

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane MIRA Bejaia



Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique

Option : Machines Electriques

Thème

Optimisation de production d'énergie d'une centrale éolienne à base d'une GADA

Présenté par :

DJERROUD Nadjib

IAMARENE Saci

Encadré par :

TAMALOUZT Salah

Année Universitaire 2019/2020

REMERCIEMENTS

Ce travail est l'aboutissement d'un dur labeur et de beaucoup de sacrifices ; nos remerciements vont d'abord au Créateur de l'univers qui nous a doté d'intelligence, et nous a maintenu en santé pour mener à bien cette année d'étude.

Nous tenons à présenter nos remerciements les plus sincères à notre promoteur M^r Tamalouzt Salah pour, sa patience, et sa compréhension. On le remercie d'avoir été présent aussi souvent que possible malgré ses tâches administratives comme chef de département et malgré les circonstances d'apparition de la pandémie de covid-19 afin de permettre le bon déroulement de notre travail.

On tient à exprimer nos vifs remerciements aux membres de jury, pour avoir bien voulu examiner ce mémoire et nous avoir fait l'honneur de présider le jury.

On tient aussi à remercier, les responsables et les profs du département génie électrique en particulier Mme BLAID S pour sa bienveillance et son grand sens de responsabilité.

Je tiens à remercier en particulier, Mr HAMMANI SADEK, Je lui exprime toute ma gratitude pour son expérience, son soutien inconditionnel et ses qualités humaines et scientifiques. Son aide m'a offert la possibilité de réaliser ce travail et qui m'a permis d'élargir mon spectre de connaissances scientifiques.

DEDICACES

A mon très cher père,

Tu as toujours été pour moi un exemple du père respectueux, honnête, de la personne méticuleuse, je tiens à honorer l'homme que tu es. Grâce à toi j'ai appris le sens du travail et de la responsabilité. Je voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité, ta compréhension... Ton soutien fut une lumière dans tout mon parcours. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour toi.

A ma très chère mère,

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes cotes a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

A la mémoire de mes grands-pères et mon frère Nassim,

J'aurais tant aimé que vous soyez présents. Que Dieu ait vos âmes dans sa sainte miséricorde.

A mes Grand mères,

Qui m'ont accompagné par leurs prières et leurs douceurs, puisse dieu les prêter longue vie et beaucoup de sante et tout le bonheur.

Et je dédié se modeste travail mes chers frères et sœur, mes oncles, mes tantes et mes cousins, Que dieu vous procure longue vie.

A tout personnes ceux pour qui je compte et qui compte pour moi.

A mon cher binôme Saci, pour son dévouement, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

A tous les enseignants qui ont contribué à ma formation durant tout mon parcours d'études.

NADJIB

DEDICACES

Je dédie ce mémoire à :

Ceux qui sont les plus chers du monde : Mes parents

Et mes frères

Toute la famille LAMARENE

Tous mes amis sans exception

Tous ceux qui veulent lire

SACI

Table des matières

<i>Introduction générale</i>	1
I. Généralités sur les systèmes éoliens	3
I.1 Introduction	3
I.2 Production de l'énergie éolienne	3
I.3 Principaux composants d'une éolienne	4
I.4 Les différents types de turbines éoliennes	5
I.4.1 Les éoliennes à axe verticale	5
I.4.2 Les éoliennes à axe horizontale	5
I.5 Chaîne de conversion de l'énergie éolienne	5
I.5.1 Principe de conversion de l'énergie éolienne	6
I.5.2 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	6
I.5.2.1 Avantages	6
I.5.2.2 Inconvénients	7
I.6 Généralités sur les génératrices d'éolienne à vitesse variable	7
I.6.1 Systèmes utilisant la machine synchrone	7
I.6.2 Systèmes utilisant la machine asynchrone	8
I.6.3 Systèmes utilisant la machine asynchrone à doubles alimentation	8
I.7 Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique	9
I.8 Description du fonctionnement de la MADA	11
I.8.1 Structure de la MADA	11
I.8.2 Modes de fonctionnement de la MADA	12
I.8.2.1 Fonctionne en moteur	12
I.8.2.2 Fonctionne en génératrice	12
I.9 CONCLUSION	13
II. Modélisation d'un système éolien à base d'une GADA	14
II.1 Introduction	14
II.2 Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne	14
II.2.1 Modélisation de la turbine	15
II.2.2 Modèle du multiplicateur de vitesse	17
II.2.3 Équations dynamiques de l'arbre	17
II.2.4 Stratégie de commande de la turbine	18
II.3 Modélisation de la partie de conversion électromécanique	19
II.3.1 Hypothèses simplificatrices	20
II.3.2 Modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation	21
II.3.2.1 Équations électriques	21
II.3.2.2 Équations magnétiques	22
II.3.3 Passage du triphasé au biphasé (Transformation de PARK)	23
II.3.4 Représentation de la MADA dans le repère biphasé	25
II.3.5 Expression de la puissance active et réactive	26
II.3.6 Expression du couple électromagnétique	27
II.4 Conclusion	28

III.	Commande d'un aérogénérateur basé sur une MADA pour extraire le maximum de puissance	29
III.1	Introduction	29
III.2	La commande directe du couple (DTC)	29
III.2.1	Principe de la commande DTC appliquée à un onduleur a deux niveaux	30
III.2.2	Les propriétés générales de la commande DTC	30
III.2.3	Structure générale du contrôle direct de couple	31
III.2.4	Élaboration du tableau de commutation	33
III.2.5	Avantages de la DTC	33
III.2.6	Inconvénients de la DTC	34
III.3	Techniques d'extraction du maximum de puissance, MPPT (Maximum Power Point Tracking)	34
III.3.1	MPPT P&O (Perturb and Observe)	35
III.3.2	Organigramme de la méthode P&O	35
III.4	MPPT par la logique floue (FLC)	37
III.4.1	Principe de la logique floue	37
III.4.2	Le superviseur de la logique flou	37
III.5	Résultats de simulation & interprétation	39
III.5.1	Profil du vent	39
III.5.2	DTC appliquée à la MADA	40
III.5.3	Méthode MPPT P&O	44
III.5.4	Méthode MPPT FLC	47
III.5.5	Comparaison entre la méthode P&O ET FLC	49
III.6	Conclusion	52
	Conclusion générale	53

TABLE DES FIGURES

<i>Figure I. 1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent</i>	2
<i>Figure I. 2 : Éolienne à MAS pilotée au stator</i>	6
<i>Figure I. 3 : Éolienne à vitesse variable basée sur une MADA</i>	7
<i>Figure I. 4 : Turbine de courant d'air autour d'une éolienne</i>	7
<i>Figure I. 5 : Modes opérationnels caractéristiques de la MADA</i>	10
<i>Figure II. 1 : Schéma de la turbine éolienne</i>	12
<i>Figure II. 2 : Évolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative</i>	14
<i>Figure II. 3 : Schéma bloc du modèle de la turbine</i>	16
<i>Figure II. 4 : Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne</i>	17
<i>Figure II. 5 : Représentation schématique de la GADA</i>	19
<i>Figure II. 6 : Passage du triphasé au biphasé et l'inverse</i>	22
<i>Figure III. 1 : structure de la commande directe de couple et de flux du GADA</i>	30
<i>Figure III. 2 : Table de localisation selon 'I. Takahashi' pour le réglage du flux et du couple (DTC classique)</i>	31
<i>Figure III. 3 : Caractéristiques d'une éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation</i>	32
<i>Figure III. 4 : Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation (P&O)</i>	34
<i>Figure III. 5 : Méthode de perturbation et d'observation du MPPT</i>	34
<i>Figure III. 6 : Traitement flou</i>	35
<i>Figure III. 7 : Règles permettant de déterminer les fonctions et les degrés d'appartenance de $\Omega_{ref}(K)$</i>	36
<i>Figure III. 8 : Profil de la vitesse du vent</i>	37
<i>Figure III. 9 : Allures des résultats</i>	40
<i>Figure III. 10 : Allures des résultats de P&O</i>	44
<i>Figure III. 11 : Allures des résultats de FLC</i>	47
<i>Figure III. 12 : Allure de résultat de P&O et FLC</i>	49

LISTE DES SYMBOLES

MADA : Machine Asynchrone à Double Alimentation.

GADA : Génératrice Asynchrone à Double Alimentation

P&O : Perturb And Observe

FLC : Fuzzy Logic Control

DTC : Direct torque control

$P_{aér}$ [W]: Puissance aérodynamique

P_V [W]: Puissance totale théoriquement disponible

C_p : Coefficient de puissance de l'éolienne

λ : Vitesse relative de l'éolienne

ρ [Kg/m³]: Densité de l'air

$\Omega_{turbine}$: Vitesse de la turbine

G : Gain du multiplicateur

R[m] : Longueur des pales

B : L'angle de calage des pales de la turbine

C_g [N.m] : Couple mécanique sur l'arbre de la génératrice

$C_{aér}$ [N.m] : Couple aérodynamique de l'éolienne

Ω_{mec} : Vitesse mécanique

J [Kg.m²]: L'inertie totale

$J_{turbine}$ [Kg.m²]: L'inertie de la turbine

J_g [Kg.m²]: L'inertie de la génératrice

C_{mec} [N.m] : Couple mécanique appliqué au rotor

C_{em} [N.m] : Couple électromagnétique

C_{vis} [N.m] : Couple résistant dû aux frottements

f : Coefficient de frottements visqueux

MPPT : Maximum power point tracking

C_{em_ref} [N.m] : Couple électromagnétique de référence

R_s, R_r [Ω] : Résistance de chaque enroulement statorique et rotorique

L_s, L_r [H] : Inductance de chaque enroulement du stator et du rotor

M [H] : Inductance mutuelle

ω_s, ω_r : Pulsation électrique statorique et rotorique

$\varphi_{ds}, \varphi_{qs}$ [Wb] : Flux statorique selon l'axe d, q

$\varphi_{dr}, \varphi_{qr}$ [Wb] : Flux rotorique selon l'axe d, q

φ [Wb] : Flux

P_s, P_r [W] : Puissance active au stator et rotor

Q_s, Q_r [VAR] : Puissance active et réactive au rotor

P_m : Puissance mécanique

P : Nombre de pair de pôle de la GADA

S : Opérateur dérivé de Laplace

I [A] : Courant

V [V] : Tension

I_{ds}, I_{qs} : Courant statorique selon l'axe d,q

I_{dr}, I_{qr} : Courant rotorique selon l'axe d,q

$I_{\alpha r}, I_{\beta r}$: Courant rotorique selon l'axe α, β

F_s, F_r : Fréquences de stator et rotor

Réf : Indice indiquant la référence (la consigne)

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

θ_s : Angle entre l'axe de la première phase de l'enroulement statorique et l'axe dq

θ_r : Angle entre l'axe de la première phase de rotorique et l'axe dq

INTRODUCTION GENERALE

Aujourd'hui, les pays tendent à devenir indépendants des fossiles : jugées trop polluantes, ces énergies ont tendance à devenir de plus en plus rare. Les politiques actuelles ont pour devoir de promouvoir les énergies renouvelables, dites propres. L'énergie éolienne est aujourd'hui la ressource propre la moins coûteuse à exploiter, ce qui explique l'engouement fort pour cette technologie. Cette énergie est souvent présentée comme l'un des compléments les plus prometteurs pour diminuer le recours aux sources d'énergie traditionnelles. Mis à part l'enjeu écologique les éoliennes constituent une avancée technologique importante [1].

Beaucoup de pays aujourd'hui sont équipés de ces éoliennes. C'est le cas du Danemark qui est de loin le pays européen le plus densément équipé en éoliennes : 960,3 W/habitant en 2017, alors que la moyenne de l'Union européenne est de 330,2 W/habitant, le deuxième pays selon ce critère est l'Irlande : 704,7 W/habitant, suivie par la Suède : 672,4 W/habitant [1].

En Algérie, un intérêt particulier a été accordé à ce domaine ces dernières années par l'installation de nouveau site de gisement éolien. Bien que le choix de l'énergie solaire soit prédominant. La maîtrise de cette technologie par la recherche et des formations s'avère nécessaire afin de développer ce secteur. Ce qui donnera naissance à un réseau important de gisement éolien, surtout dans les régions avec un important phénomène cyclique du vent.

Dans notre travail, nous nous sommes intéressés à l'étude et la modélisation d'une chaîne de conversion d'énergie éolien à base d'une GADA (Génératrice Asynchrone a Double Alimentation), qui consiste en l'implémentation des différentes techniques d'extraction de maximum de puissance (MPPT), la commande à mettre en place (DTC) et les différentes démarches pour réaliser et optimiser note système éolien.

Ce mémoire s'articulera autour de trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous aborderons des généralités sur les éoliennes, ainsi que le fonctionnement de ces dernières, leurs conceptions et la mise en œuvre

sur le terrain, ainsi que l'étude des différents composants et leurs rôles pour assurer une conversion d'énergie cinétique en énergie électrique.

Dans le deuxième chapitre, nous rappellerons les principes relatifs aux différentes parties constituant d'une éolienne (partie mécanique et celle de la conversion électromécanique), ensuite, l'étude de compréhension théorique de la machine asynchrone à double alimentation, sur quels principes physiques et mathématique reposent-elle? Comment une éolienne peut-elle nous fournir de l'énergie?

Nous développerons, dans ce troisième chapitre, notre commande pour l'extraction de maximum de puissance, pour cela nous avons choisi une chaîne de conversion d'un système éolien à base d'une GADA. L'extraction de maximum de puissance est basée sur trois méthodes mise en œuvre :

- ✓ MPPT (méthode classique).
- ✓ MPPT P&O (Perturb and Observe).
- ✓ MPPT FLC (Fuzzy Logic Control).

Cette étude sera faite à l'aide d'implémentation des différentes commandes effectuées sous l'environnement Matlab/SIMULINK.

Nous terminerons notre mémoire par une conclusion générale.

I. Généralités sur les systèmes éoliens

I.1 Introduction

Aujourd'hui, les énergies renouvelables sont considérées comme une source importante de production d'électricité et inépuisable à l'échelle de la vie humaine, obtenues à partir des gisements naturels. Ces dernières années, des progrès remarquables ont été accomplis dans divers domaines techniques. Par rapport à certains combustibles fossiles qui ont montré leur épuisement et leur impact environnemental (pétrole, gaz, et dans une moindre mesure, charbon et uranium). En particulier l'énergie éolienne qui a énormément évolué ces deux dernières décennies.

Dans ce présent chapitre, un aperçu sur les différentes sources d'énergie, les aspects constitutifs et technologiques des éoliennes, des généralités sur les génératrices asynchrones à double alimentation, fonctionnant à vitesse variable ainsi que la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique et puis en énergie électrique.

I.2 Production de l'énergie éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement pour d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers.

Une éolienne est constituée figure (I.1), d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil exerce une poussée qui entraîne le rotor et qui constitue une force parasite. La puissance mécanique est ensuite transformée en puissance électrique par une génératrice [2].

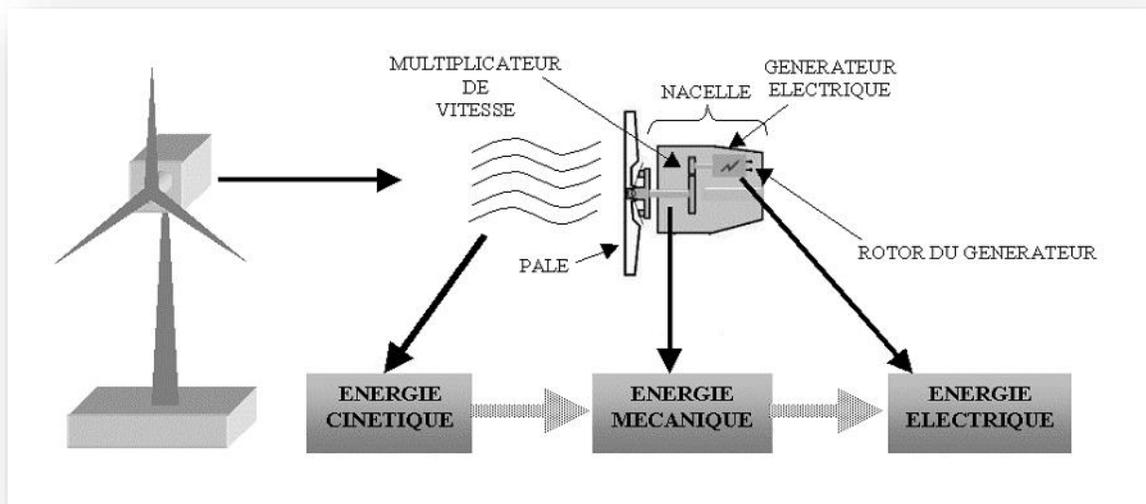


Figure I. 1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

I.3 Principaux composants d'une éolienne

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

Le mât, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur.

