

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :
Électrotechnique
Option : énergie renouvelables en Électrotechnique

Intitulé :

MODÉLISATION ET COMMANDE DES GÉNÉRATRICES ÉOLIENNE

Présenté par :

- **Mezaina Abdelhafidh**
- **Chergui Abdelkader**
- **Bekri Akram Riyadh**

Soutenu le : 11/06/2021..... devant le Jury :

<i>M. Habchi Yassin</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Président</i>
<i>M. Khessam Medjdoub</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Encadreur</i>
<i>M. Laouar mohammed</i>	<i>MAA</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Examineur</i>

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail

À nos parents.

Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour Dont ils ne cessent de nous combler. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A nos sœurs et nos frères.

Et à tous qui prient pour nous toujours.

Nous dédions ce travail dont le grand plaisir leurs revient en premier lieu pour leurs conseils, aides, et encouragements.

Aux personnes qui nous avons toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à nos côtés, et qui nous avons accompagné durant notre chemin d'études.

A tous nos ami(e)s

A tous ceux qui nous estiment...

REMERCIEMENTS

En tout premier lieu, nous remercions le bon Dieu, tout puissant, de nous avoir donné la force et le courage pour dépasser toutes les difficultés pour réaliser et mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude, notre reconnaissance et nos vifs remerciements à Monsieur KHESSAM , notre encadreur, d'avoir accepté de diriger ce travail et pour toutes les informations et les conseils qu'il nous a donnés. La version finale de ce mémoire a bénéficié de sa lecture très attentive et de ses remarques précieuses.

Nous voudrions aussi exprimer nos sincères remerciements à tous nos chers professeurs qui ont contribué dans notre formation le long de notre parcours pédagogique.

Immense gratitude envers nos parents et nos proches qui n'ont ménagé aucun effort pour nous soutenir et encourager dans nos études.

A tous, Merci.

Résumé :

Ce travail présente l'étude de la conversion de l'énergie produite par un générateur à asynchrone à double alimentation (GADA) connecté à turbine éolienne.

Dans un premier temps, nous avons présenté l'état de l'art sur l'énergie éolienne et les systèmes de conversion utilisés (types de générateurs, configurations les plus utilisées, etc....). Ensuite, nous avons exposé les modèles mathématiques de chaque élément de l'éolienne (l'éolienne et le générateur). Ensuite nous avons évalué et examiné la méthode de contrôle vectoriel en puissance du MADA en mode générateur (la commande directe à l'aide des correcteurs PI).

On note que les résultats de la simulation montrent la fiabilité et la robustesse de cette commande qui se voit attribuer une bonne piste de puissance statorique active sa référence avec une petite erreur.

Mots clés : turbine éolienne, MADA, commande vectoriel, PI régulateur.

ملخص:

يقدم هذا العمل دراسة تحويل الطاقة التي ينتجها مولد غير متزامن ثنائي التغذية (GADA) متصل بتوربينات رياح. أولاً، قدمنا أحدث ما وصلت إليه طاقة الرياح وأنظمة التحويل المستخدمة (أنواع المولدات، التكوينات الأكثر استخدامًا، إلخ). بعد ذلك، كشفنا عن النماذج الرياضية لكل عنصر من عناصر توربينات الرياح (توربينات الرياح والمولد). ثم قمنا بتقييم وفحص طريقة التحكم في ناقل الطاقة لم MADA في وضع المولد) التحكم المباشر باستخدام مصححات (PI). يُلاحظ أن نتائج المحاكاة تُظهر موثوقية ومتانة هذا الأمر الذي يُلاحظ أنه يخصص مسارًا جيدًا لقوة الجزء الثابت ينشط مرجعها بخطأ بسيط.

الكلمات المفتاحية: توربينة الرياح، مولدة لاتزامنية مزدوجة التغذية، التحكم الشعاعي، منظم PI.

Abstract :

This work presents the study of the conversion of the energy produced by a dual-feed asynchronous generator (GADA) connected to a wind turbine.

First, we presented the state of the art on wind energy and the conversion systems used (types of generators, most used configurations, etc.). Next, we exposed the mathematical models of each element of the wind turbine (the wind turbine and the generator). Then we evaluated and examined the power vector control method of MADA in generator mode (direct control using PI correctors).

it is noted that the results of the simulation show the reliability and the robustness of this command which is seen allotting a good track of stator power activates its reference with a small error.

Keywords: wind turbine, MADA, vector control, PI regulator.

Table des matières

Liste des figures.....	
Liste des tableaux.....	
Nomenclature.....	
Introduction générale.....	
Chapitre I.....	
I.1 Introduction.....	1
I.2 Historique.....	1
I.3 La production éolienne.....	2
I.4 Définition de l'énergie éolienne.....	2
I.5 Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	3
I.6 Les différent types des turbines éoliennes.....	3
I.6.1 Eolienne à axe vertical	4
I.6.2 Eolienne à axe horizontal.....	5
a) Eoliennes lentes.....	5
b) Eoliennes rapides.....	5
I.7 Principaux composants d'une éolienne.....	6
I.8 Protection contre la corrosion.....	6
I.9 Energie cinétique du vent	6
I.10 Les avantages et inconvénient d'une éolienne.....	9
I.10.1 Avantages	9
I.10.2 Les inconvénients	10
I.11 Conclusion.....	10
Chapitre II.....	
II.1 Introduction.....	11
II.2 Machines utilisées dans le système éolien.....	11

