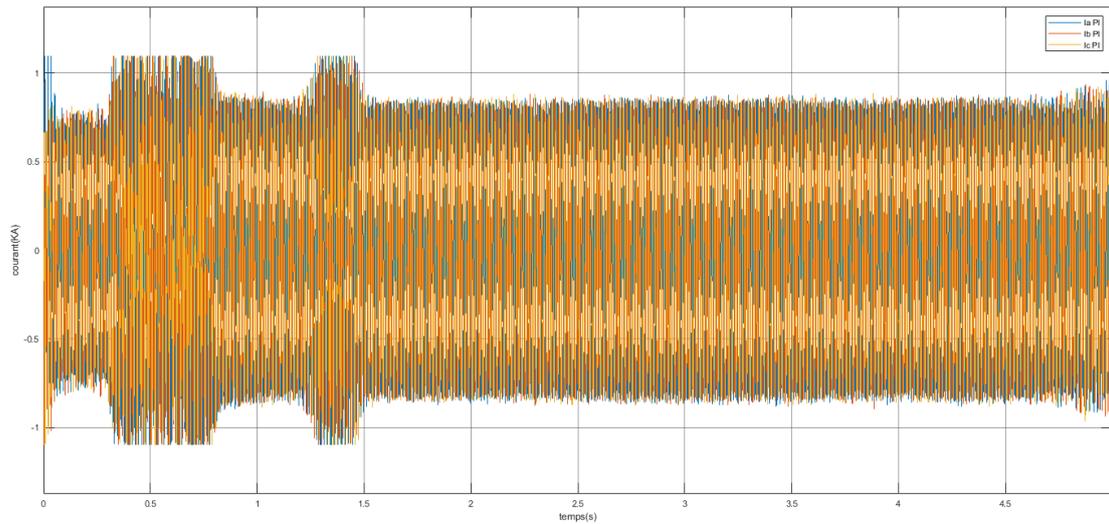


Figure IV-6 courant réseaux (PI)

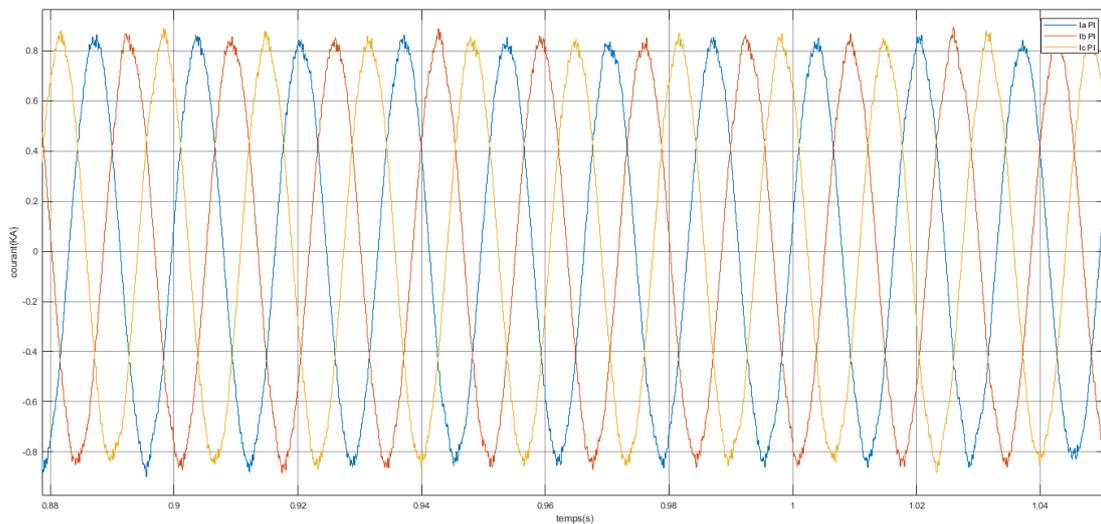


Figure IV-7 courant réseaux zoom (PI)

Figure IV-5 montre la valeur de tension V_{dc} de bus continuer suivie sa valeur de référence avec une petite perturbation au début de la simulation, figure IV-6 montre la courant réseau et la figure IV-7 est un zoom de la figure IV-6.