La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle qui peut tourner pour orienter la machine dans la bonne direction. A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.

Le rotor, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit [3].

I.4 Les différents types de turbines éoliennes

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

I.4.1 Les éoliennes à axe verticale

Silencieuses, les éoliennes à axe vertical peuvent être installées sur des supports fixés sur le toit d'une résidence, d'un bâtiment commercial, d'une ferme ou d'une usine. Par conséquent, son installation ne nécessite pas des endroits vastes. En plus, elles captent l'énergie du vent quel que soit sa direction. Il existe trois types d'éoliennes à axe vertical : Savonius, Darrieus et à cône.

I.4.2 Les éoliennes à axe horizontale

Ce sont les machines les plus répandues actuellement du fait de leurs rendement qui est supérieur à celui de toutes les autres machines. Elles sont appelées éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction de vent. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales [4].

I.5 Chaine de conversion de l'énergie éolienne

Pour obtenir de l'électricité à partir du vent, on retrouve dans les différentes configurations les mêmes éléments de base à savoir [5] :

- Une turbine qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique.
- Une transmission mécanique.
- Une génératrice.
- Un système de liaison électrique.

Selon l'utilisation de l'éolienne, certaines de ces parties sont plus ou moins développées, on distingue deux grandes familles d'éoliennes :

- Les éoliennes raccordées au réseau.
- Les éoliennes autonomes

I.5.1 Principe de conversion de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur plus communément appelé éolienne est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, cette conversion se fait en deux étapes [6] :

- Au niveau de la turbine, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

I.5.2 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

I.5.2.1 Avantages

- L'énergie éolienne, fiable, économique, et écologique.
- L'énergie éolienne s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO₂, etc.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuite, et inépuisable.
- Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance.

L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint par rapport à d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation.

I.5.2.2 Inconvénients

Mêmes s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- L'impact visuel.
- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques.
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit.
- La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne.

Il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes silencieuses, esthétiques et résistantes aux conditions météorologiques très capricieuses [7].

I.6 Généralités sur les génératrices d'éolienne à vitesse variable

Trois types de génératrice peuvent être utilisés dans les éoliennes à vitesse variable : la génératrice synchrone, la génératrice asynchrone à cage d'écureuil et la génératrice asynchrone à double alimentation.

I.6.1 Systèmes utilisant la machine synchrone

Le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Autrement dit, si la génératrice est connectée au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous-multiple de la pulsation des courants statoriques. L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion. Pour ces raisons, on place systématiquement une interface électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation.

Pour une puissance désirée, on a le choix entre une petite génératrice (à faible nombre de pôles) tournant à grande vitesse, ou une génératrice de grande dimension (présentant un grand nombre de pôles) mais tournant plus lentement [8].

I.6.2 Systèmes utilisant la machine asynchrone

L'éolienne dans cette configuration figure (I.2), entraîne une machine asynchrone à cage connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance.

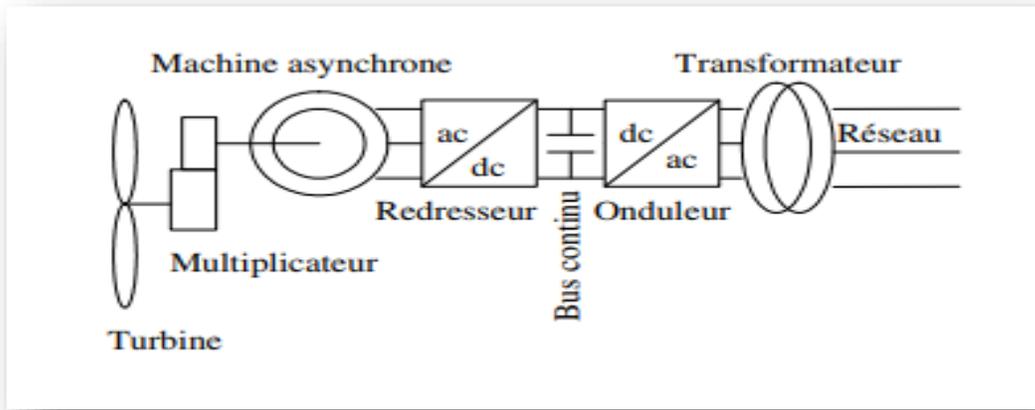


Figure I. 2 : Éolienne à MAS pilotée au stator

L'onduleur est contrôlé pour garder la tension de bus continu constante. Les pales de la turbine éolienne sont orientables pour permettre de limiter la puissance électrique produite constante et égale à sa valeur nominale lors des vitesses du vent très importante [9].

I.6.3 Systèmes utilisant la machine asynchrone à doubles alimentation

Dans cette configuration le stator de la machine asynchrone est connecté au réseau et le convertisseur de puissance se trouve sur le circuit rotorique. La commande du convertisseur permet de contrôler le fonctionnement de la génératrice en imposant la tension des enroulements rotoriques. Ainsi que de maintenir la tension du bus constante [9].

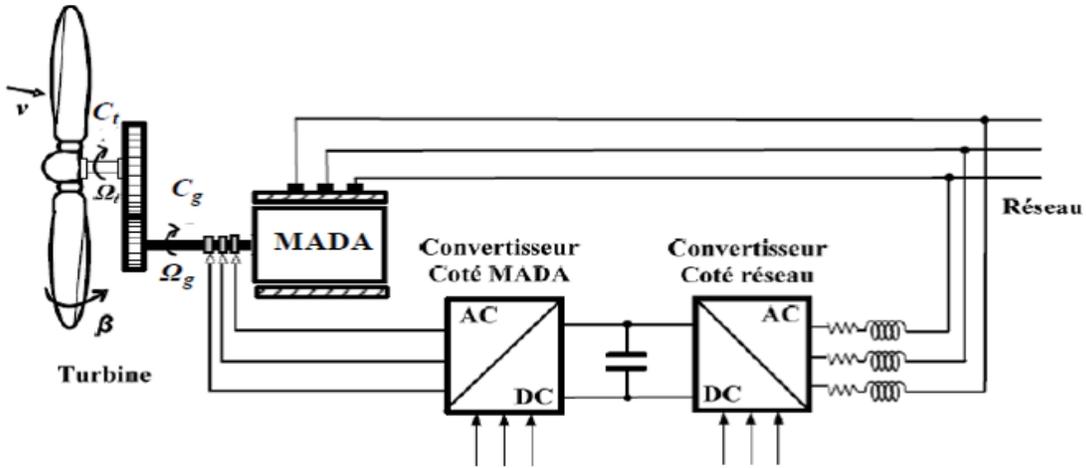


Figure I. 3 : Éolienne à vitesse variable basée sur une MADA

I.7 Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

La théorie du moteur éolien à axe horizontal a été établie par BETZ. Il suppose que « Le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini, amont d'une vitesse V_1 et à l'infini aval d'une vitesse V_2 ».

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit $\frac{V_1+V_2}{2}$.

La puissance $P_{aér}$ extraite s'exprime par :

$$P_{aér} = \frac{\rho \cdot s \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 + V_2^2)}{2} \tag{I.1}$$

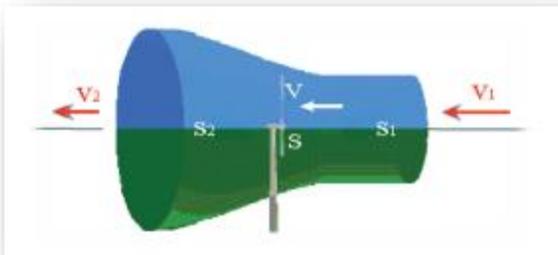


Figure I. 4 : Turbine de courant d'air autour d'une éolienne

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_v correspondante serait alors:

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot V_1^3}{2} \quad (I.2)$$

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

$$\frac{P_{a\acute{e}r}}{P_v} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right) = C_p \quad (I.3)$$

On s'aperçoit que le coefficient de puissance présente C_p un maxima de 16/27 soit 0,59. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance, exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse à l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales, leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m.

Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 45 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts.

Les éoliennes tripales sont les plus répandues, car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente [10].

I.8 Description du fonctionnement de la MADA

I.8.1 Structure de le MADA

Connue depuis 1899, il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation. La MADA est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures, présente un stator analogue à celui

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

Dans cette machine, les enroulements statoriques sont connectés directement au réseau, lorsque les enroulements rotoriques sont connectés à travers un convertisseur de fréquence, ou bien les deux enroulements sont reliés par deux onduleurs, exceptionnellement pour des structures autonomes.

En fonctionnement moteur, le premier intérêt de la machine asynchrone à rotor bobiné a été de pouvoir modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse. Plutôt que de dissiper l'énergie rotorique dans des résistances, l'adjonction d'un convertisseur entre le bobinage rotorique et le réseau permet de renvoyer cette énergie sur le réseau. Le rendement de la machine est ainsi amélioré.

La machine asynchrone à double alimentation est aussi couramment appelée machine généralisée car sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue à une machine synchrone à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de : « machine synchrone à excitation alternative » [7].

I.8.2 Modes de fonctionnement de la MADA

La MADA est parfaitement commandable, si toutefois le flux des puissances est bien contrôlé dans les enroulements du rotor. Puisque la MADA peut fonctionner en moteur comme générateur aux vitesses hypo-synchrones et hyper-synchrones et même synchrone, il y a à distinguer quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine, où on peut rajouter le fonctionnement en

synchronisme. Le principe de la commande de la MADA en ces modes peut être compris à travers la figure. (I.5). Dans cette dernière P_s , P_r et P_m désignent respectivement les puissances du stator, du rotor et mécanique.

I.8.2.1 Fonctionne en moteur

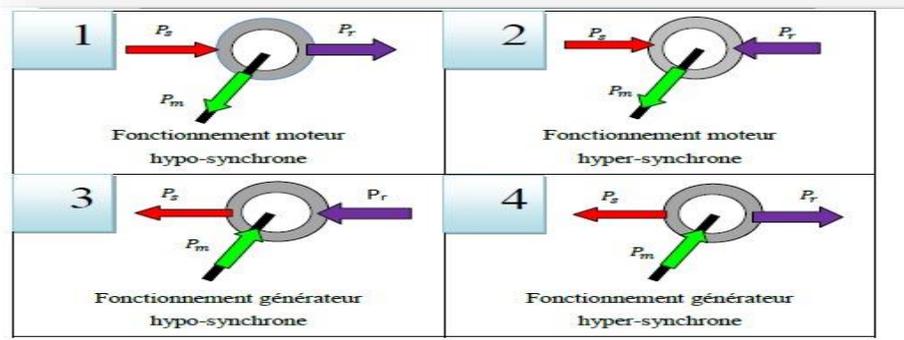
- **En mode hypo-synchrone** : la puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, "la puissance de glissement" est renvoyée sur le réseau.
- **En mode hyper-synchrone** : une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique.

I.8.2.2 Fonctionne en génératrice

- **En mode hypo-synchrone** : une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.
- **En mode hyper-synchrone** : la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à g [10].

Figure I. 5 : Modes opérationnels caractéristiques de la MADA

Pour ces deux fonctionnements, s'ajoute le mode synchrone, qui est une particularité de cette machine en mode hyposynchrone en générateur et hypersynchrone en moteur, où P_r représente les pertes par effet joule dans les résistances rotorique.



I.9 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement. Après un rappel de quelque notion nécessaire à la compréhension de la chaîne conversion d'énergie cinétique de vent en énergie mécanique. Ensuite une brève description de la machine asynchrone à double alimentation, sa structure, son principe de fonctionnement.

II. Modélisation d'un système éolien à base d'une GADA

II.1 Introduction

Pour la conversion de l'énergie éolienne, la turbine et la génératrice sont les éléments les plus importants. Dans ce chapitre on va se concentrer sur la modélisation de la machine électrique, qui est une phase primordiale de son développement. Les progrès de l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation des machines électriques. En effet les éoliennes à vitesse variable fonctionnent sur une large plage de vitesse permettant ainsi une maximisation des puissances extraites pour de faibles vitesses du vent et le maintien d'une puissance constante pour des vitesses de vent élevées, en mode pitch contrôle.

II.2 Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales et de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement, tournant à une vitesse Ω_{turbine} , relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique (Figure II.1) [11].

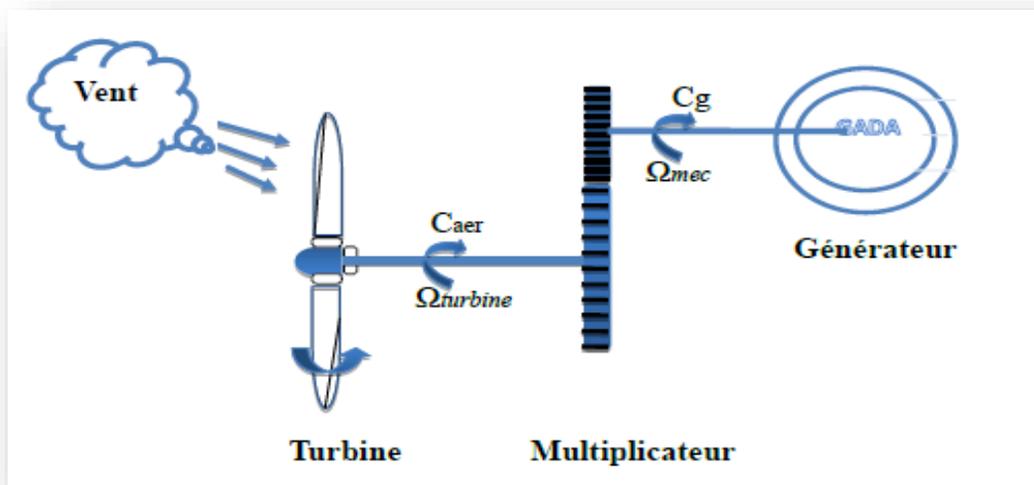


Figure II. 1 : Schéma de la turbine éolienne

II.2.1 Modélisation de la turbine

La vitesse du vent ou puissance éolienne est définie de la manière suivante :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (\text{II.1})$$

Où

P_v est la puissance totale théoriquement disponible.

ρ est la densité de l'air (1.22 kg/m³ à la pression atmosphérique à 15°C).

S est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.

v est la vitesse du vent.

En réalité, le dispositif de conversion (la turbine éolienne) extrait une puissance aérodynamique $P_{aér}$ inférieure à la puissance disponible P_v .

$$P_{aér} = C_p \cdot P_v = C_p(\beta, \lambda) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (\text{II.2})$$

Le coefficient de puissance C_p , représente le rendement aérodynamique de la turbine Éolienne ($\frac{P_{aér}}{P_v}$). Il dépend de la caractéristique de la turbine.

Il varie en fonction de l'angle d'orientation des pales (β) et de ratio de vitesse (λ).

Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R \Omega_{turbine}}{v} \quad (\text{II.3})$$

Où $\Omega_{turbine}$: est la vitesse de la turbine.

Connaissant la vitesse de la turbine, donc le couple aérodynamique directement déterminé par :

$$C_{aér} = \frac{P_{aér}}{\Omega_{turbine}} = C_p \frac{1}{2} \rho S v^3 \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (\text{II.4})$$

- Coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$

La turbine éolienne peut seulement convertir juste un certain pourcentage de la puissance capturée du vent. On présente ce pourcentage en fonction de (λ, β) .