II.2.1	Systèmes utilisant la machine synchrone	11
II.2.1.1	Alternateur synchrone à rotor bobiné ou à aimant	11
II.2.2	Systèmes utilisant la machine asynchrone.....	12
II.2.2.1	Machine asynchrone à cage d'écureuil.....	13
II.3	La machine asynchrone à double alimentation	15
II.3.1	Présentation de la machine asynchrone à double alimentation.....	15
II.3.2	Etat de l'art de la machine asynchrone à double alimentation	16
II.3.3	Fonctionnement pour application moteur	16
II.3.4	Les configurations de MADA.....	16
II.3.4.1	Première configuration	16
II.3.4.2	Deuxième configuration.....	17
II.3.4.3	Troisième configuration.....	17
II.3.5	Fonctionnement en mode générateur.....	19
II.3.6	Principe de fonctionnement de la MADA.....	19
II.3.7	Avantages et inconvénients de la MADA.....	20
II.3.7.1	Avantages de la MADA.....	20
II.3.7.2	Inconvénients de la MADA	21
II.4	Conclusion	21
Chapitre III.....		
III.1	Introduction	22
III.2	Description du système éolienne	22
III.3	Modélisation de la turbine	22
III.3.1	Equation dynamique de l'arbre	23
III.4	Schéma de simulation de bloc de la turbine.....	26
III.5	Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.....	26
III.5.1	Hypothèses simplificatrices	26
III.5.2	Représentation de la MADA dans le système triphasé (a, b, c)	28

III.5.3	Passage de triphasé au biphasé (Transformation de Park)	29
III.5.4	Application de la transformation de PARK.....	30
III.5.5	Représentation de la MADA dans un repère biphasé (dq)	31
III.6	Modèle de la machine en représentation d'état	33
III.7	Conclusion.....	34
Chapitre IV.....		
IV.1	Introduction	35
IV.2	La commande vectorielle directe	35
IV.3	Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique	35
IV.4	Stratégie de commande en puissance active et réactive de la MADA	36
IV.4.1	Relation entre courants statoriques et courants rotoriques	36
IV.4.2	Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques	37
IV.4.3	Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques	38
IV.5	Commande vectorielle de la MADA en génératrice	39
IV.5.1	Commande directe des puissances active et réactive.....	39
IV.5.2	Type et synthèse du régulateur PI.....	41
IV.6	Résultats de simulation des commandes vectorielle direct de GADA	42
IV.7	Conclusion	45
conclusion général.....		
Annexe.....		
Bibliographiques.....		

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent	2
Figure I.2 : deux types des éoliennes.....	4
Figure I.3 : éolienne à axe vertical.....	4
Figure I.4 : Eolienne lente.....	5
Figure I.5 : Eolienne rapide.....	5
Figure I.6 : tube de courant autour d'une éolienne.....	7
Figure I.7 : coefficient de puissance.....	8
Figure I.8 : coefficient de puissance pour les différents types d'éoliennes	8
Figure I.9 : Puissance mécanique disponible en fonction de la vitesse du générateur pour différentes vitesses de vent.....	9

Chapitre II

Figure II.1 : Machine synchrone à aimant à entraînement direct	12
Figure II.2 : Machine synchrone reliée au réseau par un dispositif Redresseur-Hacheur-Onduleur MLI.....	12
Figure II.3 : Caractéristique (couple /vitesse) d'une machine asynchrone à deux paire de pôles.....	14
Figure II.4 : Connexion direct d'une MAS à cage connectée au réseau	14
Figure II.5 : Eolienne connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance.....	15
Figure II.6 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.....	16
Figure II.7 : Schéma de principe de la première configuration.....	17
Figure II.8 : Schéma de principe de la deuxième configuration.....	17
Figure II.9 : Alimentation de la MADA avec deux onduleurs et un bus continu commun....	18
Figure II.10 : Alimentation de la MADA avec deux onduleurs avec deux bus continus indépendants.....	18
Figure II.11 : Alimentation de la MADA par deux cycloconvertisseurs.....	18
Figure II.12 : Alimentation de la MADA pour une application génératrice.....	19

Chapitre III

Figure III.1 : Système éolien à vitesse variable basé sur une MADA	22
Figure III.2 : Entrées – sorties du modèle de la turbine éolienne.....	22
Figure III.3 : Schéma de la turbine éolienne.....	23
Figure III.4 : Schéma de simulation de bloc de la turbine.....	24
Figure III.5 : Vitesse du vent applique à la turbine.....	25
Figure III.6 : Vitesse de l'arbre.....	25
Figure III.7 : couple électromagnétique de la MADA.....	25
Figure III.8 : Représentation de la MADA dans le système triphasé.....	26
Figure III.9 : Passage du triphasé au biphasé et l'inverse.....	29
Figure III.10 : Angles de Park des grandeurs statoriques et rotoriques.....	30
Figure III.11 : schéma du modèle de la MADA en représentation d'état.....	33

Chapitre IV

Figure IV.1 : Orientation du flux statorique.....	37
Figure IV.2 : Schéma bloc de la simulation du système à réguler	39
Figure IV.3 : Schéma bloc de la simulation de GADA avec la régulateur.....	40
Figure IV.4 : Schéma bloc de la simulation de la commande directe de la puissance active et réactive [4].....	40
Figure IV.5 : Schéma bloc d'un système régulé par un PI.....	41
Figure IV.6 : La vitesse du vent.....	42
Figure IV.7 : La vitesse mécanique.....	43
Figure IV.8 : Couple électromagnétique.....	43
Figure IV.9 : La puissance active.....	44
Figure IV.10 : La puissance réactive.....	44
Figure IV.11 : Courant rotorique sur l'axe q.....	45
Figure IV.12 : Courant rotorique sur l'axe d.....	45

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Classification des turbines éoliennes3

Chapitre II

Tableau II.1 : les avantages et les inconvénients des Machines.....15

Nomenclature

R_s : résistances statorique par phase (Ω)

R_r : résistances rotorique par phase (Ω)

L_s : Inductances propres statorique (H)

L_r : Inductances propres rotorique (H)

M_s : Inductances mutuelles entre deux phases statoriques (H)

M_r : Inductances mutuelles entre deux phases rotoriques (H)

M : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase Rotorique (H)

ψ_{sd} , ψ_{sq} : flux statoriques diphasés dans un repère tournant (Wb)

ψ_{rd} , ψ_{rq} : flux rotoriques diphasés dans un repère tournant (Wb)