IV-3 Simulation de la logique flow (FLC)

Les figures suivantes sont le résultat de la simulation de logique flow

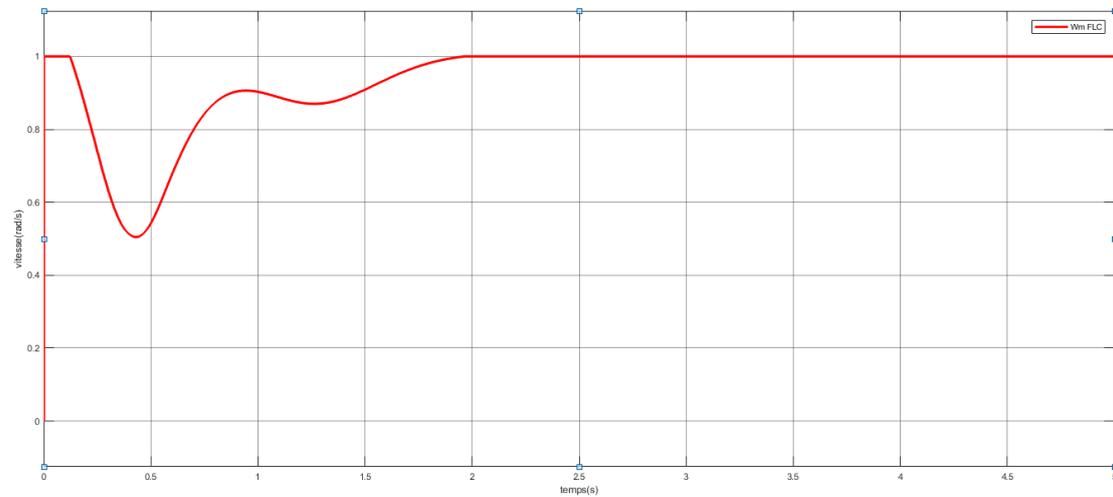


Figure IV-8 vitesse mécanique (FLC)

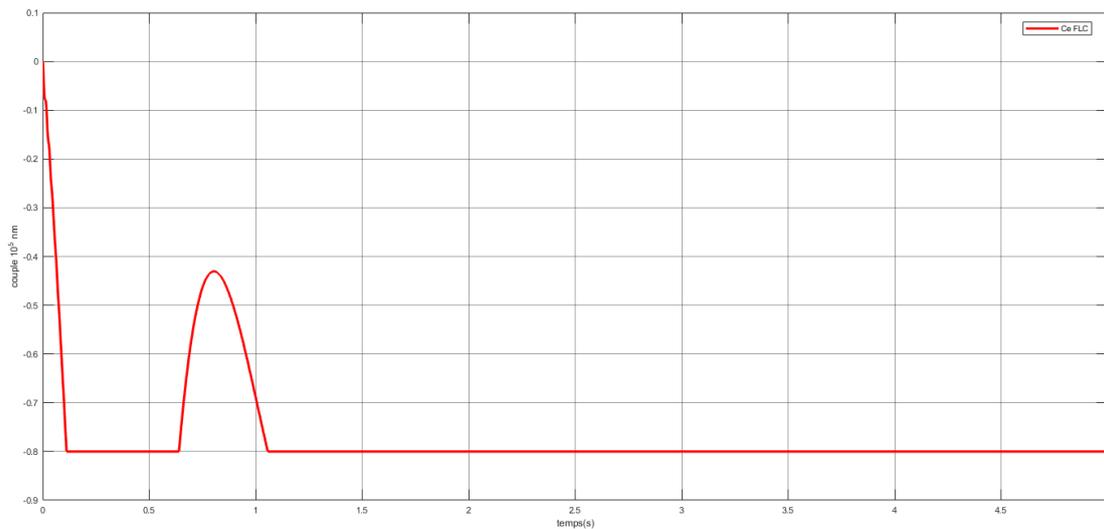


Figure IV-9 couple (FLC)

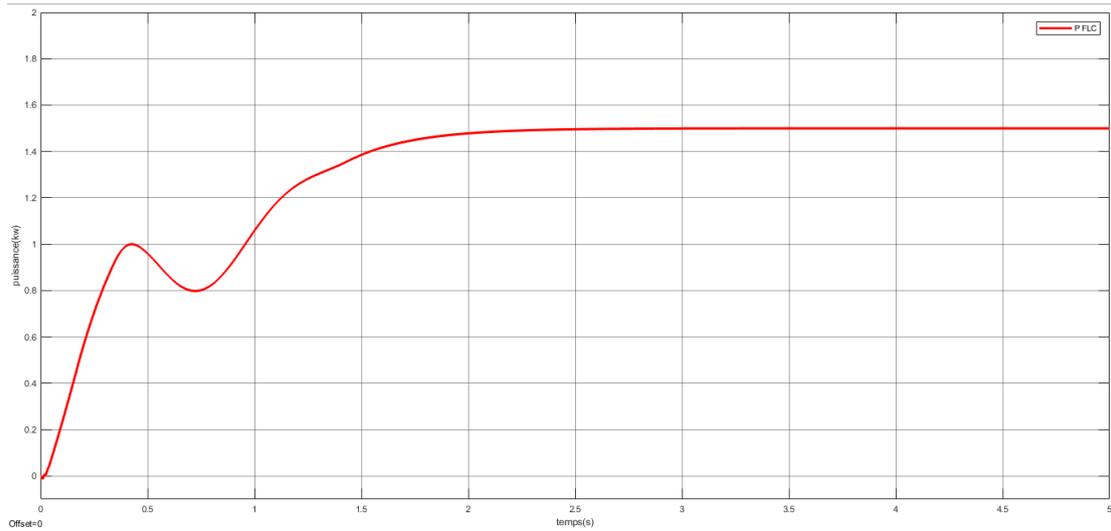


Figure IV-10 puissance active (FLC)