Nous avons donc choisi de modéliser une éolienne de 7.5 KW pour notre simulation. C'est un modèle tripale dont la longueur d'une pale est de 3.24 m. L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. Et dépend de la vitesse spécifique λ (fonction de la vitesse du vent) et de l'angle d'orientation des pales β . A titre d'exemple, l'expression du coefficient de puissance d'une turbine éolienne de 7.5 KW est approximé par l'équation [14] :

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.0167 \cdot (\beta - 2)) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3 \cdot (\beta - 2)}\right) - 0.00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (\text{II.5})$$

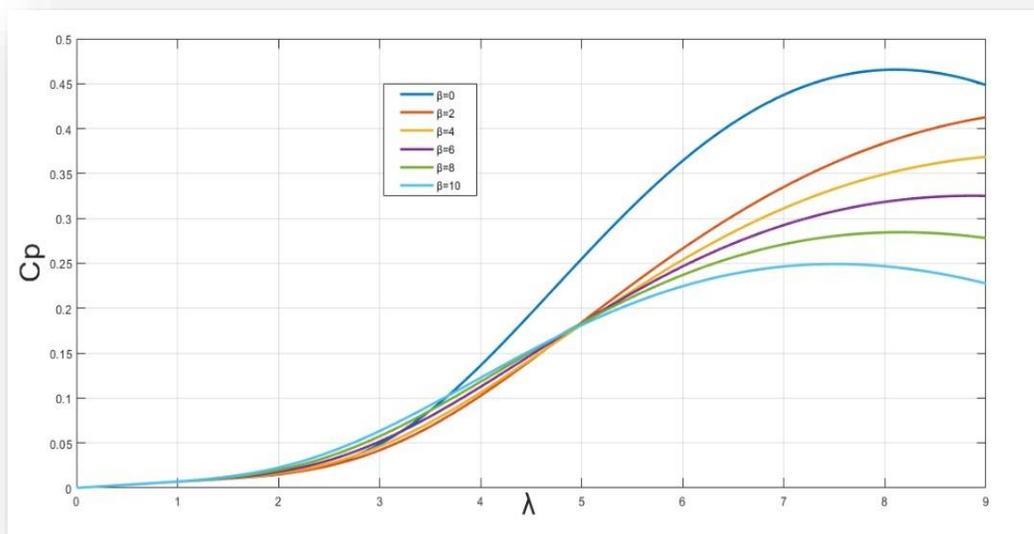


Figure II. 2 : Évolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative

Ainsi comme il est illustré dans la figure (II.2), il est possible de constater que le coefficient de puissance évolue en forme de cloche, le maximum de celle-ci ($C_p = 0.49$) est atteint pour une $\lambda = 9$, et de l'angle d'orientation des pales $\beta = 0$. Avec cette valeur la turbine fonctionne avec le rendement maximum théorique. Dans la suite de notre travail une commande adaptée sera élaborée pour atteindre ce point de fonctionnement [14].

II.2.2 Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse est la liaison entre la turbine et le générateur. Il a pour but d'adapter la vitesse de la turbine $\Omega_{turbine}$, assez lente à celle que nécessite la génératrice Ω_g [15].

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aér}}{G} \quad (II.6)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.7)$$

II.2.3 Équations dynamiques de l'arbre

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

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (II.8)$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total (C_{mec}) appliqué au rotor :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{G^2} = C_{mec} \quad (II.9)$$

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

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux F_v : $C_{vis} = F_v \Omega_{turbine}$ (II.10)

L'équation mécanique qui gère un tel ensemble est donnée par :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II.11)$$

$$C_g - C_{em} = J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + F_v \Omega_{mec} \quad (\text{II.12})$$

$$\Omega_{mec} = \frac{1}{Js+f} (C_g - C_{em}) \quad (\text{II.13})$$

Le schéma bloc (Figure. II.3) correspondant à cette modélisation de la turbine se déduit aisément des équations précédentes. Cette dernière génère le couple aérodynamique $C_{aér}$ qui est appliqué au multiplicateur. Les entrées de la turbine sont la vitesse du vent v , l'angle d'orientation des pales β et la vitesse de rotation de la turbine $\Omega_{turbine}$. Le modèle du multiplicateur transforme la vitesse mécanique Ω_{mec} et le couple aérodynamique $C_{aér}$ respectivement en vitesse de la turbine $\Omega_{turbine}$ et C_g . Le modèle de l'arbre décrit la dynamique de la vitesse mécanique Ω_{mec} , il a donc deux entrées : le couple du multiplicateur C_g , le couple électromagnétique C_{em} fourni par la génératrice. Le schéma montre que la vitesse de la turbine $\Omega_{turbine}$ peut être contrôlée par action sur deux entrées : l'angle d'orientation des pales β et le couple électromagnétique de la génératrice C_g . La vitesse du vent v est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système [16].

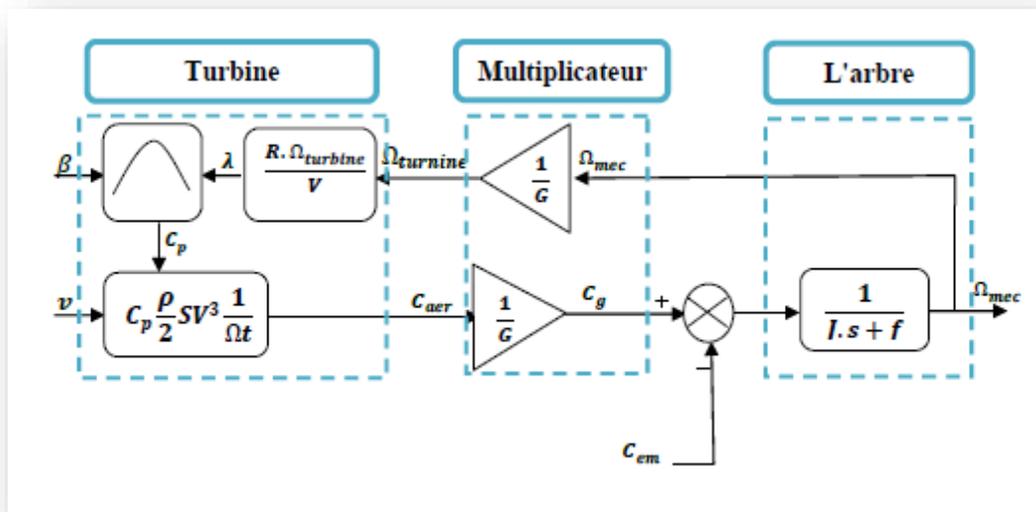


Figure II. 3 : Schéma bloc du modèle de la turbine

II.2.4 Stratégie de commande de la turbine

Comme il est illustré sur la figure (II.5), on distingue quatre (04) zones principales de fonctionnement [17].

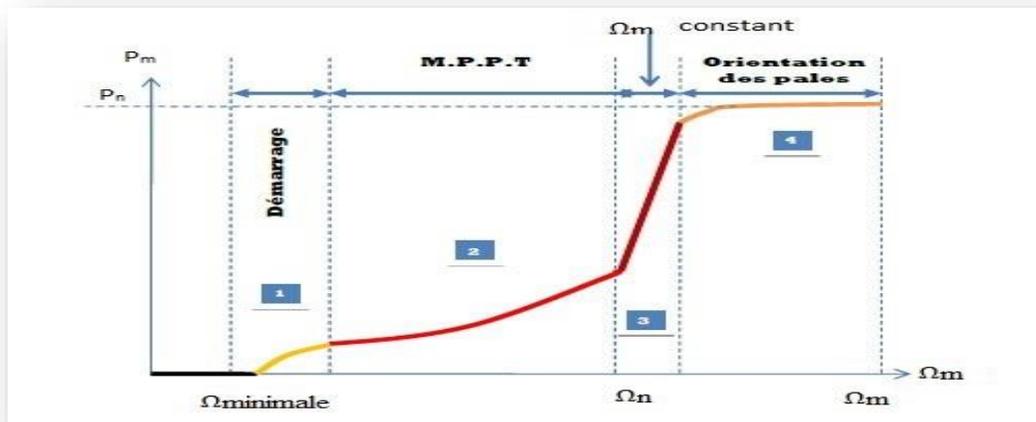


Figure II. 4 : Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne

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

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

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

Zone4 : arrivée à la puissance nominale, la vitesse doit être limitée, c'est la phase où intervient la limitation de vitesse par orientation des pales (angle de calage), c'est le « Pitch Control », [14]. Au-delà de la vitesse $\Omega_{cut-out}$, un dispositif d'urgence est actionné de manière à éviter une rupture mécanique.

II.3 Modélisation de la partie de conversion électromécanique

La modélisation d'une génératrice asynchrone était basée sur l'élaboration de schémas équivalents dérivés de la théorie du champ tournant. La simplicité de conception et d'entretien de cette génératrice à la faveur des industries, s'accompagne toutefois d'une grande complexité physique, liée aux interactions électromagnétiques entre le stator et le rotor. Les méthodes matricielles sont développées et sont devenues les bases pour une

approche de modélisation, de simulation, d'identification et de commande. Nous allons nous intéresser à la modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation, on expose les différentes hypothèses simplificatrices ainsi que le modèle mathématique de la machine.

II.3.1 Hypothèses simplificatrices

On prend en considérations les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants.
- Les pertes (par hystérésis et courant de Foucault) sont négligées.
- Les forces magnétomotrices créées par chacune des phases des deux armaturassent à répartition sinusoïdales d'où résulte du fait que l'entrefer est constant, et que les inductances mutuelles entre deux enroulements varient sinusoïdalement en fonction de l'angle entre leurs axes magnétiques.
- Les résistances ne varient pas avec la température et l'effet de peau négligé.

De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements [17].

II.3.2 Modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation

Le stator de la machine est constitué de trois enroulements répartis dans l'espace et séparés d'un angle électrique de $(2\pi/3)$, et de pulsation $(\omega_s = 2\pi f_s)$. Le rotor est aussi formé de trois enroulements de pulsation $(\omega_r = 2\pi f_r)$, et séparés d'un angle électrique de $(2\pi/3)$ [18].

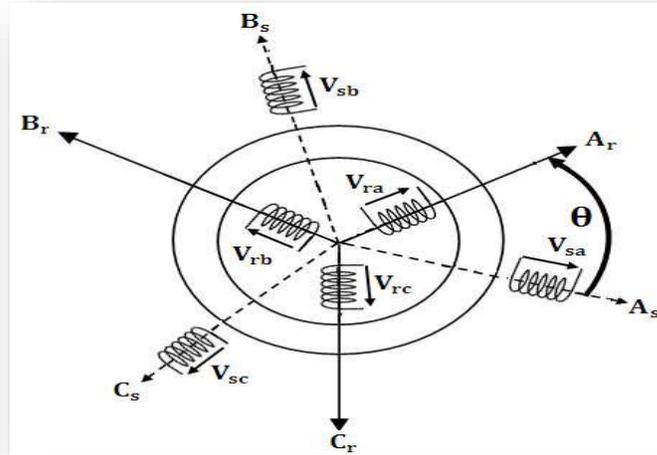


Figure II. 5 : Représentation schématique de la GADA

II.3.2.1 Équations électriques

Les équations des tensions électriques des enroulements statoriques et rotoriques, peuvent être exprimées par la loi de Faraday permettant d'écrire :

$$V = RI + \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{II.14})$$

Pour les phases statoriques, on a :

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s \cdot I_{sa} + \frac{d\phi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s \cdot I_{sb} + \frac{d\phi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s \cdot I_{sc} + \frac{d\phi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}; [I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}; [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix}; [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

Donc l'équation générale du stator est :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \quad (\text{II.17})$$

Pour les phases rotoriques :

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r \cdot I_{ra} + \frac{d\varphi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = R_r \cdot I_{rb} + \frac{d\varphi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = R_r \cdot I_{rc} + \frac{d\varphi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Avec :

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}; [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}; [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Donc l'équation générale du rotor est :

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \quad (\text{II.20})$$

II.3.2.2 Équations magnétiques

Les équations magnétiques de la MADA sont données par :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s] \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Avec :

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

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

$[M_{sr}]$: Matrice d'inductances mutuelles du couplage stator – rotor

D'après les relations précédentes, on aura :

$$\begin{bmatrix} [\varphi_s] \\ [\varphi_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

Finalement :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [[L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r]] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} [[L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s]] \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

II.3.3 Passage du triphasé au biphasé (Transformation de PARK)

La transformation de PARK découle de la diagonalisation des matrices inductances statoriques et rotoriques. Elle permet de passer du repère (abc) vers le repère ($\alpha\beta$), puis vers le repère (dq).

Le repère ($\alpha\beta$) est toujours fixe par rapport au repère (abc), par contre le repère (dq) est mobile, il forme avec le repère fixe ($\alpha\beta$) un angle, appelé angle de la transformation de Park ou angle de Park [19].

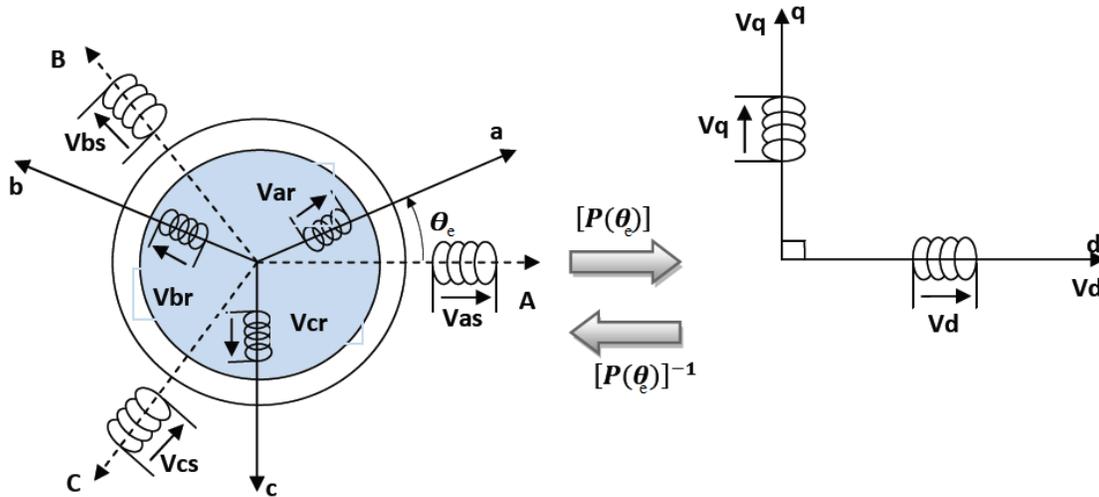


Figure II. 6 : Passage du triphasé au biphasé et l'inverse

Ainsi, la transformation de Park permet de transformer les enroulements statoriques et rotoriques triphasés en des enroulements statorique et rotorique biphasés orthogonaux, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système précédent.

La matrice de transformation de Park est définie comme suit :

$$[[P(\theta_e)]] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_e) & -\sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

$$[[P(\theta_e)]]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & -\sin(\theta_e) & 1 \\ \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix}$$

Cette matrice permet le passage des composantes X_{abc} du système triphasé aux composantes biphasées : avec X_{abc} peut être : un vecteur de tension, courant ou flux [19].