I_{sd} , I_{sq} : Courants statoriques diphasés dans un repère tournant (A)

I_{rd} , I_{rq} : Courants rotoriques diphasés dans un repère tournant (A)

g : Glissement d'une machine asynchrone

f : Fréquence du réseau électrique (Hz)

C_r : Couple résistant (N.m)

ω_s : Pulsation des grandeurs statoriques (rd/s)

ω_r : Pulsation des grandeurs rotoriques (rd/s)

θ_s : Angle relatif à la pulsation statorique ω_s (rd)

θ_r : Angle relatif à la pulsation statorique ω_r (rd)

σ : Coefficient de dispersion -

P_s : Puissance active statorique (W)

Q_s : Puissance réactive statorique (VAR)

Ω : Vitesse de rotation de la machine (rd/s)

Introduction générale

L'énergie électrique est un élément crucial de tout développement socio-économique. Elle est devenu un besoin très importants que nous ne pouvons pas vivre sans.

La croissance de la demande des énergies électrique est devenue très importante vu l'ampleur de l'industrialisation de ces dernières décennies. Face à cela et avec la diminution du stock mondial en hydrocarbure et surtout la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante et destructif pour l'environnement, les pays industrialisés ont massivement fait recours aux centrales nucléaires. [1].

Face à ce dilemme, il s'avère nécessaire de faire appel à des sources d'énergie nouvelles qui seront sans conséquence pour l'homme et l'environnement. Les énergies éoliennes peuvent contribuer avec une part significative aux nouvelles sources d'énergie n'émettant pas de gaz à effet de serre [2].

Le développement des éoliennes présente un grand investissement dans le domaine de la recherche technologique. Ces systèmes qui produisent de l'énergie électrique à partir du vent peuvent constituer une alternative technologique et économique aux différentes sources d'énergies épuisables. L'énergie éolienne peut être utilisée de plusieurs manières soit par la conservation de l'énergie mécanique : le vent est alors utilisé pour faire avancer un véhicule (Navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin. Soit par la transformation en force motrice (pompage de liquides, compression de fluides, etc.). Ou encore par la production d'énergie électrique, l'éolienne est alors couplée à un générateur électrique pour débutée du courant continu ou alternatif [3].

Dans le domaine des entraînements des grandes puissances, il utilisant une machine alternative fonctionnant dans un mode un peu particulier. Il s'agit de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) et « double feed asynchrones machine » (DFAM) en Anglais [2].

Aujourd'hui, le développement et la multiplication des éoliennes ont conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. C'est dans ce cadre que le présent mémoire que nous vous présentons décrit une étude sur l'utilisation des machines MADA dans un système éolien.

Le premier chapitre est consacré à État de l'art sur l'énergie éolienne et la description générale du système éolien. Le second chapitre est consacré à la description des différents types de génératrices utilisées. Le troisième chapitre présente une étude sur la modélisation et simulation de système de conversion (turbine et la génératrice asynchrone à double alimentation) à travers les équations électriques, ainsi que des résultats obtenus par simulation.

Chapitre I

État de l'art sur l'énergie éolienne

I.1 Introduction :

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique ; d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable.

Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes.

Une éolienne doit comporter :

- un système qui permet de la contrôler électriquement (machine électrique associée à la commande).
- Un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des paliers de l'éolienne, orientation de la nacelle).

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'à l'étude de l'énergie cinétique du vent [5].

I.2 Historique [4 5] :

Durant des siècles, l'énergie éolienne a été utilisée pour fournir un travail mécanique. L'exemple le plus connu étant le moulin à vent utilisé par le meunier pour transformer le blé en farine.

Par la suite, pendant plusieurs décennies, l'énergie éolienne a servi à produire de l'énergie électrique dans des endroits reculés et donc non-connectés à un réseau électrique. La maîtrise du stockage d'énergie par batteries a permis de stocker cette énergie et ainsi de l'utiliser sans présence de vent, ce type d'installation ne concernant que des besoins domestiques, non appliqués à l'industrie.

L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pu être « redécouverte » et de nouveau utilisée (dans les années 40 au Danemark 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde.

En 2019, près de 60,4 GW de capacités éoliennes ont été installées dans le monde (dont 6,1 GW offshore), soit 19% de plus qu'en 2018 (50,7 GW). Il s'agit de « *la deuxième meilleure année* » de développement dans l'histoire de la filière¹. Au total, la puissance installée du parc éolien mondial atteignait 651 GW à fin 2019.

Ces données de puissance doivent être rapportées à la production d'électricité associée. Selon le GWEC, le parc éolien mondial a généré 1 390 TWh en 2019. Cette production équivaldrait ainsi à près de 5,8% de la consommation annuelle d'électricité dans le monde.

I.3 La production éolienne :

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est directement lié à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps été oublié, cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, connaît depuis environ 30 ans un développement sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers [5].

I.4 Définition de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne désigne l'énergie cinétique véhiculée par les masses d'air, c'est-à-dire par les vents, autour de notre planète.

Une éolienne est une machine permettant de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de type éolienne. Cette énergie mécanique éolienne a été utilisée au cours des âges pour pomper l'eau ou moulinier le grain. Les machines actuelles sont utilisées pour produire de l'électricité de type éolienne, (Figure I.1),