La figure IV-8 montre la vitesse mécanique qui se stabilise à environ (2)s ,la Figure IV-9 et la Figure IV-10 montrent respectivement le couple et la puissance active,la puissance active s'est stabilisée à (2,5)s tandis que le couple s'est stabilisé à (1,1)s.

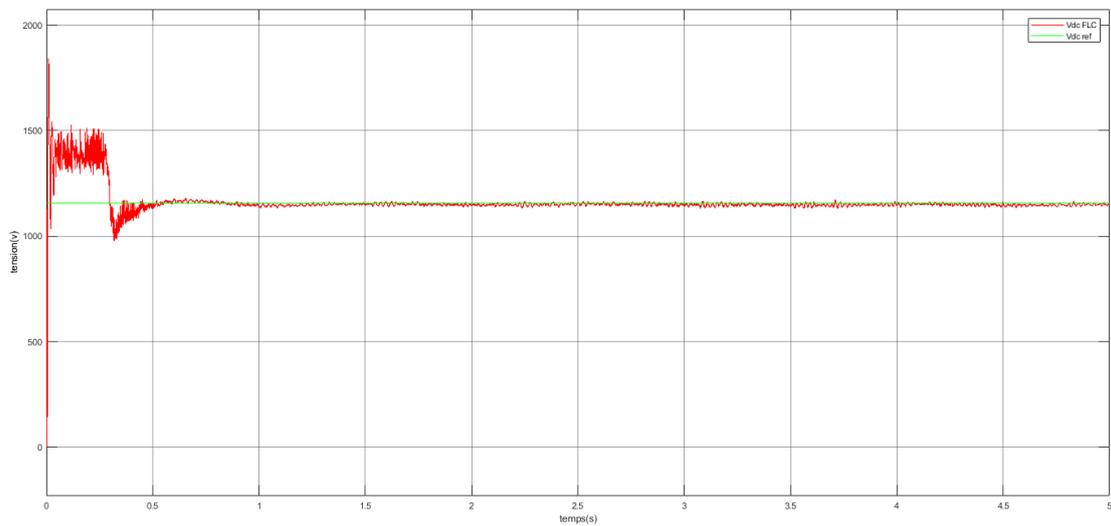


Figure IV-11Vdc (FLC)

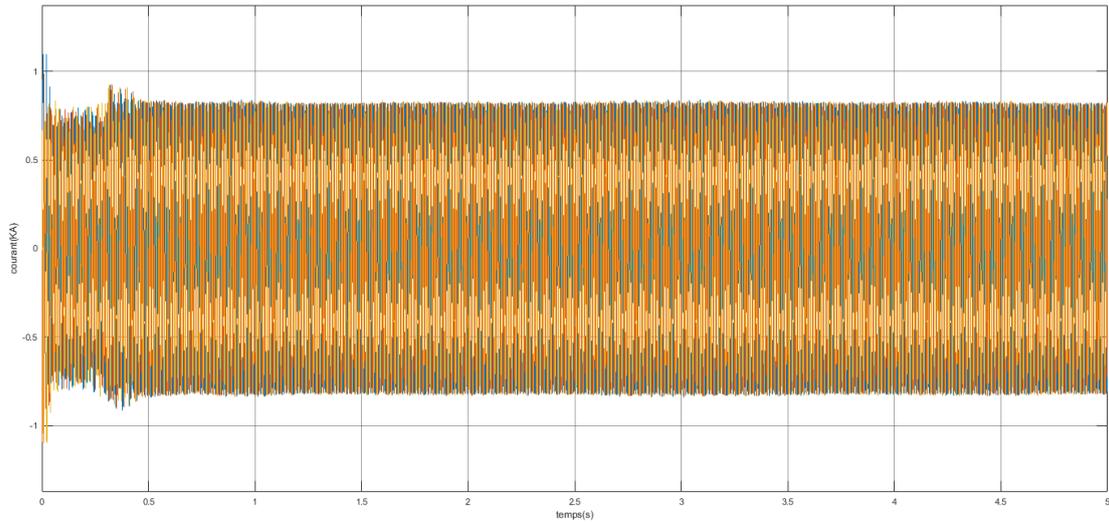


Figure IV-12 courant réseaux (FLC)