II.3.4 Représentation de la MADA dans le repère biphasé

- **Équations électriques**

En multipliant les systèmes des équations par la matrice de Park, on obtient :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (II.23)$$

Sous forme vectorielle cela donne :

$$\begin{cases} \bar{V}_s = R_s \cdot \bar{I}_s + \frac{d\bar{\varphi}_s}{dt} - j\omega_s \bar{\varphi}_s \\ \bar{V}_r = R_r \cdot \bar{I}_r + \frac{d\bar{\varphi}_r}{dt} - j(\omega_s - \omega) \bar{\varphi}_r \end{cases} \quad (II.24)$$

Avec :

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad J : \text{appelée matrice de rotation}$$

- **Équations magnétiques**

En multipliant les systèmes des équations par la matrice de Park, on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (II.25)$$

- **Équations électriques sous forme matricielle**

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + L_s \frac{dI_{ds}}{dt} + M \frac{dI_{dr}}{dt} - \omega_s L_s I_{qs} - \omega_s M I_{qr} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + L_s \frac{dI_{qs}}{dt} + M \frac{dI_{qr}}{dt} - \omega_s L_s I_{ds} - \omega_s M I_{dr} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + L_r \frac{dI_{dr}}{dt} + M \frac{dI_{ds}}{dt} - \omega_s L_r I_{qr} - \omega_s M I_{qs} + \omega L_r I_{qr} + \omega M I_{qs} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + L_r \frac{dI_{qr}}{dt} + M \frac{dI_{qs}}{dt} - \omega_s L_r I_{dr} + \omega_s M I_{ds} - \omega L_r I_{dr} + \omega M I_{ds} \end{cases} \quad (II.26)$$

Ce système d'équation se traduit sous la forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \\ + \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -L_s & 0 & -M \\ L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -M & 0 & -L_r \\ M & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

$$[V] = [A][I] + [B] \frac{d}{dt} [I] + \omega_s [C][I] + \omega [D][I] \quad (\text{II.28})$$

Et la matrice $[\varphi]$, ce qui représente les équations magnétiques $[\varphi] = [B][I]$

donc :

$$[V] = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix}; \quad [I] = \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix}; \quad [\varphi] = \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix}; \quad [A] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix};$$

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

II.3.5 Expression de la puissance active et réactive

La puissance active et réactive au stator est définie comme suit :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

$$\begin{cases} P_r = V_{dr} I_{dr} + V_{qr} I_{qr} \\ Q_r = V_{qr} I_{dr} - V_{dr} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Nous avons exprimé les équations de la génératrice, mais il reste également le couple électromagnétique. Ce dernier peut être obtenu à l'aide d'un bilan de puissance. La puissance électrique instantanée fournie aux enroulements statoriques et rotoriques en fonction des grandeurs d'axes (dq) est donnée par l'expression suivante :

$$P_s = V_{sd}I_{sd} + V_{sq}I_{sq} \quad (\text{II.31})$$

$$P_s = (R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs}) I_{ds} + (R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds}) I_{qs} \quad (\text{II.32})$$

$$P_s = R_s (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) + \left(\frac{d\varphi_{ds}}{dt} I_{ds} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} I_{qs} \right) + \omega_s (\varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds}) \quad (\text{II.33})$$

Elle se décompose en trois termes :

- Puissance dissipée en pertes joules

$$R_s (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) \quad (\text{II.34})$$

- Puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétique avec la source

$$\left(\frac{d\varphi_{ds}}{dt} I_{ds} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} I_{qs} \right) \quad (\text{II.35})$$

- Puissance mécanique

$$\omega_s (\varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds}) \quad (\text{II.36})$$

II.3.6 Expression du couple électromagnétique

$$C_{em} = \frac{P_m}{\Omega_s} \quad ; \quad \Omega_s = \frac{\omega_s}{P} \quad ; \quad C_{em} = P \frac{P_m}{\omega_s}$$

$$C_{em} = P (\varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds}) \quad (\text{II.37})$$

$$C_{em} = P \cdot M (I_{qs} I_{dr} - I_{ds} I_{qr}) \quad (\text{II.38})$$

La fréquence de la tension statorique étant imposée par le réseau électrique, la pulsation des courants rotoriques est donnée par :

$$\omega_r = \omega_s - \Omega_{mec} \quad (\text{II.39})$$

ω_s et ω_r représentent respectivement les pulsations des tensions statoriques et rotoriques en rad/s. Les angles θ_s et θ_r sont obtenus respectivement par intégration de ω_s et ω_r .

$$\begin{cases} \theta_s = \int_0^t \omega_s dt \\ \theta_r = \int_0^t \omega_r dt \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les parties essentielles du système de conversion éolienne, la première représente la partie mécanique qui contient la turbine, le multiplicateur et l'arbre de la MADA.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons modélisé la génératrice asynchrone à double alimentation. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi, dont la complexité a été réduite. Nous avons constaté que le modèle de la machine asynchrone à double alimentation est un système à équations différentielles, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle.

III. Commande d'un aérogénérateur basé sur une MADA pour extraire le maximum de puissance

III.1 Introduction

Le principe du contrôle direct a été développé dans le but d'éliminer le bloc de modulation et les boucles internes en les remplaçant par une table de commutation dont les entrées sont les erreurs entre les valeurs de références et les mesures. La première application développée était le contrôle d'une machine électrique et la structure de contrôle était connue sous le nom de la DTC (Direct Torque Control) qui a été proposée par I. Takahashi, dans les années 80, dans ce cas, on contrôle le flux rotorique et le couple électromagnétique de la machine sans aucun bloc de modulation [22].

Afin d'optimiser notre système on lui associe des techniques qui vont nous permettre d'extraire le maximum de puissance et d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite selon la vitesse variable, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent. L'objectif principal de la commande des éoliennes à vitesse variable est d'assurer une bonne qualité de la puissance mécanique et électrique générée par la turbine et la génératrice et c'est à partir d'une source primaire variable qui est le vent.

Ce chapitre est dédié à l'étude des différentes stratégies de commande utilisées dans un système éolien à base d'une génératrice (commande MPPT, commande de vitesse et couple, commande de la MADA). Trois techniques MPPT seront analysées et comparées dans cette partie.

III.2 La commande directe du couple (DTC)

La commande directe du couple (DTC) d'une machine asynchrone à double alimentation est basée sur la détermination directe de la séquence de commande appliquée aux interrupteurs du convertisseur statique d'alimentation en vue d'imposer les niveaux de couple et de flux désirés [22].

La suppression de l'étage MLI est la principale caractéristique dans une technique DTC. Ainsi la génération des commandes de l'onduleur se fait de façon directe sans l'intermédiaire de cet étage.

Dans la suite de notre travail on va se baser sur l'onduleur à deux niveaux.

COMMANDE D'UN AEROGENERATEUR BASE SUR UNE MADA POUR EXTRAIRE LE MAXIMUM DE PUISSANCE

III.2.1 Principe de la commande DTC appliquée à un onduleur a deux niveaux

Le principe de la commande DTC est basé sur la régulation directe du couple électromagnétique de la machine, par l'application de différents vecteurs de tensions sur l'onduleur bien choisi. Les grandeurs contrôlées sont le flux rotorique et le couple électromagnétique, généralement sont commandés par des régulateurs à bandes d'hystérésis de deux à plusieurs niveaux, afin de maintenir ces grandeurs à l'intérieur de ses bandes et pour déterminer les évolutions exactes de ces grandeurs contrôlées. Les sorties de ces régulateurs et l'angle qui représente la position du flux rotorique et le vecteur de tension de l'onduleur optimal à appliquer sont tout déterminés dans chaque instant de commutation [22].

III.2.2 Les propriétés générales de la commande DTC

Dans une commande DTC, il est conseillé de travailler avec des fréquences de calcul plus élevées pour avoir des réductions dans les oscillations du couple générées par les régulateurs à hystérésis. Les propriétés générales de la commande directe du couple sont représentées dans les points suivants [22] :

- ✓ Une commande directe du couple et du flux à partir de la sélection des vecteurs optimaux.
- ✓ Une commande indirecte des courants et des tensions rotoriques.
- ✓ Une estimation du couple et de flux à partir des grandeurs électriques.
- ✓ Une réponse dynamique de la machine très rapide.
- ✓ L'existence des oscillations du couple qui dépend, entre autres, des facteurs de la largeur des bandes des régulateurs à hystérésis.
- ✓ La fréquence de commutation de l'onduleur dépend de l'amplitude de ces bandes.
- ✓ Une trajectoire circulaire du flux rotorique dans le plan biphasé.

III.2.3 Structure générale du contrôle direct de couple

La commande DTC est une commande échantillonnée dont la période d'échantillonnage T_e est très petits vis-à-vis des constantes des temps de la machine. Le choix du vecteur \overline{V}_r est effectué à chaque période d'échantillonnage T_e .

Cette dernière, en combinaison avec les comparateurs à hystérésis, représente la table de commutation qui remplace le générateur MLI. En plus, avec l'utilisation de ce type de contrôle les exigences de régulateur du courant, régulateur PI de flux et du couple sont éliminés ce qui améliore les performances dynamiques du système.

❖ Mode générateur

On peut généraliser la technique utilisée dans la première partie dans le cas d'une génératrice asynchrone à double alimentation GADA à vitesse variable où son stator est directement connecté au réseau électrique tandis que le rotor est connecté à un onduleur. Dans notre cas, on va s'intéresser au flux rotorique et le couple électromagnétique comme des variables de commande.

Le principe de la commande directe de couple et de flux consiste à obtenir une estimation fiable de la valeur instantanée du couple, du flux ainsi que de l'angle du flux rotorique.

Le calcul de l'angle et du module du flux passe par le calcul des composantes en quadrature et directe du flux rotorique [13].

$$\begin{cases} \varphi_{r\alpha}(t) = \int_0^t (v_{r\alpha} - R_r i_{r\alpha}) dt \\ \varphi_{r\beta}(t) = \int_0^t (v_{r\beta} - R_r i_{r\beta}) dt \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Le module du flux rotorique s'écrit :

$$\varphi_r = \sqrt{\varphi_{r\alpha}^2 + \varphi_{r\beta}^2} \quad (\text{III.2})$$

Le secteur Ni dans lequel se situe le vecteur $\overline{\varphi}_r$ est déterminé à partir des composantes $\varphi_{r\alpha}$ et $\varphi_{r\beta}$. L'angle α_r du flux φ_r est égal à :

COMMANDE D'UN AEROGENERATEUR BASE SUR UNE MADA POUR EXTRAIRE LE MAXIMUM DE PUISSANCE

$$\alpha_r = \arctg \frac{\varphi_{r\beta}}{\varphi_{r\alpha}} \tag{III.3}$$

Afin d'estimer le couple, nous avons retenu l'équation classique du couple :

$$C_{em} = P[\varphi_{r\alpha} i_{r\beta} - \varphi_{r\beta} i_{r\alpha}] \tag{III.4}$$

La figure (III.1) représente les éléments essentiels d'un système de contrôle direct du couple d'une GADA. En utilisant le tableau classique des séquences proposées par Takahashi.

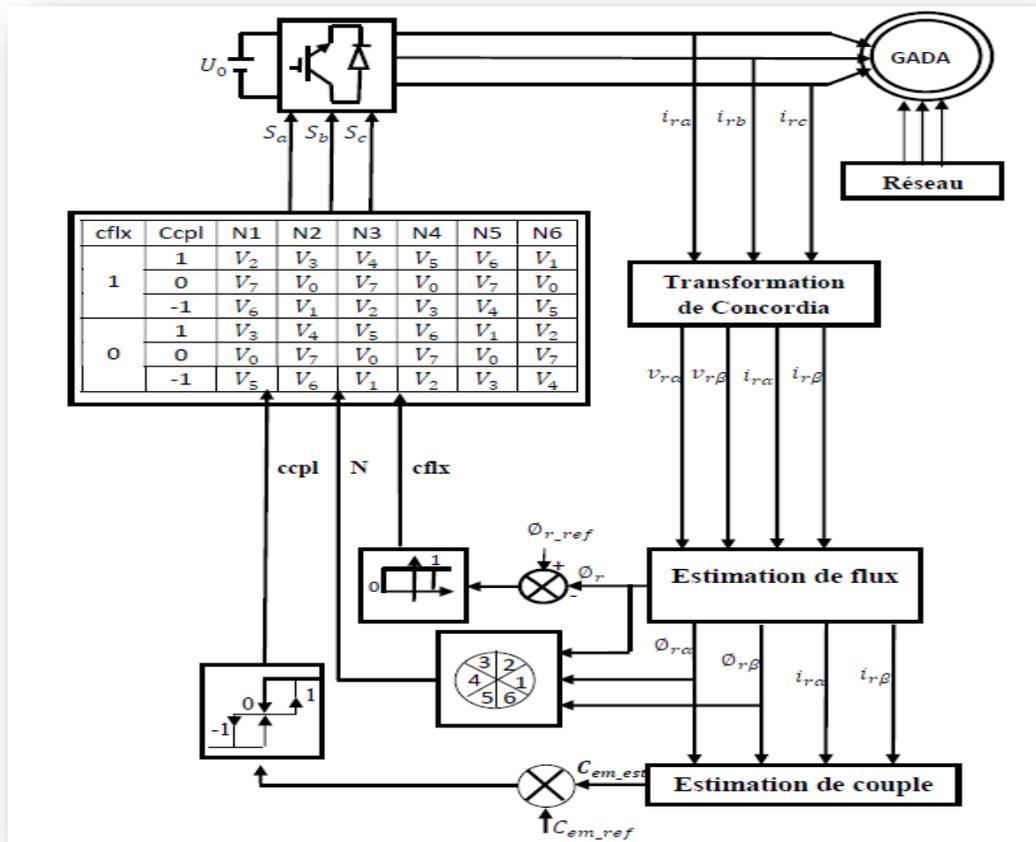


Figure III. 1 : structure de la commande directe de couple et de flux du GADA

III.2.4 Élaboration du tableau de commutation

Dans ce cas on n'exploite que les séquences actives. Cette stratégie à l'avantage de la facilité et permet d'éviter les réductions indésirables du flux à basse vitesse. Figure (III.2) illustre la table de vérité de commande DTC classique à 6 secteurs.

cflx	ccpl	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
1	1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
1	0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0
1	-1	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
0	1	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2
0	0	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7
0	-1	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4

Figure III. 2 : Table de localisation selon 'I. Takahashi' pour le réglage du flux et du couple (DTC classique)

III.2.5 Avantages de la DTC

- Il n'est pas nécessaire de faire la transformation des coordonnées, car les courants et les tensions sont dans un repère lié au stator.
- Utilise un modèle simplifié de la machine.
- Il n'existe pas de bloc qui calcule la modulation de la tension (MLI).
- Il n'est pas nécessaire de faire un découplage des courants par rapport aux tensions de commande, comme dans le cas de la commande vectorielle.
- Elle exige deux comparateurs à hystérésis, tandis que la commande vectorielle indirecte exige 4 régulateurs PI et un modulateur de PWM.
- Il n'est pas nécessaire de connaître avec une grande précision l'angle de position rotorique, car seule l'information de secteur dans lequel se trouve le vecteur de flux est nécessaire.
- La réponse dynamique du couple est très rapide.
- Robustesse vis-à-vis des variations paramétriques.

COMMANDE D'UN AEROGENERATEUR BASE SUR UNE MADA POUR EXTRAIRE LE MAXIMUM DE PUISSANCE

- Possibilité d'appliquer les algorithmes du système avec des cartes d'acquisition.

III.2.6 Inconvénients de la DTC

- L'existence de problèmes à basse vitesse.
- La nécessité de disposer des estimations de flux et du couple.
- L'existence des oscillations au niveau du couple.
- La fréquence de commutation n'est pas constante (utilisation des comparateurs à hystérésis).

III.3 Techniques d'extraction du maximum de puissance, MPPT (Maximum Power Point Tracking)

Dans cette partie, MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un algorithme permettant de suivre le point de puissance maximale d'un générateur pour une source variable (par exemple, la vitesse du vent dans le cas d'une éolienne). La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est fortement non linéaire et à une forme de « cloche ». Pour chaque vitesse de vent, le système doit trouver la puissance maximale, ce qui est équivalent à la recherche de la vitesse de rotation optimale. Le schéma de la Figure (III.3), illustre les courbes caractéristiques d'une éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation de la turbine. Chaque courbe en ligne pointillée correspond à une vitesse de vent donnée. L'ensemble des sommets de ces caractéristiques, qui sont les points optimaux recherchés, définit une courbe dite de puissance optimale [23].

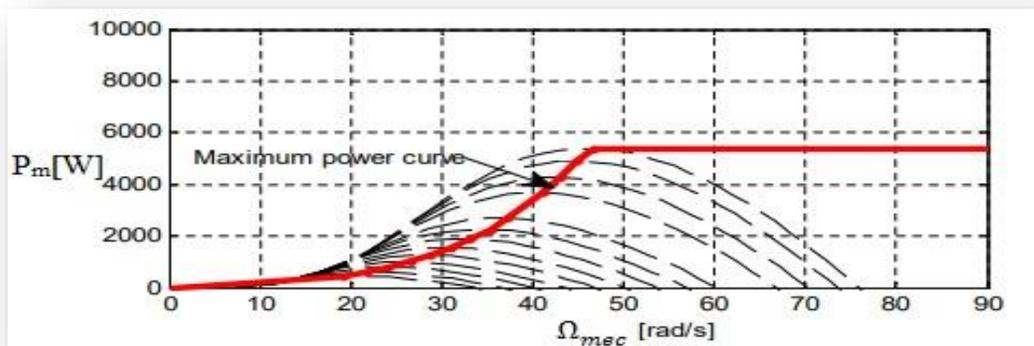


Figure III. 3 : Caractéristiques d'une éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation

COMMANDE D'UN AEROGENERATEUR BASE SUR UNE MADA POUR EXTRAIRE LE MAXIMUM DE PUISSANCE

Généralement, chacun de ces contrôleurs (MPPT) a été réalisé pour des applications spécifiques. La précision et la robustesse de ces contrôleurs dépendent d'un certain nombre de paramètres :

- ◆ Le rendement global du système désiré par le constructeur.
- ◆ Le type de convertisseur de puissance permettant l'adaptation et la connexion à une charge (DC-DC, DC-AC), ou à un réseau électrique.
- ◆ L'application souhaitée (systèmes autonomes, connectés au réseau, spatiaux).
- ◆ Les caractéristiques du MPPT, en fonction de la vitesse.
- ◆ Le type d'implantation choisi (analogique, numérique, mélange des deux).