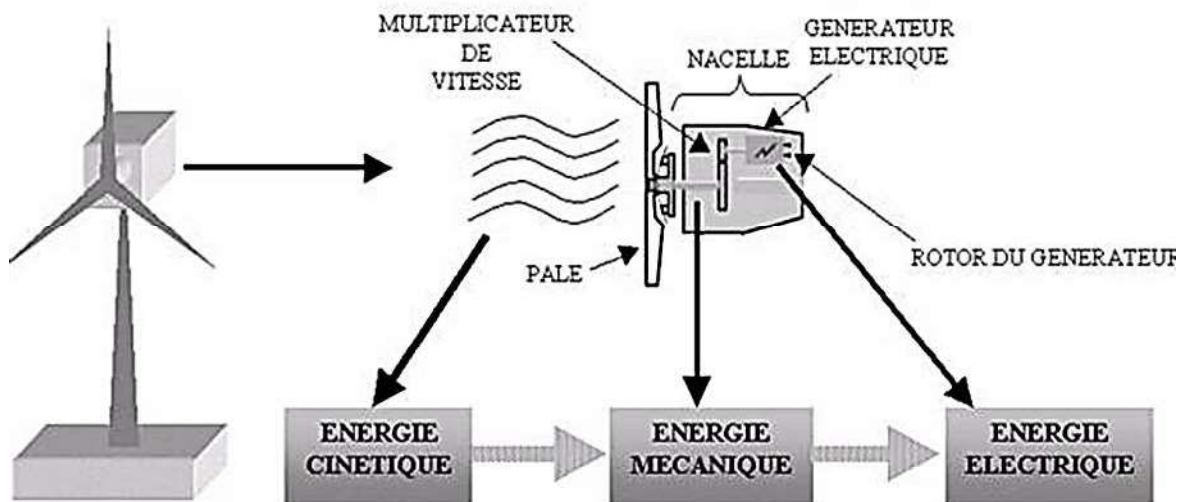


Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [6]

I.5 Principe de fonctionnement d'une éolienne :

Le vent, une des premières ressources naturelles, utilisée pour faciliter la vie au quotidien de l'homme. Maîtriser la force du vent, permet aujourd'hui de produire de l'électricité, grâce à l'énergie éolienne.

Le principe est le même que celui d'une bonne dynamo de vélo. Les pâles, elles-mêmes couplées à un rotor et à une génératrice, tournent grâce au vent et entraînent la génératrice qui produit l'électricité. L'éolienne est donc ni plus ni moins qu'un aérogénérateur, s'inspirant du procédé des moulins à vent.

L'éolienne est généralement composée de trois pales, qui sont portées par un rotor et fixées en haut d'un mat. C'est un moteur électrique qui permettra d'orienter les pales de manière à ce qu'elles se trouvent continuellement face au vent.

Le mouvement des pales transforme l'énergie cinétique (énergie que possède un corps par son mouvement et s'exprime en joule) du vent en énergie mécanique (quantité d'énergie emmagasinée). La vitesse de rotation se trouve être en fonction de la taille des pales. Plus les pales sont petites et plus elles tournent rapidement. En moyenne on peut dire qu'elles tournent entre 10 et 25 tours/minutes.

Le rôle du générateur est ensuite de transformer cette énergie mécanique, en énergie électrique pour les besoins de l'homme. Les besoins d'un générateur sont d'environ 1000 à 2000 tours/minutes afin de produire une quantité d'électricité idéale. C'est la raison pour laquelle un multiplicateur est utilisé afin d'accélérer le mouvement des pales [7].

I.6 Les différents types des turbines éoliennes :

Le tableau ci-dessous présente une classification des turbines :

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12m	Moins de 40 KW
Moyenne	12m à 45m	De 40kW à 1Mw
Grand	46m et plus	1Mw et plus

Tableau I.1 : Classification des turbines éoliennes [8].

Les turbines éoliennes sont classées selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux types de Turbines éoliennes :

- Turbines à axe vertical.
- Turbines à axe horizontal.

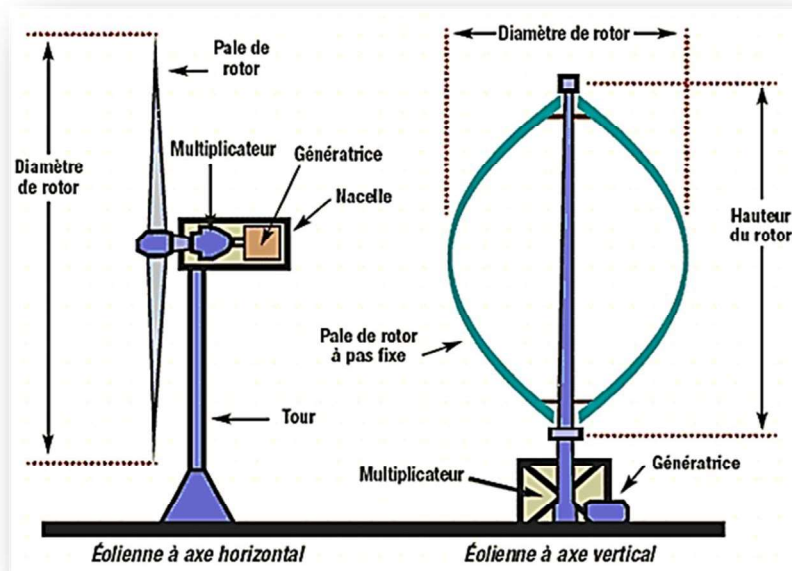


Figure I.2: deux types des éoliennes [9]

I.6.1 Éolienne à axe vertical [7]:

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol ce qui facilite l'accessibilité de dépannage en cas de dysfonctionnement.

Néanmoins, elles restent marginales et peu utilisées voir abandonnées actuellement à cause de sa faible vitesse, des turbulences qui affectent le capteur d'énergie situé au près du sol, et de la surface importante qu'elles occupent au sol pour les éoliennes de grande puissance.

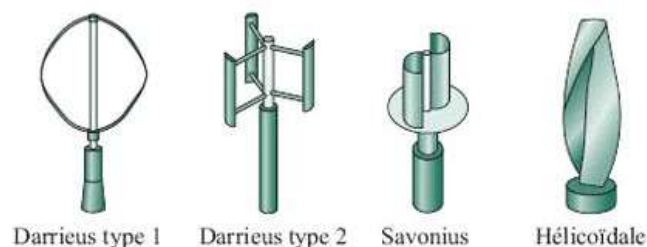


Figure I.3 : éolienne à axe vertical

I.6.2 Eolienne à axe horizontal [7]:

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion ces éoliennes peuvent être classifiées en deux catégories :



Figure I.4: Eolienne lente [5]



Figure I.5: Eolienne rapide [10]

a) Eoliennes lentes :

sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40). Les pales couvrent presque toute la surface de la roue.