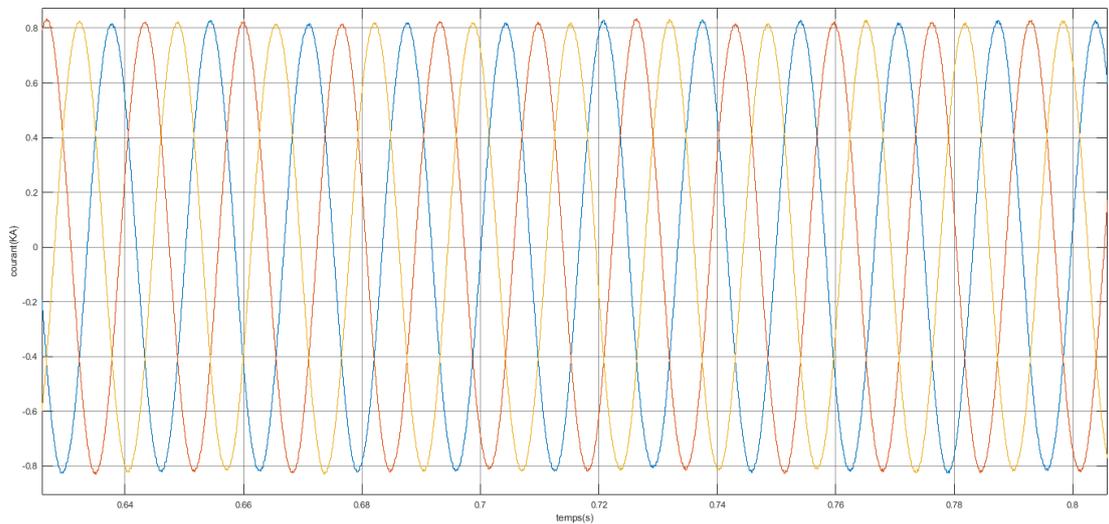


Figure IV-13 courant réseaux zoom (FLC)

Figure IV-11 montre la valeur de tension V_{dc} de bus continuer suivre sa valeur de référence avec une petite perturbation a le début de la simulation, figure IV-12 montre la courant réseau et la figure IV-13 est un zoom de la figure IV-12.

IV-4 Comparaison

Pour faire la comparaison des deux commandes utilisées dans notre chaîne éolienne, on a simulé les commandes dans le même environnement.

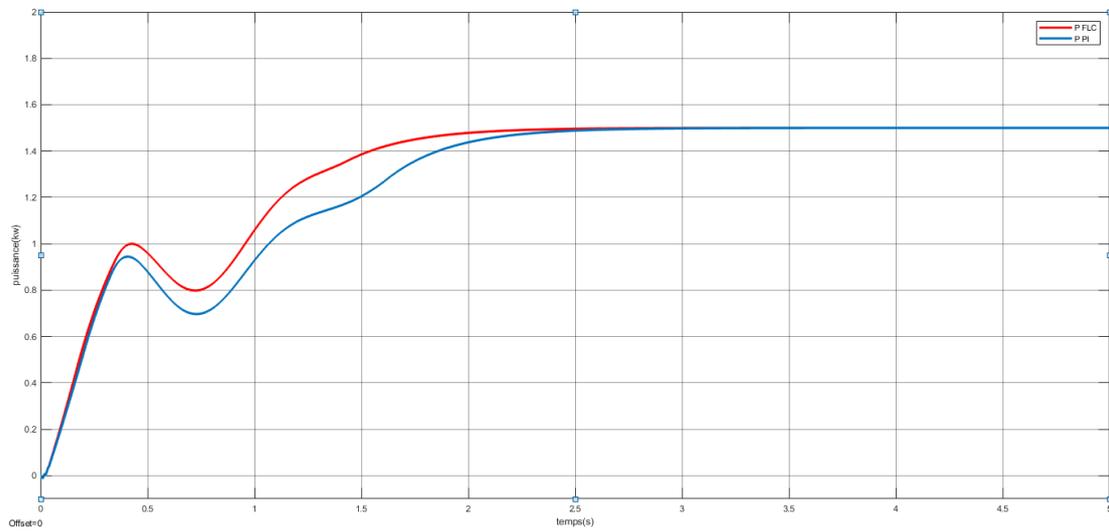


Figure IV-14 puissance active (FLC-PI)