III.3.1 MPPT P&O (Perturb and Observe)

La perturbation et l'observation (P&O), est une technique d'optimisation mathématique simple à mettre en œuvre qui ne nécessite pas la connaissance de la courbe caractéristique de la turbine éolienne, utilisée pour rechercher le point optimal d'une fonction donnée. Il est largement utilisé dans les systèmes d'énergie solaire et éolienne pour déterminer le point de fonctionnement optimal qui permettra de maximiser l'énergie extraite. Cette méthode est basée sur la perturbation d'une variable de commande (entrée) par un petit pas et en observant les changements qui en résultent dans la fonction cible (sortie) jusqu'à ce que la pente devient nulle, Comme la montre la figure (III.4).

III.3.2 Organigramme de la méthode P&O

Il est clair que cette méthode ne nécessite aucune connaissance préalable des paramètres mécaniques ou électriques d'un système éolienne.

La figure (III.4), représente l'organigramme décrit [23] :

COMMANDE D'UN AEROGENERATEUR BASE SUR UNE MADA POUR EXTRAIRE LE MAXIMUM DE PUISSANCE

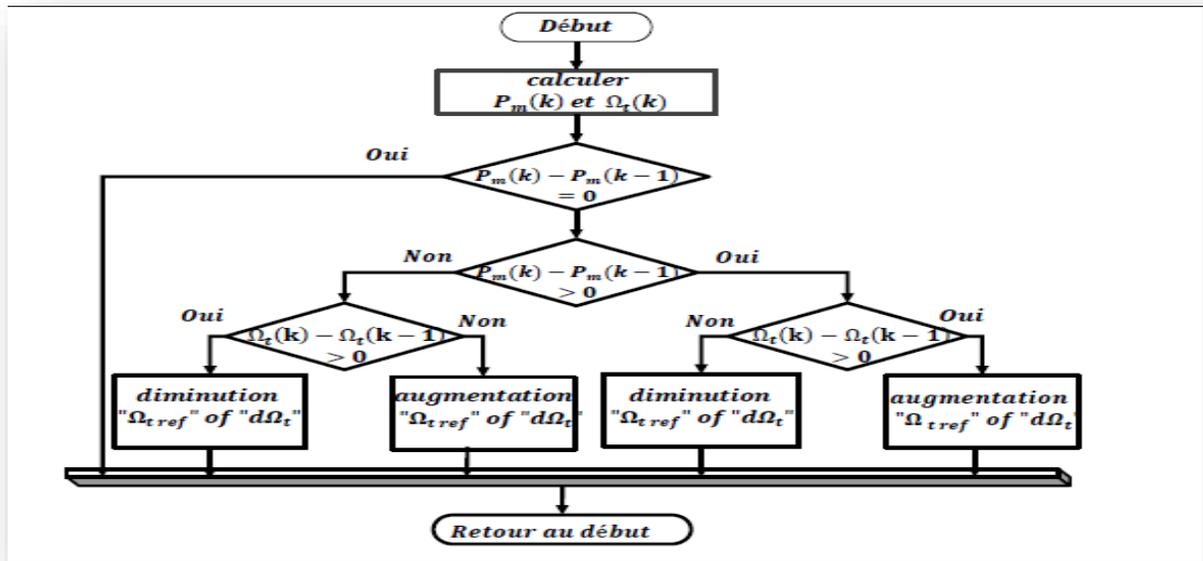


Figure III. 4 : Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation (P&O)

- Avec cet organigramme, la vitesse de fonctionnement Ω_{mec} est perturbée à chaque cycle du MPPT. Dès que le MPP (Maximum Power Point) sera atteint, Ω_{mec} oscillera autour de la puissance idéale de fonctionnement. Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d'une perturbation simple du C_p .
- Si C_p est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou légèrement changeantes.
- La valeur C_p idéale du système doit être déterminée expérimentalement.

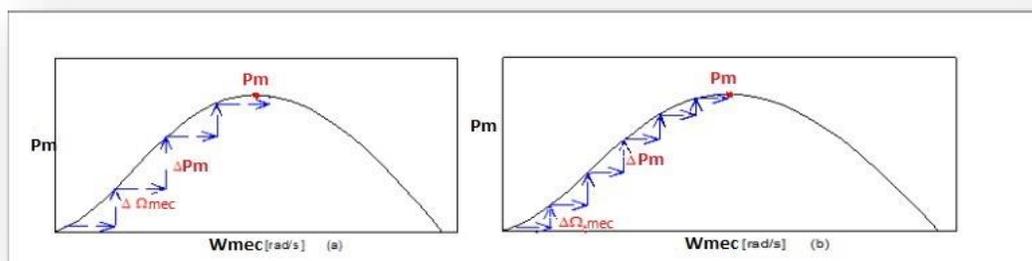


Figure III. 5 : Méthode de perturbation et d'observation du MPPT

III.4 MPPT par la logique floue (FLC)

La logique floue permet de faire correspondre un degré de vérité (d'appartenance) à une variable qui peut être linguistique. Cette graduation dans l'appartenance d'un élément à une situation permet la modélisation de l'observation humaine exprimée sous forme linguistique. À partir des années 70, cette théorie a été appliquée à la commande des systèmes. Ces travaux permettaient de mettre en œuvre des commandes de façon heuristique. Dans les années 80, la communauté des automaticiens a commencé à bâtir une théorie de commande floue où l'étude de la stabilité a été introduite de façon systématique [20].

III.4.1 Principe de la logique floue

La logique floue est une forme de valeurs multiples logique dans laquelle les valeurs de vérité des variables peuvent être un nombre réel entre 0 et 1, considéré comme « floue ». En revanche, dans la logique booléenne, les valeurs de vérité des variables ne peuvent être 0 ou 1, souvent appelées valeurs nettes. La logique floue a été étendue pour gérer le concept de vérité partielle, où la valeur de vérité peut se situer entre tout à fait vrai et complètement faux. En outre, lorsque les variables linguistiques sont utilisées, ces degrés peuvent être gérés par des fonctions spécifiques (membres) [20].

III.4.2 Le superviseur de la logique flou

Trois étapes caractérisent un superviseur à logique floue [21] :

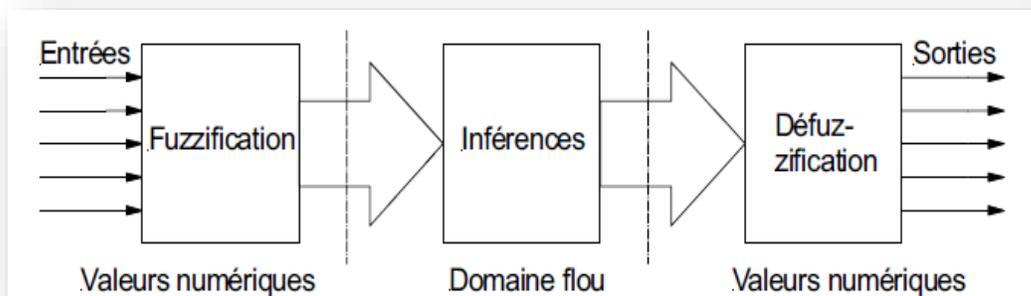


Figure III. 6 : Traitement flou

COMMANDE D'UN AEROGENERATEUR BASE SUR UNE MADA POUR EXTRAIRE LE MAXIMUM DE PUISSANCE

◆ **Fuzzification :**

La Fuzzification qui permet de définir les sous-ensembles flous des variables d'entrée.

Lorsqu'il s'agit d'une fuzzification, ces signaux sont transformés, après adaptation, à des variables linguistiques, dans ce cas les fonctions d'appartenance sont à sept ensembles flous chacun.

La Fuzzification des variables d'entrée, où on considère, N : Négatif; G : Grand; Z : Zéro; P : Positive; M: Moyen; Pe : Petit.

◆ **Inférence :**

A cette étape du processus de calcul flou, la fuzzification des variables d'entrée effectuée est suivi par l'inférence qui consiste à déterminer les degrés et fonctions d'appartenances de sortie à l'aide d'un tableau d'inférence (figure III.7). Ce tableau résume l'ensemble des règles de savoir-faire humain, basées sur l'expérience, la connaissance du système à piloter ainsi que sur une part d'intuition.

ΔP $\Delta \Omega_{(k-1)}$	GN	MN	PN	ZE	PP	MP	GP
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

Figure III. 7 : Règles permettant de déterminer les fonctions et les degrés d'appartenance de $\Omega_{ref}(K)$

◆ Défuzzification :

Lorsqu'il s'agit d'une défuzzification le signal de sortie est obtenu après une transformation de la valeur floue calculée par la méthode du centre de gravité, à une valeur déterministe de commande [20].

III.5 Résultats de simulation & interprétation

Dans cette partie nous allons présenter les résultats de simulation du fonctionnement de notre aérogénérateur commandé par DTC, sous l'environnement MATLAB/SIMULINK. Ces résultats obtenus basées sur la structure de commande sans asservissement de la vitesse, l'angle de calage β sera constant le long de la simulation avec $\beta = 0^\circ$, pour avoir un fonctionnement dans la zone d'extraction de maximum de puissance.

III.5.1 Profil du vent

Le vent est la variable d'entrée du système éolien, sa configuration est assez complexe, cependant, le vent peut être défini par une grandeur stochastique représenté par des paramètres statiques. Le profil du vent est choisi d'une manière à faire fonctionner cet aérogénérateur dans ces trois régimes du fonctionnement (hyposynchrone, hypersynchrone et synchrone).

La figure (III.8), illustre la caractéristique du profil du vent. On gardera le même profil du vent tout au long de cette simulation.

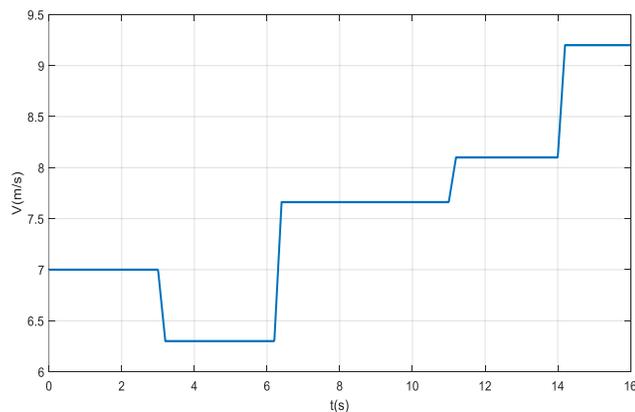
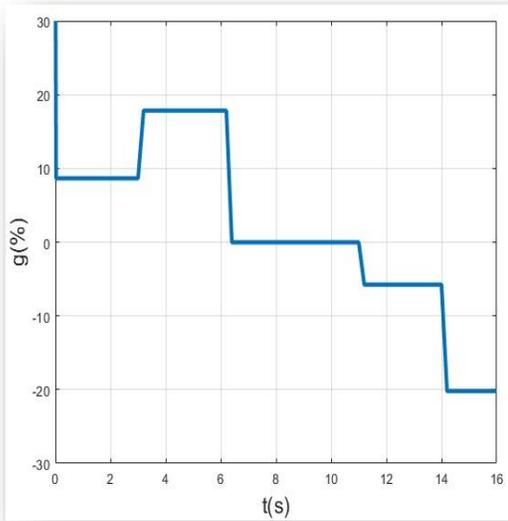


Figure III. 8 : Profil de la vitesse du vent

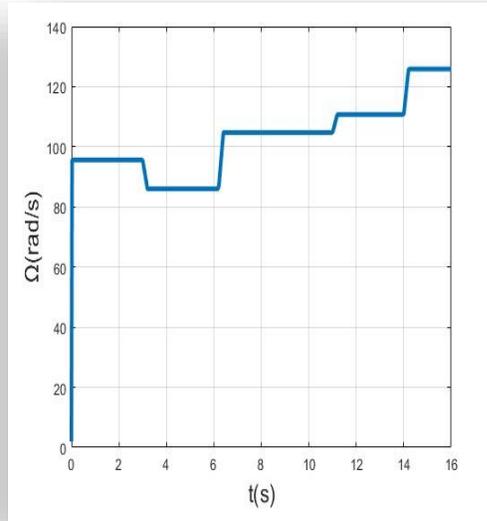
III.5.2 DTC appliquée à la MADA

- **Fonctionnement à vitesse du vent variable**

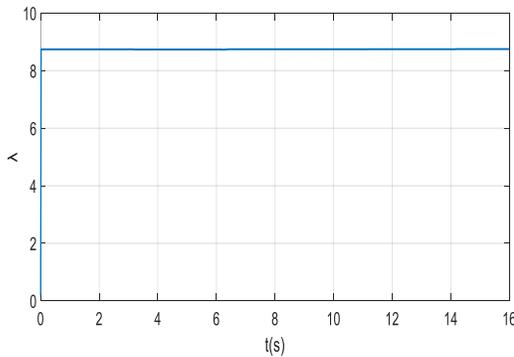
Afin de faire fonctionner notre système éolien dans la (zone II) de la figure (II.5), qui correspond au fonctionnement optimal, en vue de produire le maximum de couple (couple de référence) en fonction de la vitesse du vent.



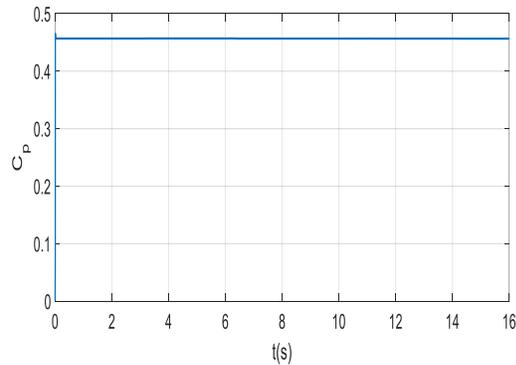
(a) *Glissement de la MADA*



(b) *Vitesse mécanique*

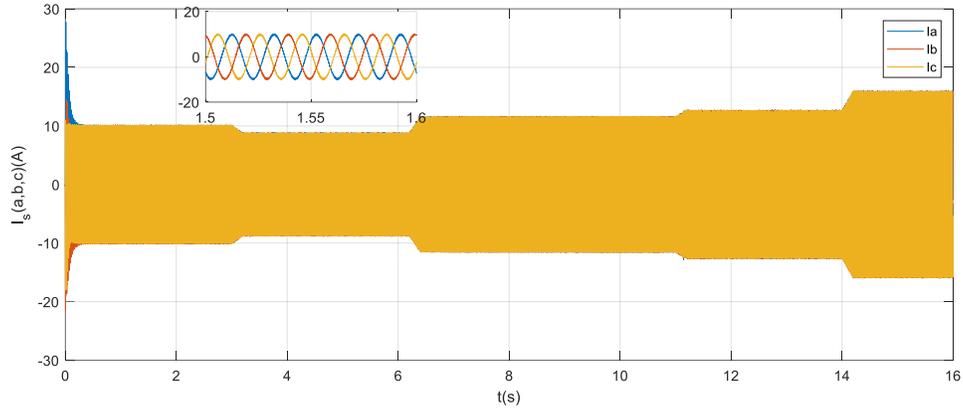


(c) *Rapport de vitesse*

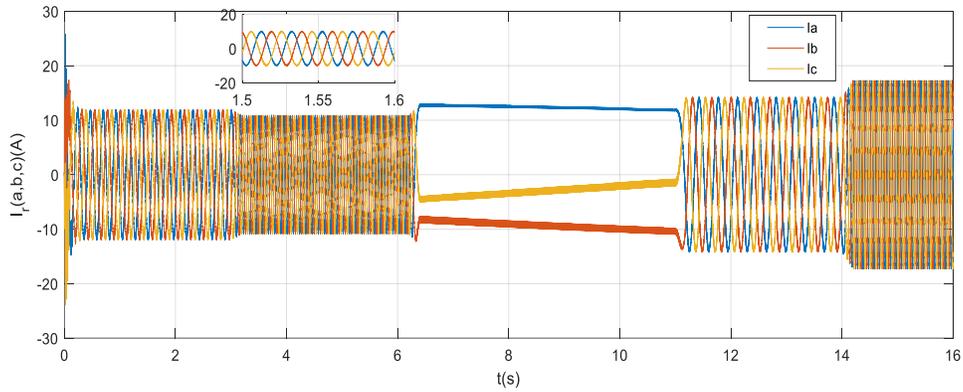


(d) *Coefficient de puissance*

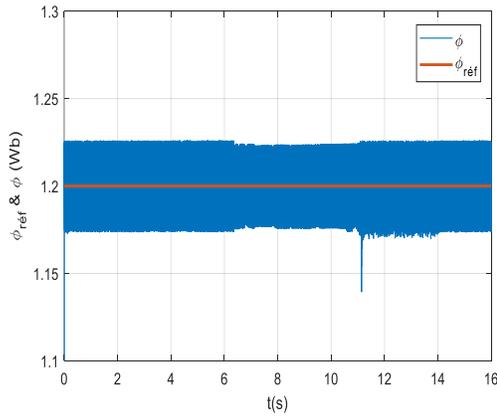
COMMANDE D'UN AEROGENERATEUR BASE SUR UNE MADA POUR EXTRAIRE LE MAXIMUM DE PUISSANCE