Elles servent généralement au pompage pour alimenter en eau le bétail dans les vastes plaines, elles sont adaptées aux vents de faible vitesse.

La puissance maximale obtenue par ce type de machine peut se calculer en fonction du diamètre par l'expression suivante :

$$P = 0.15 D^2 V^3 \quad (\text{I} - 1)$$

La puissance étant exprimée en Watts, le diamètre en mètre et la vitesse du vent en m/s.

b) Eoliennes rapides :

Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement.

Formule pratique pour une éolienne rapide à axe horizontal :

$$P = 0.2 D^2 V^3 \quad (\text{I} - 2)$$

I.7 Principaux composants d'une éolienne :

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux (figure 1.4) :

- **Le mât** : Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique qui supporte la nacelle est le rotor de la turbine. Il est important qu'il soit assez élevé (40 à 60 m de hauteur pour une éolienne de 500 kW) pour exploiter les vents les plus forts en altitude. A l'intérieure de ceux-ci se trouve une échelle qui permet d'accéder à la nacelle pour l'entretien
- **Les pales** : 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
- **La nacelle** : Elle rassemble tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres, multiplicateur, roulement, le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone, les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent).

I.8 Protection contre la corrosion :

Les différentes parties de l'éolienne sont protégées contre la corrosion par un revêtement spécial à plusieurs couches. Les éléments particulièrement exposés aux intempéries, comme par exemple le moyeu du rotor, sont galvanisés.

I.9 Energie cinétique du vent :

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passent par la surface active S de la voilure [11].

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure 1.5 sur lequel on a représenté la vitesse du V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval 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 :

$$\frac{V_1 + V_2}{2} \quad (I - 3)$$

la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est :

$$m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)}{2} \quad (I - 4)$$

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

$$Pm = \frac{m (V_1^2 - V_2^2)}{2} \tag{I - 5}$$

Soit en remplaçant m par son expression :

$$Pm = \frac{\rho S (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \tag{I - 6}$$

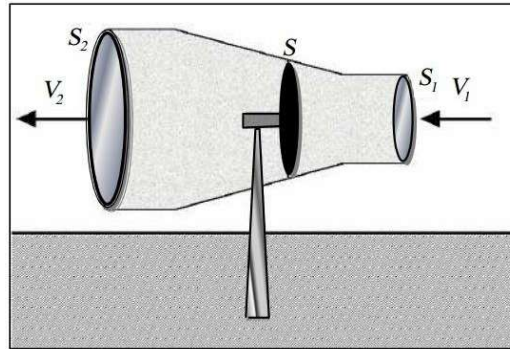


Figure I.6: tube de courant autour d'une éolienne

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

$$Pmt = \frac{\rho S V_1^3}{2} \tag{I - 7}$$

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

$$\frac{Pm}{Pmt} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right)\left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \tag{I - 8}$$

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 de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

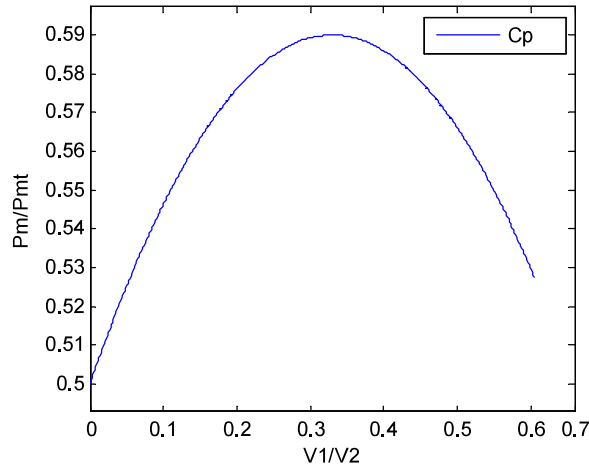


Figure I.7: coefficient de puissance

La figure 1.7 donne un aperçu sur les coefficients de puissance C_p habituels en fonction de la vitesse réduite λ pour différents types d'éoliennes.

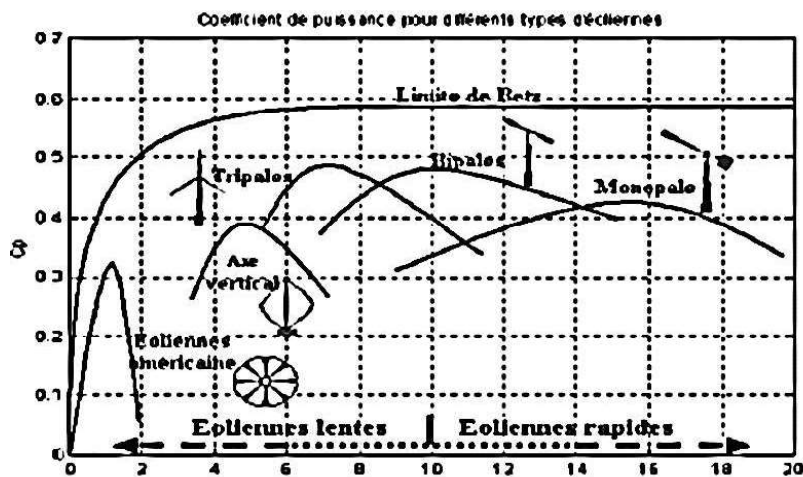


Figure I.8: coefficient de puissance pour les différents types d'éoliennes [11]

Selon la loi de Betz, la puissance maximale est :

$$P_{max} = \frac{16}{27} P_{mt} = 0.59 P_{mt} \tag{I-9}$$

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde ; de cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini [11] :

$$C_p^{opt} = \frac{P_{max}}{P_{mt}} = \frac{2P_{max}}{\rho S V_1^3} = 0.59 \tag{I-10}$$