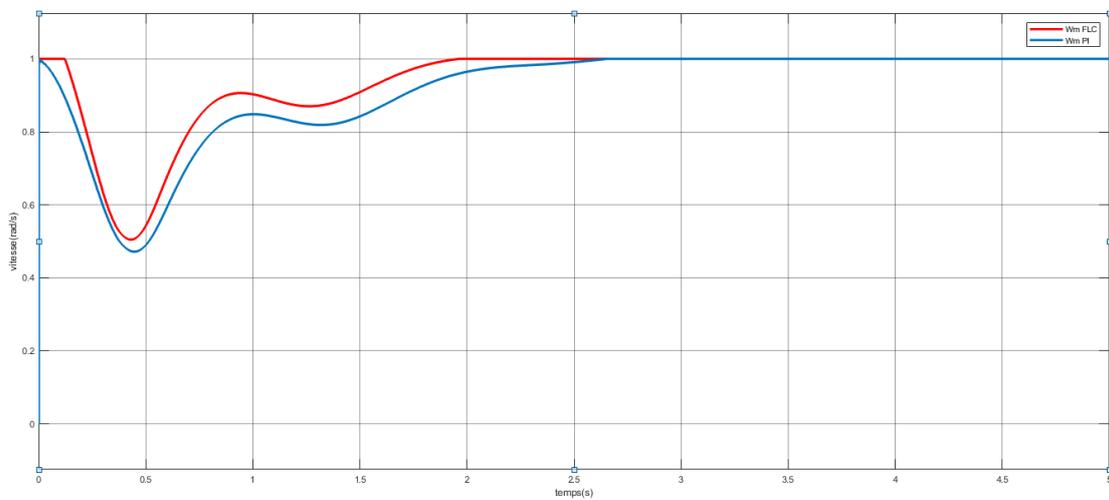


Figure IV-15 vitesse mécanique (FLC-PI)

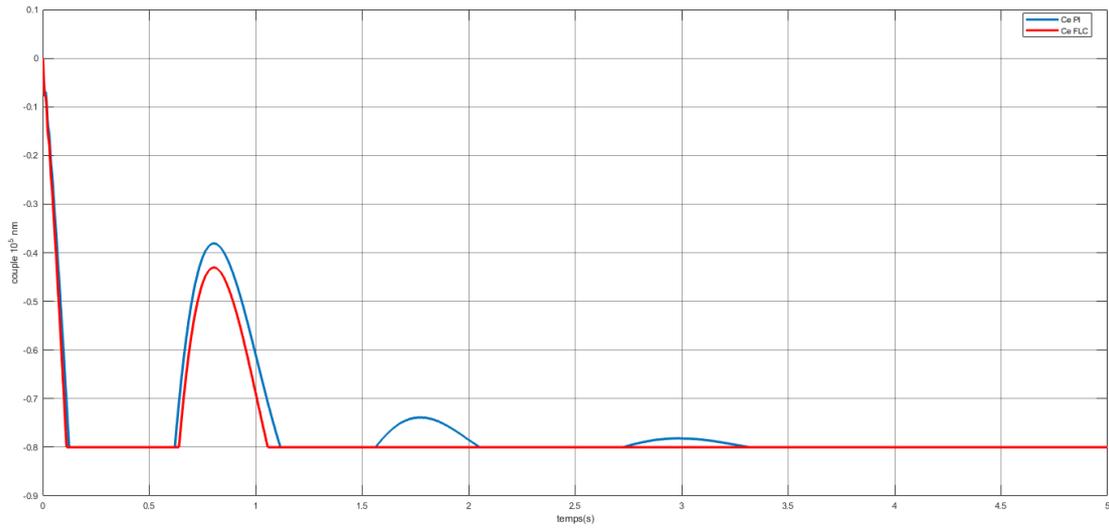


Figure IV-16 couple (FLC-PI)

La figure IV-14 montre la puissance active, on peut voir que P FLC atteint son état stable plus tôt que P PI, la même chose se produit sur la figure IV-15 et la figure IV-16 qui représentent respectivement la vitesse mécanique et le couple.