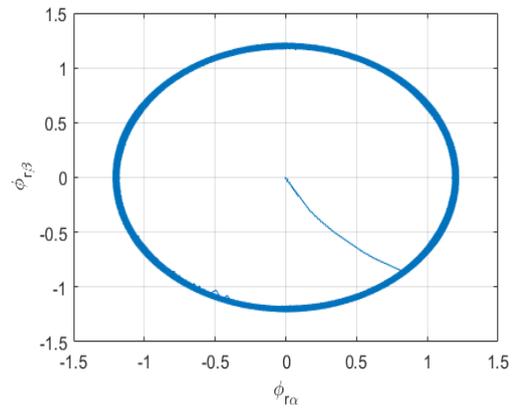
(e) Courants de phase statorique



(f) Courants de phases rotorique

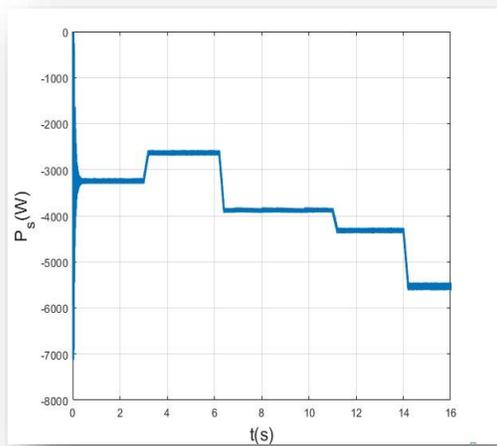


(g) Amplitude du flux rotorique et sa référence

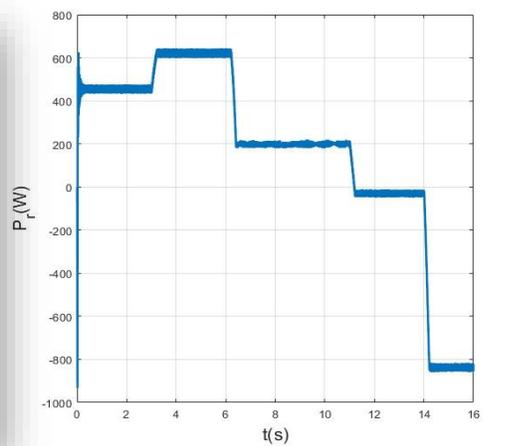


(h) Forme du flux rotorique ($\phi_{r\alpha}$ et $\phi_{r\beta}$)

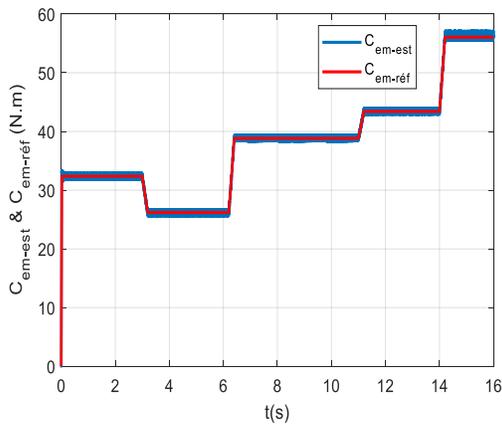
COMMANDE D'UN AEROGENERATEUR BASE SUR UNE MADA POUR EXTRAIRE LE MAXIMUM DE PUISSANCE



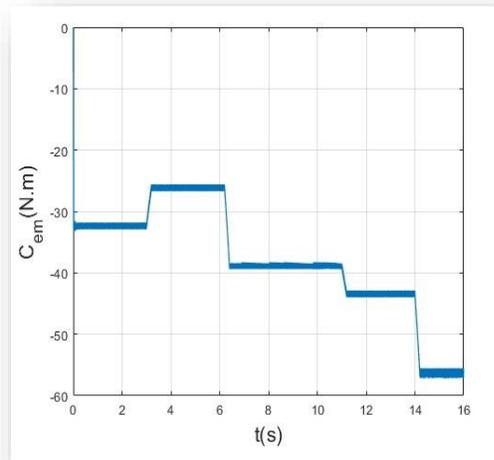
(i) Puissance active statorique



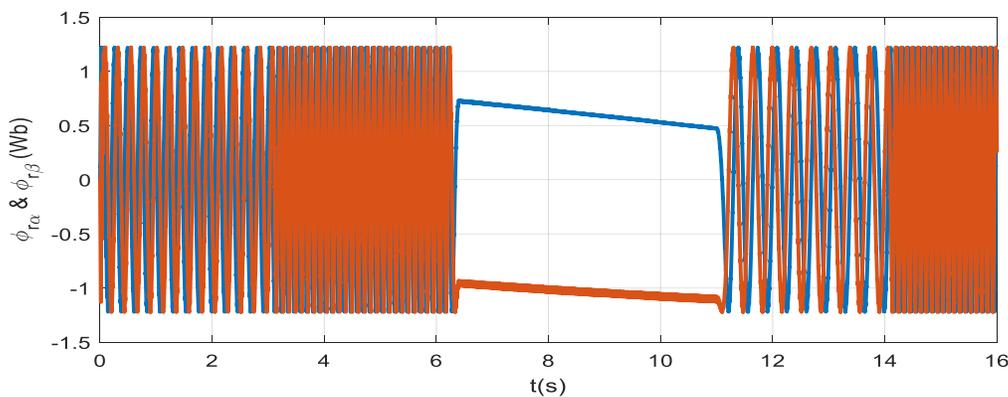
(j) Puissance active rotorique



(k) Amplitude du couple estimé et sa référence



(l) Couple électromagnétique de la MADA



(m) Évolution temporelle des flux rotorique ($\phi_{r\alpha}$ et $\phi_{r\beta}$)

Figure III. 9 : Allures des résultats

COMMANDE D'UN AEROGENERATEUR BASE SUR UNE MADA POUR EXTRAIRE LE MAXIMUM DE PUISSANCE

- **Interprétations**

Selon les résultats de simulation de la DTC, on remarque que la réponse de la vitesse de rotation de la machine et du glissement sont instantanées comme le montre les deux figures (III.9.a) et (III.9.b), ainsi que les différents modes de fonctionnement de la MADA dans les intervalles suivants :

- ✓ [0s ;6.3s] en mode hyposynchrone.
- ✓ [6.4s ;11.6s] en mode asynchrone synchronisé.
- ✓ [11.7s ;16s] en mode hypersynchrone.

Pour un fonctionnement optimal, on a fixé le rapport de vitesse optimal ($\lambda=9$) avec un coefficient de puissance maximal ($C_{p-max}=0.49$), comme l'indiquent les figures (III.9.c) et (III.9.d).

La figure (III.9.e), illustre la forme sinusoïdale des courants statoriques, pour prouver la qualité du signal injecté au réseau électrique.

La figure (III.9.f), montre que :

- ✓ Les courants rotoriques ont une forme sinusoïdale dans les deux modes hypo et hypersynchrone,
- ✓ Les courants rotoriques sont continus et constants en mode synchrone ($g=0$).

On constate que le flux rotorique est maintenu constant à sa valeur de consigne de 1.2Wb, figure (III.9.g).

La figure (III.9.h) illustre la trajectoire du vecteur flux circulaire sur le plan biphasé (α, β) par la DTC à deux niveaux, la projection de celui-ci est quasiment circulaire.

Les deux figures (III.9.i) et (III.9.j), représentent respectivement la puissance active statorique et rotorique, on peut déduire que :

- ✓ La puissance active rotorique à deux signes opposés, le signe positif indique qu'elle est absorbée et le signe négatif transmise.
- ✓ La puissance statorique est négative, vu qu'elle est fournie au réseau.

COMMANDE D'UN AEROGENERATEUR BASE SUR UNE MADA POUR EXTRAIRE LE MAXIMUM DE PUISSANCE

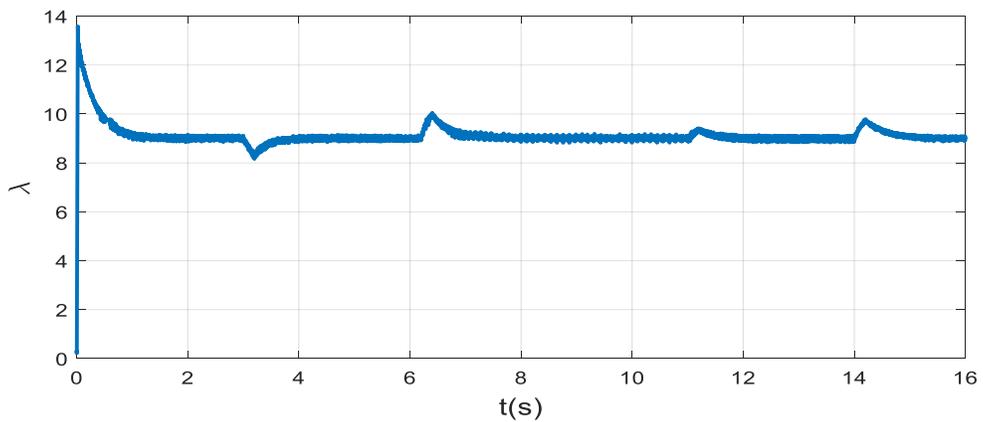
La figure (III.9.k), on constate que le couple estimé et référant se suivent parfaitement, malgré la présence des petites oscillations.

On peut observer que la réponse dynamique du couple est très rapide, ainsi vu sur la figure (III.9.l).

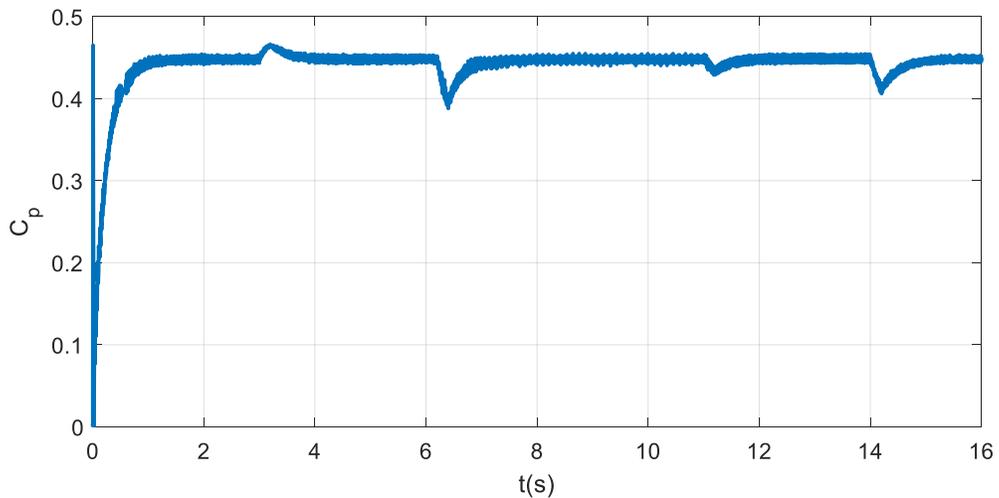
La figure (III.11.m) montre le passage du mode hyposynchronisme au mode hypersynchronisme de la vitesse de rotation de la MADA.

III.5.3 Méthode MPPT P&O

Nous avons intégré la commande P&O à notre système et on a obtenu les résultats suivants :

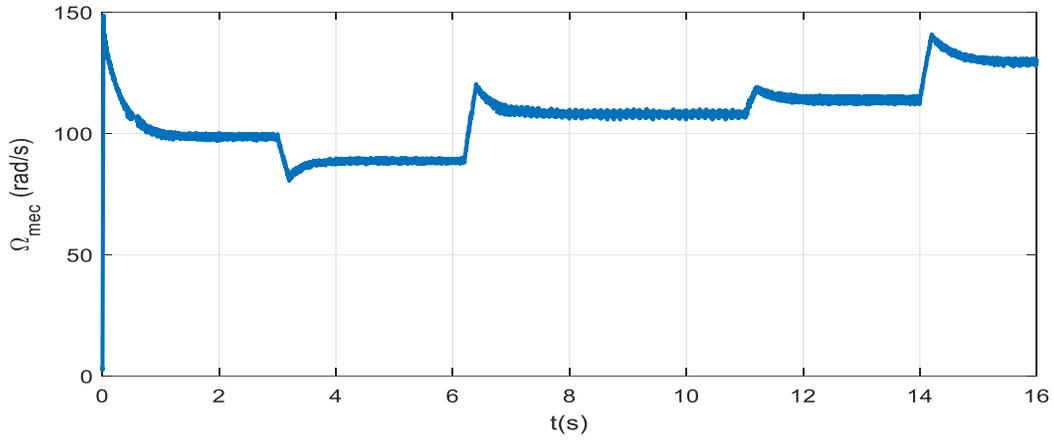


(a) Rapport de vitesse

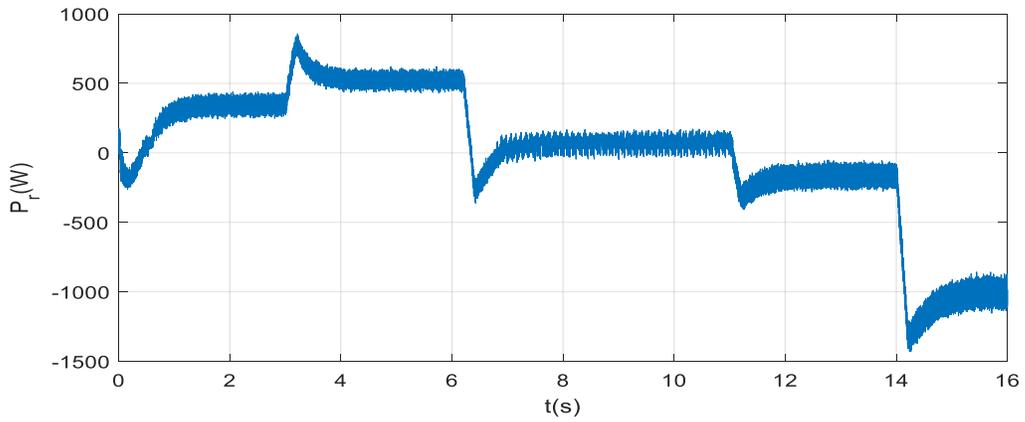


(b) Coefficient de puissance

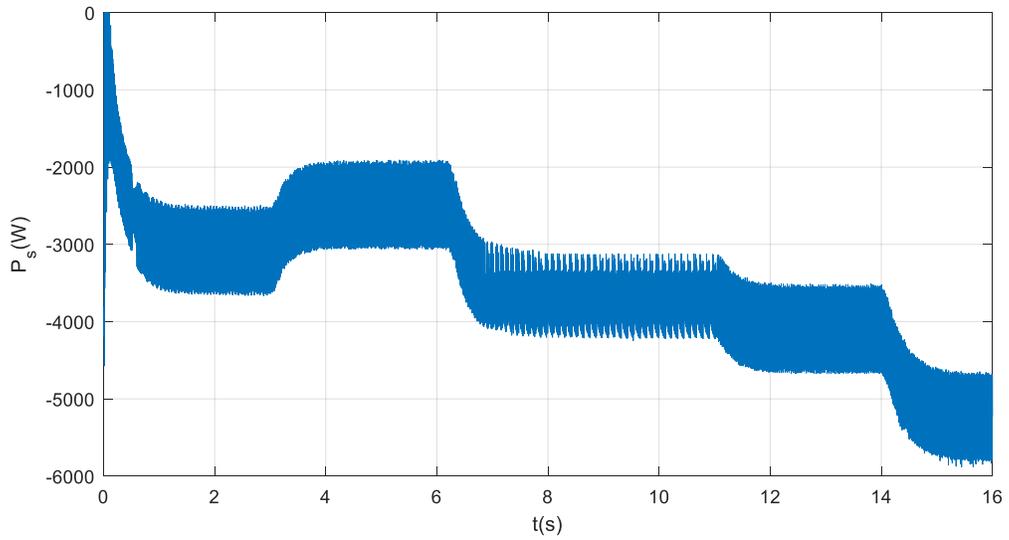
COMMANDE D'UN AEROGENERATEUR BASE SUR UNE MADA POUR EXTRAIRE LE MAXIMUM DE PUISSANCE