En combinant les équations (I - 4), (I - 7) et (I - 8) , la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} P_{mt} = C_p P_{mt} = \frac{1}{2} C_p (\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (I - 11)$$

Figure I.9 présente la puissance mécanique disponible en fonction de la vitesse du générateur pour différentes vitesses de vent

Avec :

$$\lambda = \frac{R\Omega_1}{v_1} \quad (I - 12)$$

Ω_1 : Vitesse de rotation avant multiplicateur de vitesse K

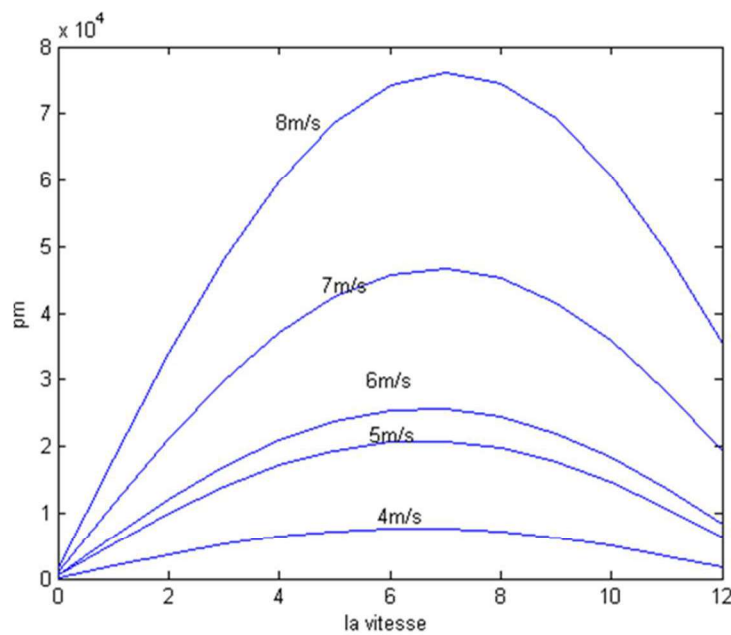


Figure I.9: Puissance mécanique disponible en fonction de la vitesse du générateur pour différentes vitesses de vent [11].

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

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_2 R}{K V_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (I - 13)$$

Avec Ω_2 : vitesse de rotation après multiplicateur .

I.10 Les avantages et inconvénient d'une éolienne :

I.10.1 Avantages :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou

radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.

- L'énergie éolienne est l'une des sources de production d'électricité permettant de parvenir à un coût relativement faible pour réalisation des objectifs que s'est fixée par exemple l'Union Européenne pour 2020 : 20% d'énergies renouvelables (éolienne et autres) dans la consommation globale d'énergie.
- L'électricité éolienne garantit une sécurité d'approvisionnement face à la variabilité des prix du baril de pétrole (dans le contexte des pays de lowispthere nord).

I.10.2 Les inconvénients [12][13] :

- L'électricité éolienne est une énergie intermittente, l'énergie éolienne ne suffit pas en elle-même à définir une politique énergétique et environnementale.
- L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement
- Le coût de l'énergie éolienne plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie.
- Le vent est une source intermittente, la production d'énergie est donc variable.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques.

I.11 Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté le principe de fonctionnement des éoliennes, leurs constitutions et leurs différents types. Après quoi, on a présenté les principaux composants d'une éolienne. En fin de ce chapitre, on a présenté leurs avantages et inconvénients.

Dans la deuxième chapitre, nous présenterons quelques machines électriques dans éolienne pour générer de l'énergie électrique, avec les avantages et les inconvénients de chacun d'entre eux mentionnés.

Chapitre II

les types des machines

II.1 Introduction :

La génératrice est un dispositif qui convertit la puissance motrice (énergie mécanique) en énergie électrique pour une utilisation dans un circuit externe. Les sources d'énergie mécanique comprennent les turbines à vapeur, les turbines à gaz, les turbines à eau, les moteurs à combustion interne, les éoliennes et même les manivelles.

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux différents types de machines électrique associé aux éoliennes.

Enfin, nous présenterons une étude générale sur la MADA, ses applications et ses variantes fonctionnement et ses avantages et ses inconvénients.

II.2 Machines utilisées dans le système éolien :

II.2.1 Systèmes utilisant la machine synchrone :

II.2.1.1 Alternateur synchrone à rotor bobiné ou à aimant :

C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grandes puissances (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones de 500 kW à 2 MW utilisés dans le domaine éolien, sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille.

De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite.

C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés du réseau ; elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance qui permettent la construction d'une onde sinusoïdale parfaite et aussi la gestion de la qualité d'énergie.

Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplés. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance.

Certaines variantes des machines synchrones peuvent fonctionner à de faibles vitesses de rotation et donc être directement couplée à l'aéroturbine. Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur, élément présent sur la plupart des aérogénérateurs et du système bagues balais pour les génératrices à aimants (Figure II.1). ainsi on minimise le travail de maintenance .

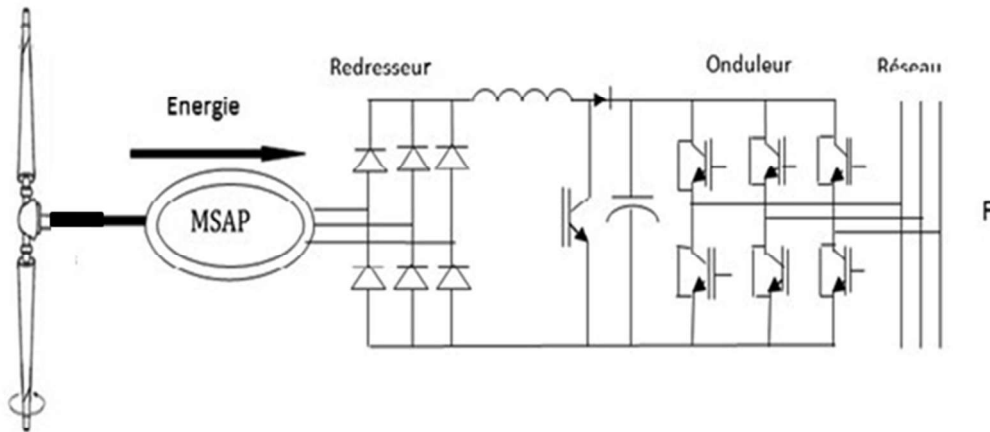


Figure II.1 : Machine synchrone à aimant à entraînement directe [14].