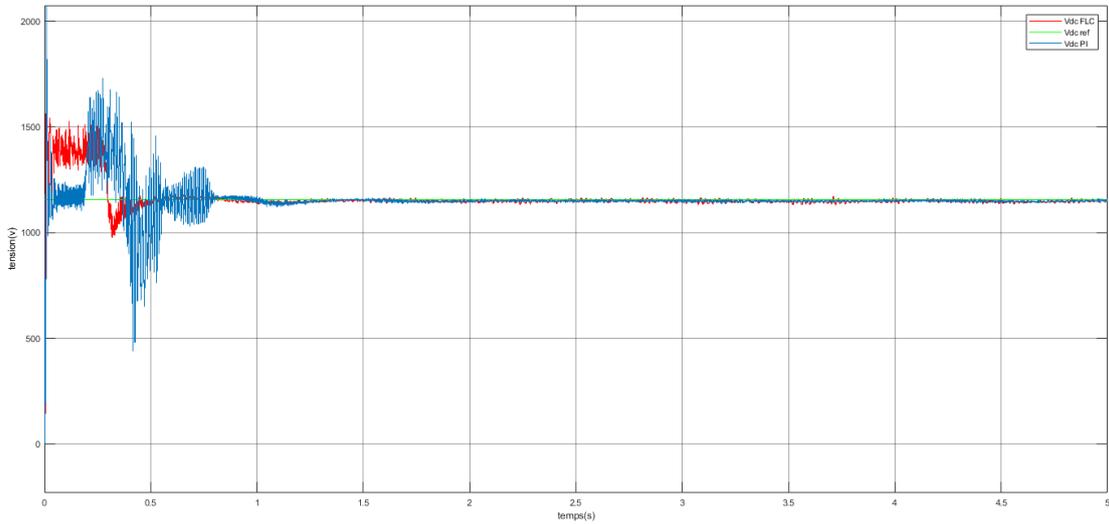


Figure IV-17 Vdc (FLC-PI)

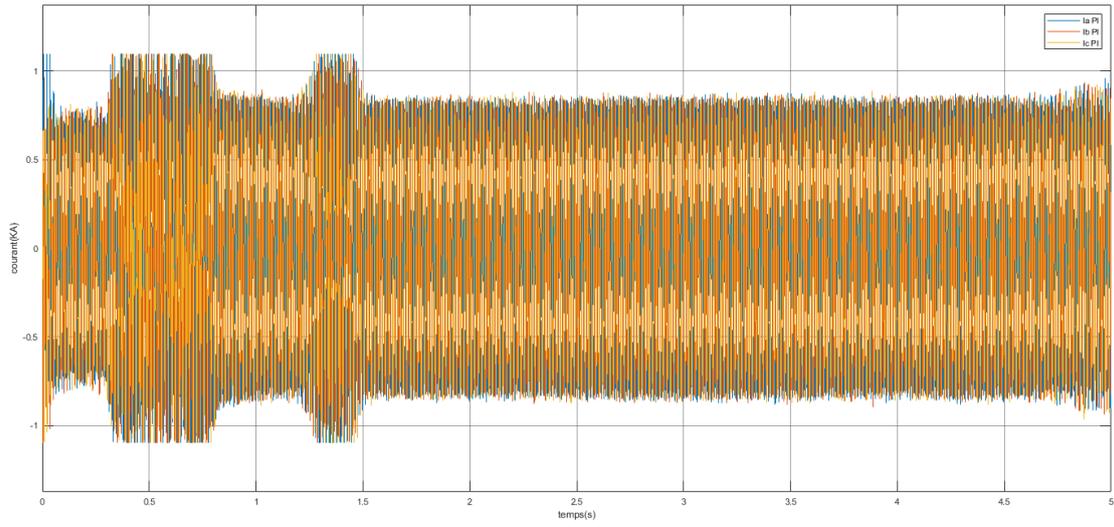


Figure IV-18 courant réseaux (PI)

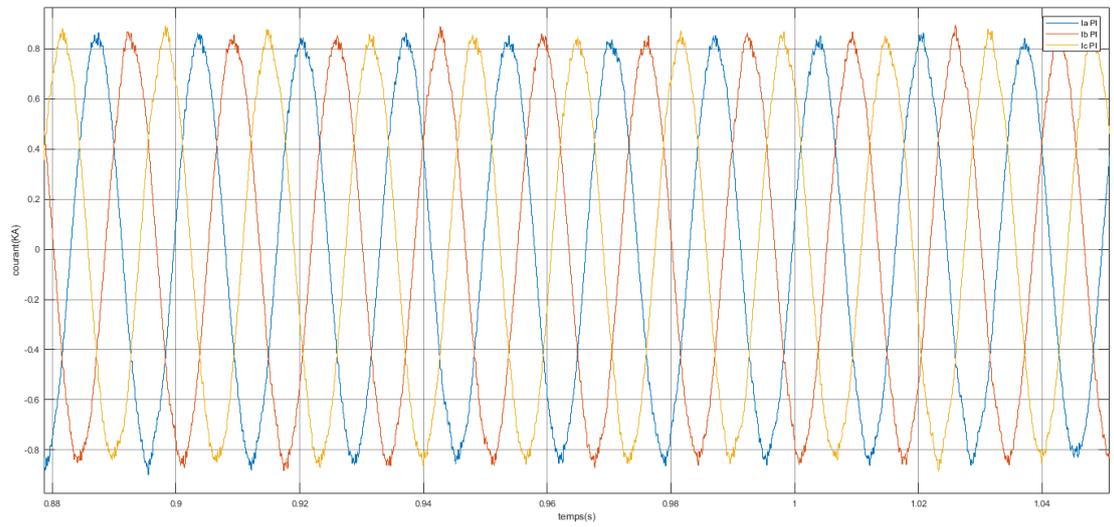


Figure IV-19 courant réseaux zoom (PI)