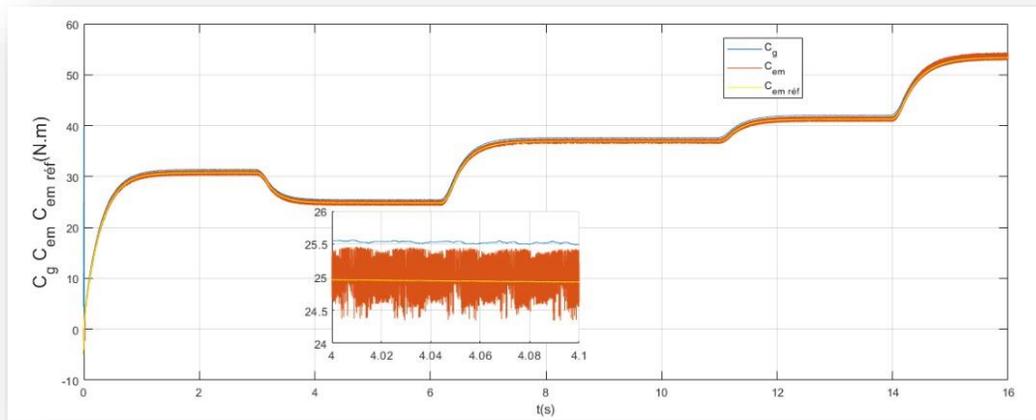
(c) Vitesse mécanique



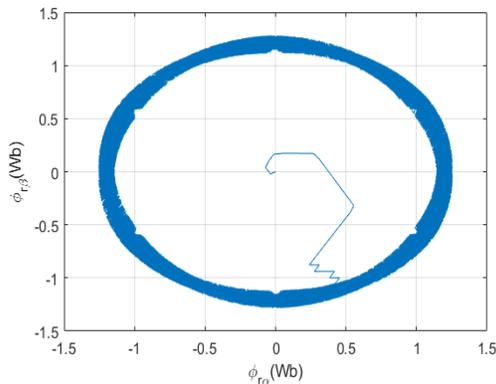
(d) Puissance active rotorique



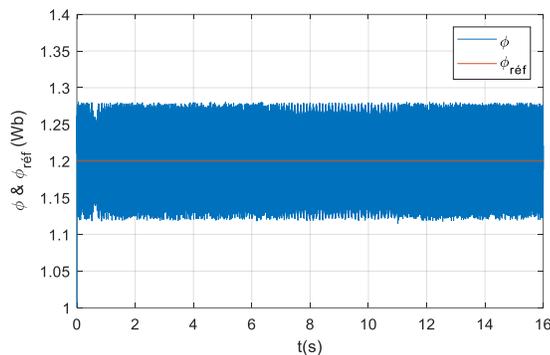
(e) Puissance active statorique



(f) Couple électromagnétique, couple issu du multiplicateur et sa référence



(g) Forme du flux rotorique ($\phi_{r\alpha}$ et $\phi_{r\beta}$)



(h) Amplitude du flux rotorique et sa référence

Figure III. 10 : Allures des résultats de P&O

- **Interprétations**

La figures (III.10.a) et (III.10.b), représente la variation du coefficient de puissance C_p et le rapport de vitesse en fonction du temps qui sont quasiment constant malgré la variation de la vitesse selon notre profil du vent.

D'après la figure (III.10.c), on voit que la vitesse mécanique suit la vitesse du vent.

Etant donné que la commande P&O se base sur les perturbations permanentes, les puissance active rotorique et statorique ne sont pas quasiment fixe

COMMANDE D'UN AEROGENERATEUR BASE SUR UNE MADA POUR EXTRAIRE LE MAXIMUM DE PUISSANCE

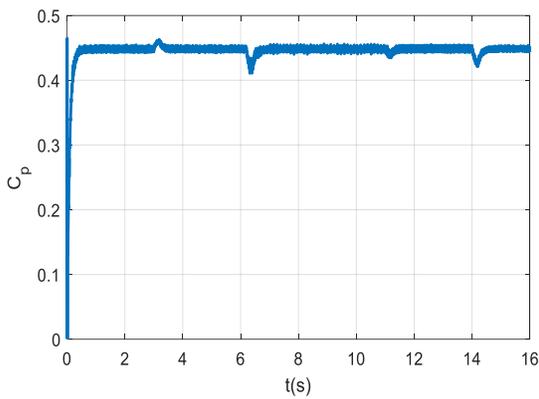
en présence de la vitesse du vent, comme le montre les deux figures (III.10.d) et (III.10.e).

Sur la figure (III.10.f), on constate que grâce à la commande P&O on obtient une superposition du couple électromagnétique de la MADA et sa référence.

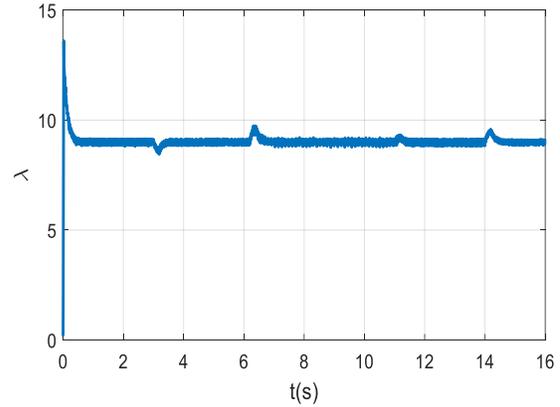
La figure (III.10.h), illustre le flux rotorique qui est maintenu constant à sa valeur de référence. La projection du vecteur flux reste quasiment circulaire figure (III.10.g).

III.5.4 Méthode MPPT FLC

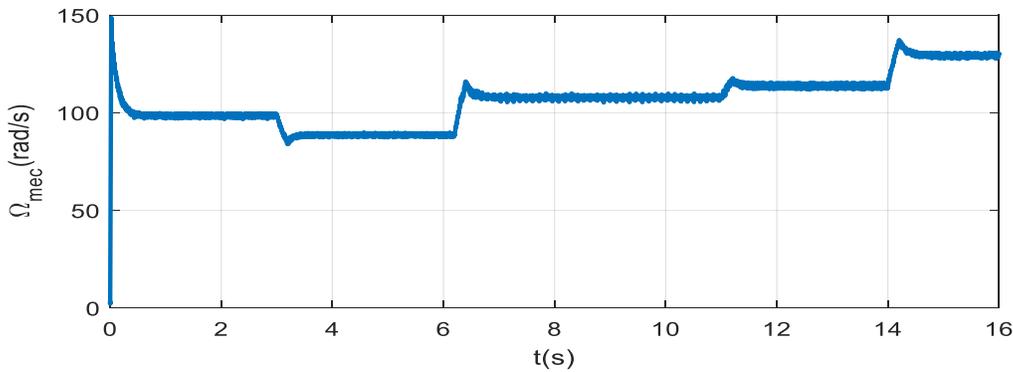
Afin d'estimer la vitesse du rotor nous avons implanté un estimateur flou, via cette méthode on a eu les résultats suivants :



(a) Coefficient de puissance

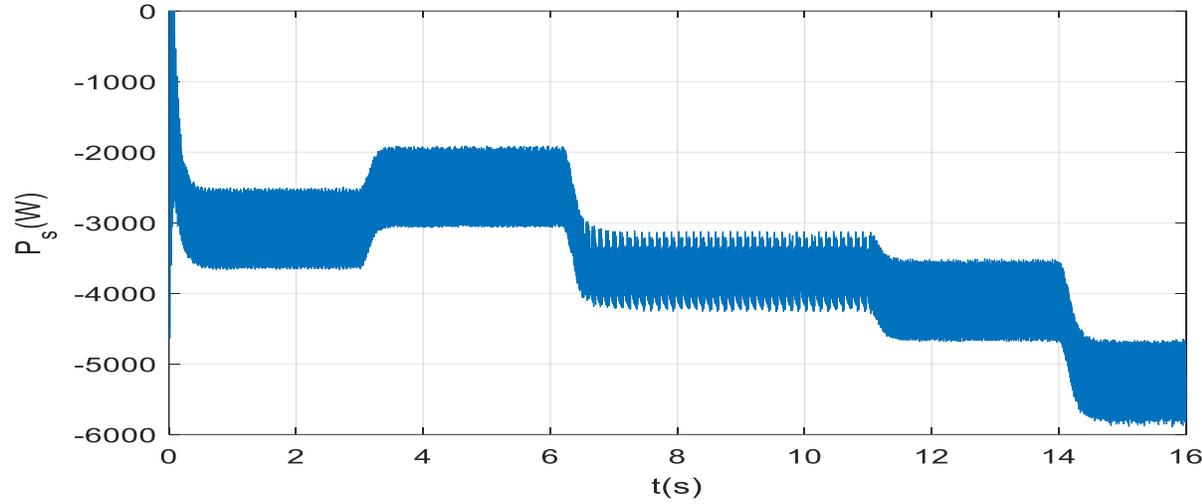


(b) Rapport de vitesse

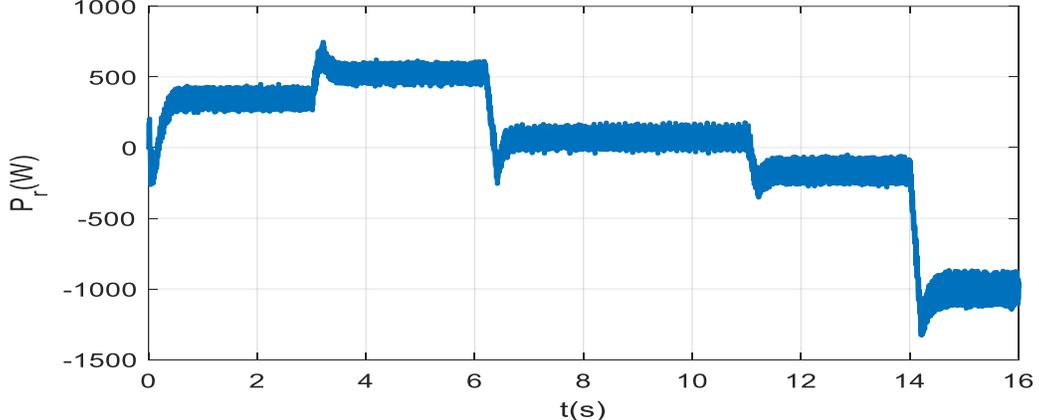


(c) Vitesse mécanique

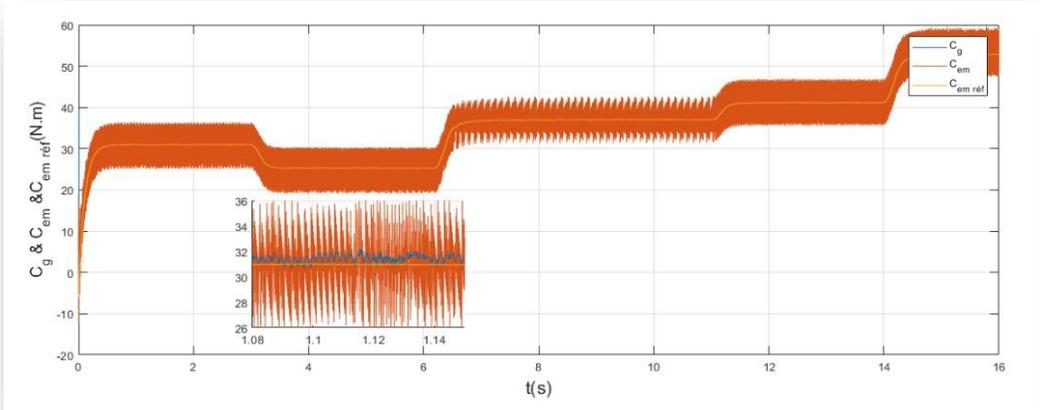
COMMANDE D'UN AEROGENERATEUR BASE SUR UNE MADA POUR EXTRAIRE LE MAXIMUM DE PUISSANCE



(d) Puissance statorique

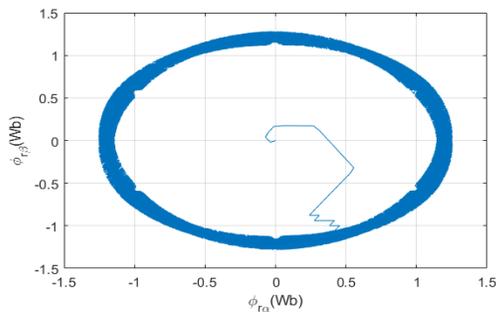


(e) Puissance active rotorique

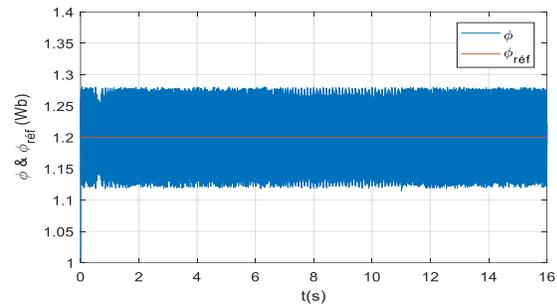


(f) Couple électromagnétique, couple issu du multiplicateur et sa référence

COMMANDE D'UN AEROGENERATEUR BASE SUR UNE MADA POUR EXTRAIRE LE MAXIMUM DE PUISSANCE



(g) *Forme de flux rotorique ($\phi_{r\alpha}$ et $\phi_{r\beta}$)*



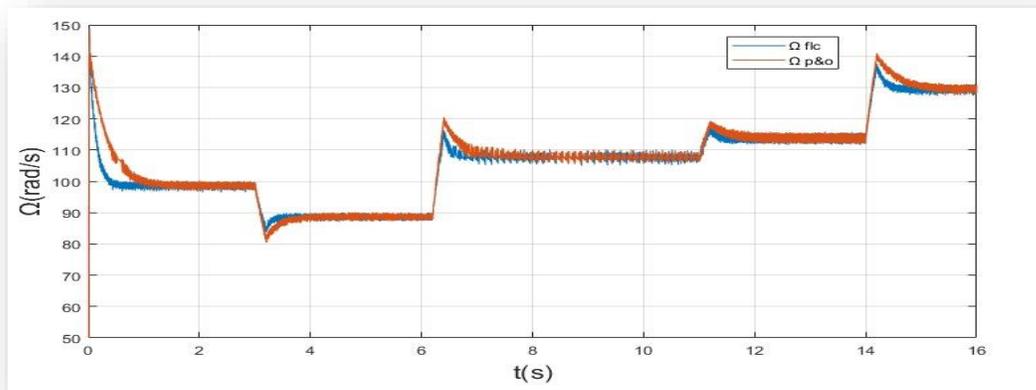
(h) *Amplitude du flux et sa référence*

Figure III. 11 : Allures des résultats de FLC

- **Interprétations**

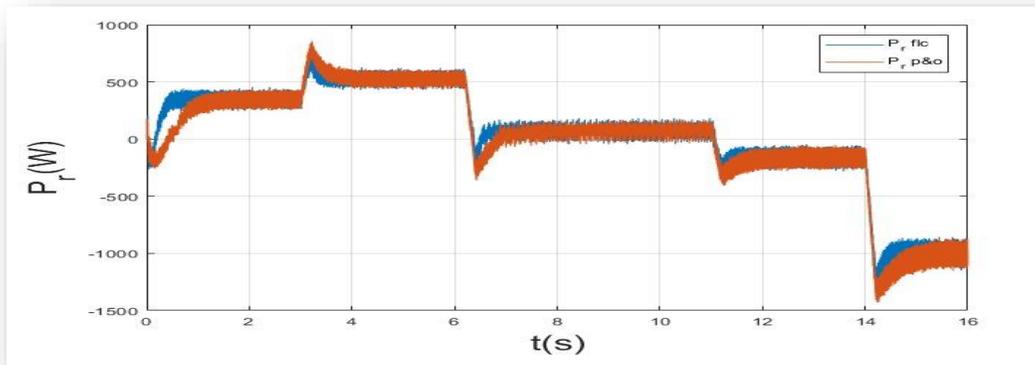
Les résultats obtenus selon la figure (III.11), qui montre différentes allures des grandeurs mesurées, ont montré une optimisation et ainsi l'efficacité du contrôleur flou vis-à-vis au comportement de la turbine éolienne.