Il existe une autre configuration classique d'interface de connexion d'une machine synchrone au réseau.

Le convertisseur connecté au stator de la machine est un simple redresseur suivi d'un hacheur élévateur permettant de délivrer une tension suffisante à l'onduleur MLI pour les faibles vitesses de rotation. La présence de l'onduleur permet de contrôler le facteur de puissance coté réseau. Ces convertisseurs sont toutefois dimensionnés pour la totalité de la puissance nominale de la machine et entraînent jusqu'à 3% de cette puissance en perte. (Figure II.2)

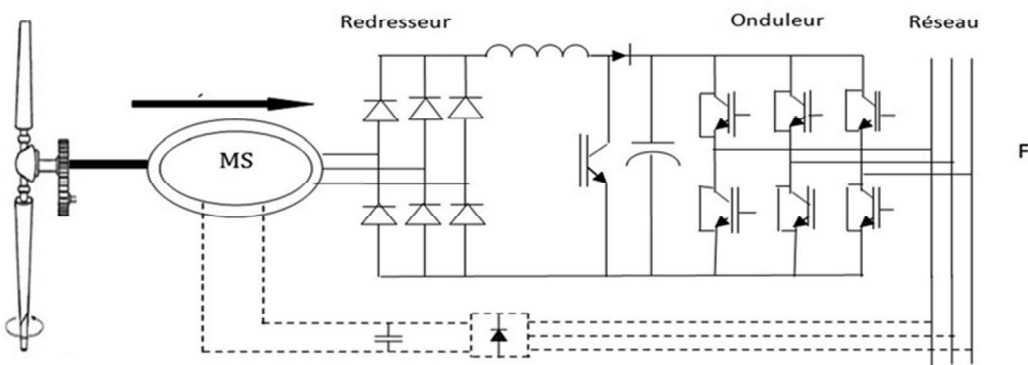


Figure II.2 : Machine synchrone reliée au réseau par un dispositif Redresseur-Hacheur-Onduleur MLI.

II.2.2 Systèmes utilisant la machine asynchrone :

La connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor.

Ceci explique pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction.

Il existe deux catégories de machine asynchrone: les machines asynchrones à cage d'écureuil et les machines asynchrones à rotor bobiné.

II.2.2.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil :

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde.

Ainsi pour les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Or il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct, il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse.

La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais et collecteur ou de contacts glissants sur des bagues, la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne.

A titre d'exemple, la caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la (Figure II.3).

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point $g=0$), dans le cas de la caractéristique suivant

(Figure II.3), la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 tr/min.

Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau (Figure II.3).

La machine à un nombre de pair de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important, les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs.

La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine.

Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau, celui-ci peut être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités

représentées sur la (Figure II.4). qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne [14].

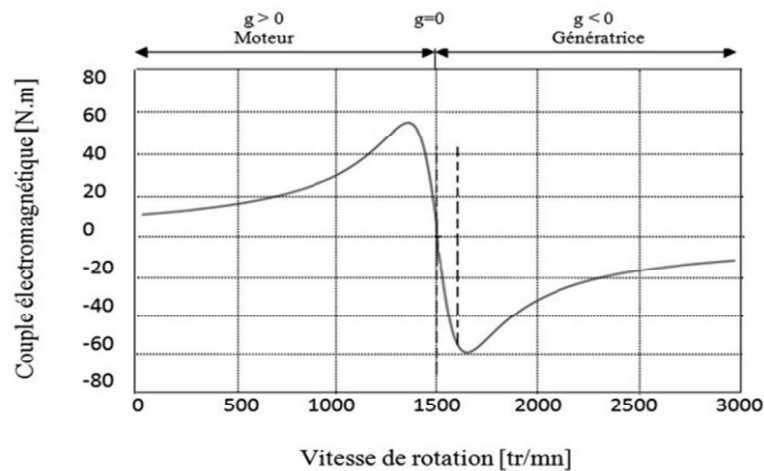


Figure II.3 : Caractéristique (couple /vitesse) d'une machine asynchrone à deux paires de pôles.

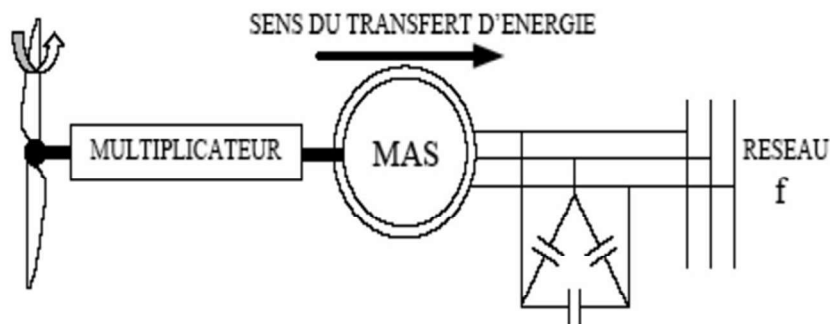


Figure II.4 : Connexion directe d'une MAS à cage connectée au réseau [14].

Une autre solution consiste à utiliser la génératrice asynchrone triphasée car la connexion de l'éolienne au réseau se fait par l'intermédiaire d'un dispositif électronique de puissance (Figure II.5).