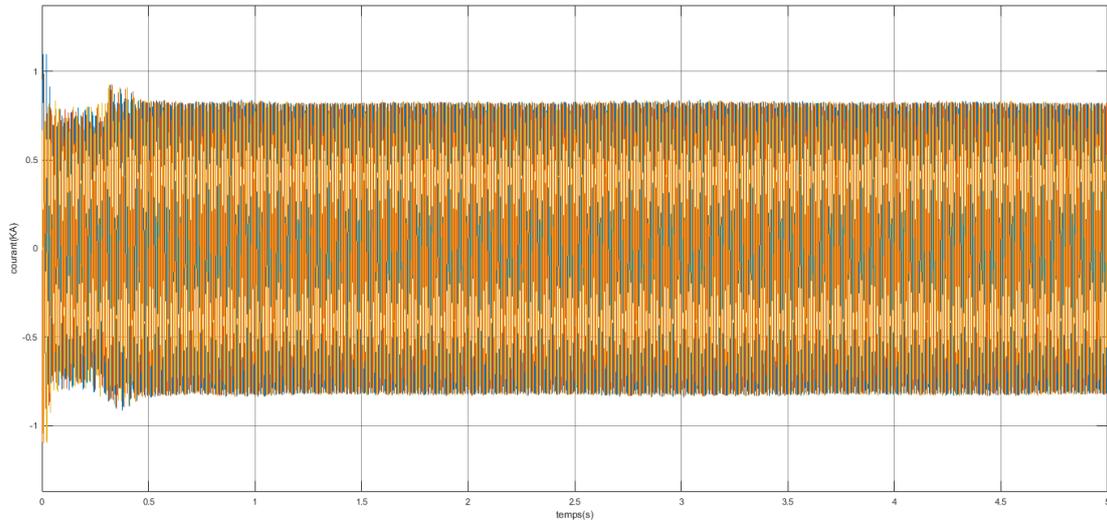


Figure IV-20 courant réseaux (FLC)

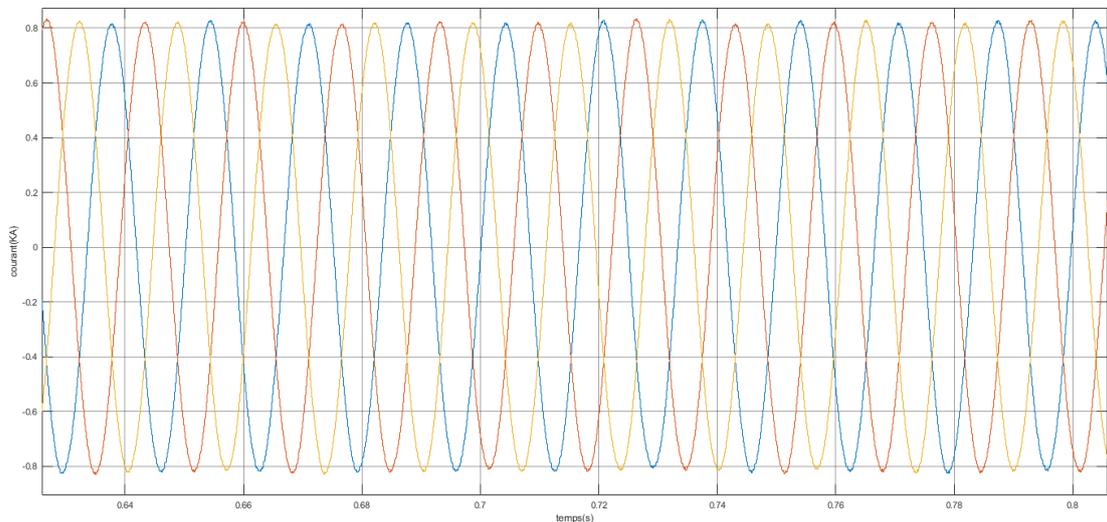


Figure IV-21 courant réseaux zoom (FLC)

Figure IV-17 montre la tension V_{dc} , on remarque que le model (FLC) offre un contrôle plus précis, la valeur ne suivent pas le vent perturbé et comme ça on aura plus de précision, cela peut être considéré comme une preuve que la logique floue est un meilleur système de contrôle que la commande classique.

D'autre part, la Figure IV-21 montre que le courant de réseau à une meilleure forme sinusoïdale et une ondulation inférieure sous contrôle (FLC).