III.5.5 Comparaison entre la méthode P&O ET FLC

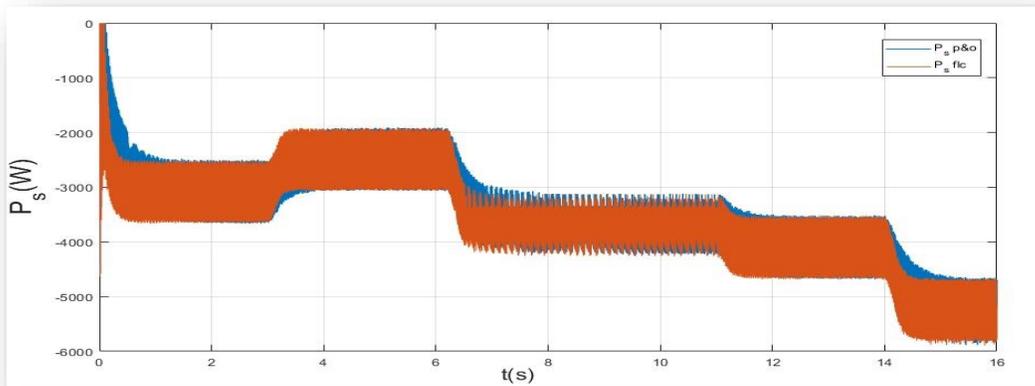


(a) *Vitesse mécanique P&O et FLC*

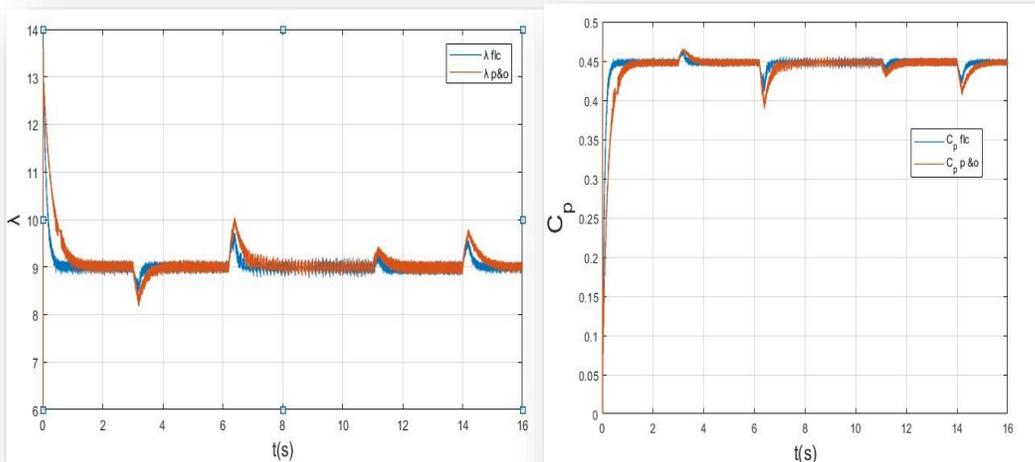
COMMANDE D'UN AEROGENERATEUR BASE SUR UNE MADA POUR EXTRAIRE LE MAXIMUM DE PUISSANCE



(b) Allure de la puissance active rotorique P&O et FLC



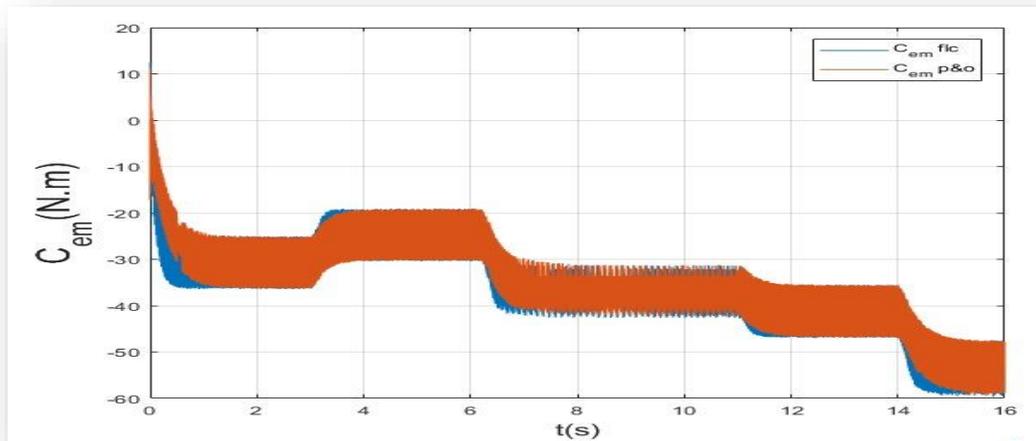
(c) Allure de la puissance active statorique P&O et FLC



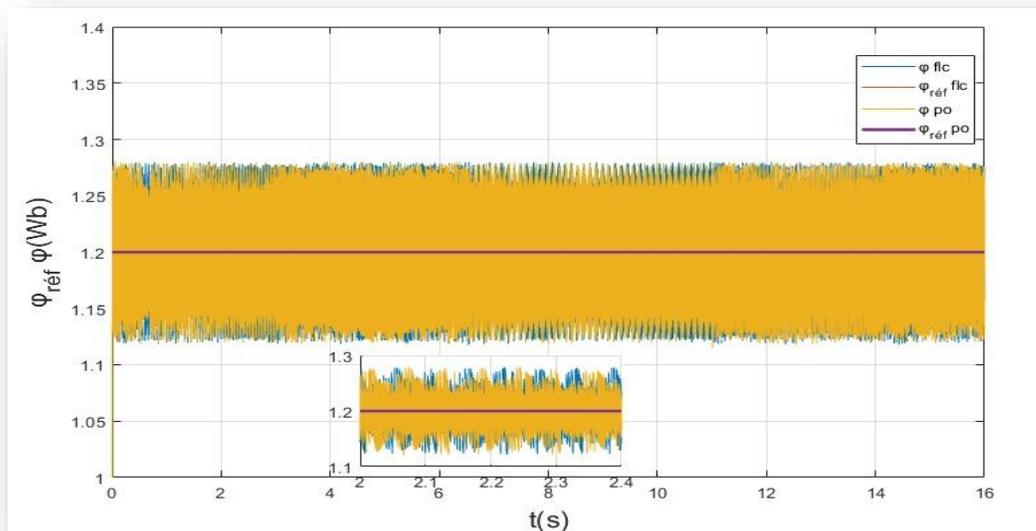
(d) Rapport de vitesse P&O et FLC

(e) Coefficient de puissance P&O et FLC

COMMANDE D'UN AEROGENERATEUR BASE SUR UNE MADA POUR EXTRAIRE LE MAXIMUM DE PUISSANCE



(f) Allure de couple électromagnétique P&O et FLC



(g) Amplitudes des flux rotoriques et leurs références P&O et FLC

Figure III. 12 : Allure de résultat de P&O et FLC

- **Interprétation**

Les résultats obtenus avec un contrôleur flou sont meilleurs que ceux obtenus avec les algorithmes de contrôle conventionnels (P&O), ce dernier a prouvé qu'il a de meilleures performances comme suit :

COMMANDE D'UN AEROGENERATEUR BASE SUR UNE MADA POUR EXTRAIRE LE MAXIMUM DE PUISSANCE

- ✓ Temps de réponse rapide.
- ✓ Petites oscillations.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principes de bases de la commande directe du couple appliquée sur une MADA avec l'utilisation de l'onduleur de type à deux niveaux.

La stratégie de commande directe du couple énoncée par Takahashi est un moyen simple à mettre en œuvre. Les grandeurs de flux rotorique et couple électromagnétique sont calculés uniquement à partir des seules grandeurs liées au rotor.

Par la suite nous avons mis en évidence les deux techniques MPPT, qui consiste à la MPPT (P&O) et la MPPT (FLC) afin de suivre la puissance maximale générée à partir d'une éolienne à vitesse variable en contrôlant la vitesse de rotation de la turbine.

Et à la fin, la simulation des différentes commandes d'un aérogénérateur par la technique DTC, on lui associant la technique MPPT (P&O et FLC) pour notre turbine, ainsi que la comparaison entre les deux techniques P&O et FLC.

On peut conclure qu'avec les deux contrôleurs on peut suivre la puissance maximale, mais la technique FLC a de meilleures performances comparées à celle de P&O. Le réglage par logique floue a surpassé le réglage par (PI) en ce qui concerne la qualité de la réponse dynamique du système et la sensibilité vis-à-vis des variations paramétriques.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail est fait, afin d'exposer l'importance de l'énergie éolienne, qui implique un savoir-faire important. En effet les technologies utilisées nécessitent des réglages extrêmement précis à réaliser sur site pour garantir une large plage de production d'énergie, de ce fait notre objectif principal dans ce travail est d'étudier et de réaliser par la simulation numérique des différentes méthodes d'extraction de puissance maximale dans un système éolien basé sur une machine asynchrone a double alimentation.

Nous avons mis en exergue les notions fondamentales nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leurs modes de fonctionnement ont été décrits. Ensuite l'analyse des machines asynchrones à double alimentation et leurs plages de fonctionnement.

Ce qui nous a permis, par la suite, de réaliser une modélisation complète et globale d'un système de conversion d'énergie éolienne. Cette modélisation se démarque principalement par l'approche différente qui a été faite de la partie mécanique qui fait appel aux calculs aérodynamiques pour déterminer les relations liant la vitesse du vent et le couple de la turbine. Tout cela a été conçu autour d'une GADA dont on a mis en évidence un modèle mathématique (hypothèses simplificatrice, équations électriques, transformation de PARK... etc.).

On outre, la commande basique de la DTC est adapter pour commander l'onduleur à deux niveaux, qui est connue par sa robustesse par rapport aux variations paramétriques de la machine asynchrone a double alimentation, cependant elle ne nécessite pas obligatoirement d'un capteur de vitesse et un bloc MLI, ainsi, elle offre un certain nombre d'avantages considérables représentés dans la simplicité de structure de son schéma synoptique de la commande et le temps de réponse des grandeurs qui est très rapide par nature, ensuite on s'est penché sur les stratégies d'optimisation et d'extraction de maximum de puissance (MPPT) est alors étalée, ensuite nous nous sommes intéressés, particulièrement à la stratégie (contrôle sans asservissement de la vitesse). Nous avons étudié dans ce travail l'apport des

techniques avancées tels que les observateurs (P&O et FLC) appliqués pour l'estimation.

Enfin, A travers les résultats de simulation, on observe des bonnes performances même en présence des variations du profil de la vitesse du vent. La poursuite en puissance est sans dépassement. Le découplage, la stabilité et la convergence vers l'équilibre sont assurés. De plus, par comparaison des deux contrôleurs P&O et FLC on est arrivé à conclure que le contrôleur FLC est mieux adapté pour l'optimisation et la poursuite du point maximum de la puissance extraite.

La qualité des résultats que nous avons obtenus est validée par ceux publiés dans la littérature.

Toutefois bien d'autres commandes méritent d'être testées. Ces commandes pourraient constituer des perspectives pour enrichir ce travail. Nous pouvons citer à titre d'exemple :

- ✓ D'autres techniques d'intelligences artificielles telles que les réseaux neuro-flous.
- ✓ L'utilisation d'un onduleur multi niveaux afin d'éliminer plus d'harmoniques.

Annexes

Annexe

1. Paramètres de la GADA

Paramètres	Valeur numérique
P_n	7.5 kW
U_n	440V
Ω_n	970tr/mn
P	3
R_s	1.02 Ω
R_r	0.8 Ω
L_r	0.0810H
L_s	0.0930H
M	0.0664H

2. Paramètres de la turbine éolienne

Paramètres	Valeur numérique
P_n	7.5 kW
Ω_n	296 tr/mn
R	3.24 m
G	5.065
C_{pmax}	0.49
λ_{opt}	9

Références bibliographiques

- [1]https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_%C3%A9olienne_au_Danemark#:~:text=Le%20Danemark%20est%20de%20loin,672%2C4%20W%2Fha.
- [2] N.Cherfia, « Conversion d'énergie produit par des générateurs éoliens », Mémoire de magister en électrotechnique en Electrotechnique l'université de Constantine, 2010.
- [3] F.Poitiers, « étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne ». Ecole polytechnique de l'Université de Nantes , Thèse Doctorat de Université De Nantes, 2003.
- [4] K.Akifet S.kentouche Contribution A La Commande En Puissance D'une Machine Asynchrone A Double Alimentation Dédiée A Une Eolienne, Alimentant Une Charge Autonome, mémoire master université de Bejaia 2012.
- [5] L. e. L.khelfat, « Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée , mémoire master Electrotechnique, juin 2017.
- [6] B.Kelkoul, « Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentatio », mémoire de magister en automatique en électronique université de TLEMCEN, 29/06/2011.
- [7] R.REDJEM., « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne » ,magistère en Electrotechnique mentouri de Constantine, 04 /07/2009.
- [8] B. Beltran, « Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur ».tése doctorat Université de Bretagne occidentale - Brest, 06/07/2010.
- [9] N.Abu-Tabak, « Stabilité dynamique des systèmes électrique multimachine : modélisation, commande,observation et simulation », Thèse doctorat, Ecole centrale de lyon., 2008.
- [10] F. Zohra, « Contribution à l'étude et à la commande d'un système éolien »,These doctorat ,Universié MohamedKhider Biskra., 13/02/2018.
- [11] S.aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de Doctorat, université des sciences et technologies de Lille, 06/12/2004.
- [12] Y.Bekakra, « Contribution à l'Etude et à la Commande Robuste d'un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation », Thèse de Doctorat , Université Mohamed Khider – Biskra, 21/10/2014.
- [13] A.Ben amar, « Etude de a Commande d'un Système Eolien Base sur une Gada », Mémoire de Magister, Université Hadj Lakhdar Batna., 24/04/2016.
- [14] F.Boumaraf, « Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle », thèse de doctorat, université de Batna, 24/06/2014.

- [15] Z.Tir, « Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade, Mémoire de Magister », Université Ferhat Abbas de sétif, 06/07/2010.
- [16] F.Merrahi, « Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne) », mémoire de magister, Ecole Nationale polytechnique, 30/06/2007.
- [17] S.Kentouche, « Contribution A La Commande En Puissance D'une Machine Asynchrone a double alimentation dediée a une eolienne, alimentant une charge autonome », Memoire de fin de cycle, Université Bejaia., 2011/2012.
- [18] A. Asma, « etude de la commande d'un systeme éolien base sur une gada »,mémoire magister université hadj lakhdar Batna, 24/04/2016.
- [19] G.Alloum, « contribution a la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation », thèse doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, 13/03/2007.
- [20] S.Breban, «supervision d'une centrale multisources basee sur l'association eolien micro hydraulique et stockage d'energie» article université technique de cluj-Napoca ,07/09/2007.
- [21] A.Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », these doctora a l'institut national polytechnique de toulouse, 15/04/2005.
- [22] M.Zegai, « Synthèses Des Techniques de Commande DTC Associe à L'intelligence Artificielle Appliquée au Contrôle D'un Moteur Asynchrone Alimenté par Onduleur Multi-Niveaux », these doctorat université de oran, 14/12/2017.
- [23] T.Houria et. N.Touti, « Comparaison entre les techniques d'extraction de puissance MPPT appliquées à une éolienne hybride », Memoire fin d'etude université kasdi merbah ouargla, 04/06/2017.