Les principaux avantages du système de contrôle flou par rapport aux autres systèmes de contrôle incluent une meilleure détection et correction des erreurs, une gamme plus large de conditions de fonctionnement.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé notre chaîne éoliennes en utilisant deux stratégies de contrôle dans l'environnement MATLAB/SIMULINK. Nous avons ensuite comparé les performances de ces contrôles pour déterminer lequel est le plus efficace.

Conclusion Générale :

Pour résumer, ce mémoire a fourni une analyse approfondie des composants technologiques des systèmes éoliens modernes, en mettant l'accent sur leur impact sur l'efficacité énergétique et la durabilité environnementale. En examinant les avancées actuelles, y compris les moteurs à aimants permanents, le contrôle par logique floue, et en les comparant aux méthodes de contrôle traditionnelles, plusieurs conclusions essentielles ont émergé.

Le progrès technologique dans le domaine des éoliennes est manifestement crucial pour relever les défis de la transition énergétique mondiale. L'intégration continue de technologies innovantes, telles que les systèmes de contrôle basés sur la logique floue, offre des opportunités substantielles pour améliorer l'efficacité opérationnelle et optimiser la gestion des ressources énergétiques renouvelables.

Cette étude met en lumière des stratégies susceptibles de maximiser la performance de l'énergie éolienne. En investissant dans le développement de systèmes de contrôle avancés, nous renforcerons non seulement la contribution de l'énergie éolienne à la sécurité énergétique mondiale, mais nous aiderons également à réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Bibliographie

- [1] F. Blaabjerg, N. Muntean, Fuzzy logic based MPPT controller for a small wind turbine system 2012
- [2] Laidani anouar Litim ,Omar abdelazix, Commande avancé d'une Génératrice synchrone à aimant permanent intégré dans un système éolienne 2023
- [3] An overview of control techniques for wind turbine systems Scientific African 2020
- [4] Liabes Amir, Bouraba Mehdi, Commande MPPT d'un system hybride par la logique floue 2021
- [5] Btissam Majout, Improvement of PMSG-Based Wind Energy Conversion System Using Developed Sliding Mode Control by 2022
- [6] Toufik Rekioua, Contribution à la modélisation et à la commande vectorielle des MSAP. 1991
- [7] ABDEDDAIM Sabrin, Optimisation de deux systèmes de génération renouvelable 2013
- [8] Tarak 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 asyn-chrone à double alimentation. Autre. Ecole Centrale de Lille; École Militaire Polytechnique (Alger), 2011
- [9] Mayouf Mesaoud, Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimant permanent, thèse de magister de l'université de Batna, 2008.
- [10] Adam MIRECKI, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » 2005

- [11] LATRECHE Mohammed Tahar « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2012
- [12] GASSAB SAMIR « Modélisation d'une centrale hybride photovoltaïque-éolienne » mémoire de magister de l'Université Ferhat Abbas – Sétif, décembre 2011.
- [13] Moteur synchrone energieplus 2021
- [14] Fateh Louar, Fawzi Senani, Fares Bourourou, Ahmed Ouari «Wind Conversion Chain Model Simulation with Closed Loop PI Controler», 2014.
- [15] Djamel Saba, Modélisation Sémantique à base d'Agents pour la Gestion d'Energie dans un Système Multi Sources à Energie Renouvelable La production d'électricité sur la base des sources d'énergies renouvelables. 2017
- [16] Hamecha samira « Etude et commande d'une éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent », Thèse de Magister, université de Tizi ousou, 2013.
- [17] Haritza Camblong , Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable. 2003
- [18] Ludovic Leclercq – « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2004
- [19] Quang-Vi Ngo, Chai Yi, Trong-Thang Nguyen ,The maximum power point tracking based-control system for small-scale wind turbine using fuzzy logic 2020
- [20] Gabriel cormier, "Logique Floue" université de Moncton, Document PDF

- [21] Agence Internationale de l'Énergie, 2020
- [22] Commission Européenne, 2019
- [23] Global Wind Energy Council, 2018
- [24] Energy Information Administration, 2021
- [25] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2022
- [26] Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021
- [27] European Wind Energy Association, 2019
- [28] Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019

Annexe A

Nom et symboles des paramètres	Value numérique
La puissance nominal P	1.5 KW
La tension nominal V	1150 V
La résistance de la phase statorique R_s	0.00625 Ω
Inductance directe L_d	0.004229 H
L'inductance quadrature L_q	0.004229 H
Moment d'inertie total de la machine J	10000 Kg.m ²
Coefficient de frottement visqueux f	0.0142 N.m
Flux d'excitation des aiment φ_f	11.1464 Wb
R_f	0.002
L_f	0.004
Longueur de la pale R	55
La densité de l'air ρ	1.225
λ_{opt}	8.1
Coefficient de puissance $C_{p_{max}}$	0.47
Gain du multiplicateur k	1