L'éolienne fonctionne à vitesse variable, le générateur produit un courant alternatif de fréquence variable. L'emploi de deux convertisseurs de puissance permet de découpler la fréquence du réseau de la fréquence variable des courants de la machine par création d'un bus continu intermédiaire.

Avec une telle structure, les basculements rapides de la puissance générée peuvent être filtrés par le condensateur en autorisant une variation de la tension du bus continu sur une plage donnée. Les différents inconvénients de ce système sont le coût, la fiabilité de l'électronique de puissance et les pertes dans les convertisseurs de puissance. Ces convertisseurs sont dimensionnés pour 100% de la puissance nominale de la génératrice, ceci augmente significativement le coût de l'installation et les pertes. Une étude économique approfondie est nécessaire avant d'adopter ce type d'installation.

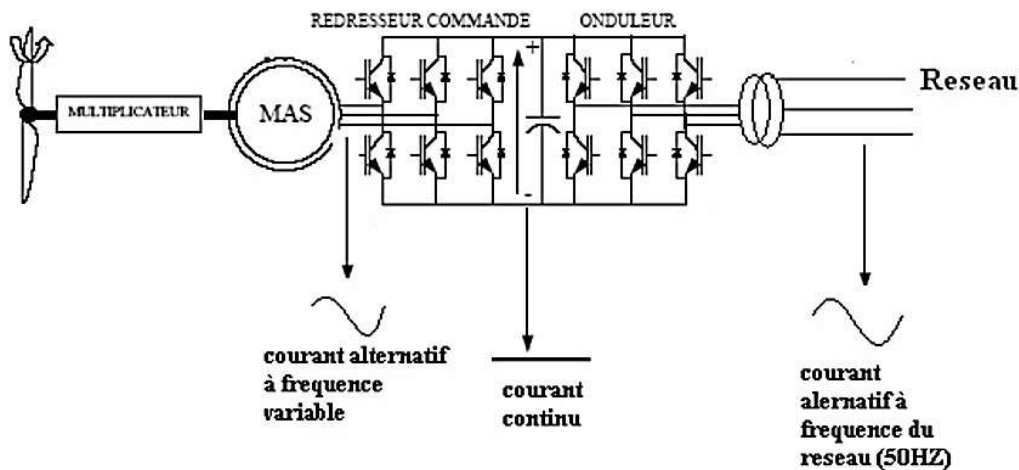


Figure II.5 : Eolienne connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance.

Malgré sa simplicité et ses qualités de robustesse et son coût, la machine asynchrone à cage reste uniquement pour l'utilisation dans un système éolien, lorsqu'elle est directement connectée

au réseau, la vitesse de rotation doit rester pratiquement constante de façon à ce que la machine reste proche de la vitesse de synchronisme.

Dans le tableau suivant, nous résumerons les avantages et les inconvénients des Machines mentionnés précédemment :

Type de machine	Avantages	Inconvénients
Machine asynchrone à cage d'écureuil	Fabrication maîtrisée, puissance massive élevée, moteur robuste	Rendement faible, faible couple de démarrage, Commande complexe
Machine asynchrone	Technologie devenue courante. puissance massive élevée, très bon rendement,	Ondulations de couple, cout des aimants. technologie couteuse.

Tableau II.1 : les avantages et les inconvénients des Machines.

II.3 La machine asynchrone à double alimentation :

II.3.1 Présentation de la machine asynchrone à double alimentation :

La MADA possède un stator analogue à celui des machines triphasées classiques. Il est constitué, le plus souvent, de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements [15] . L'originalité de cette machine est que le rotor n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écureuil mais d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques. Il est donc constitué de trois bobinages

connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices (voir la Figure II.6) sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne.

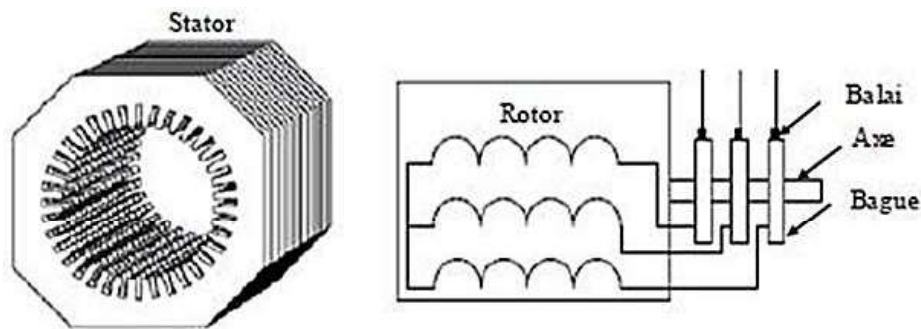


Figure II.6 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA .

Ce type de machines nécessite une seule source d'alimentation pour être alimenté. Ceci constitue un avantage principal au vue de la construction surtout dans les applications à vitesse variable, où le glissement de la MADA peut être contrôlé par l'association des convertisseurs de puissance du coté statorique ou rotorique ou bien des deux à la fois [16].

La structure de la MADA lui 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 éventuellement être résumé par le terme de : "machine synchrone à excitation alternative" [17].

II.3.2 Etat de l'art de la machine asynchrone à double alimentation :

De nos jours, plusieurs travaux ont été orientés vers l'étude de la machine asynchrone à double alimentation en tant que génératrice pour les énergies renouvelables ou en tant que moteur pour certaines applications industrielles [16] [17] [18] [19].

II.3.3 Fonctionnement pour application moteur :

Pour le cas de fonctionnement moteur, les principales études ont été dédiées aux stratégies de commande linéaires et non linéaires avec et sans capteur de vitesse ou de position [20]. Pour ces types d'applications, le rotor est alimenté par un convertisseur statique et le stator est connecté directement à un réseau triphasé (Figure II.7). Les travaux que nous avons consultés en bibliographie attestent que cette machine présente en fonctionnement moteur de bonnes performances.

II.3.4 Les configurations de MADA :

II.3.4.1 Première configuration :

Cette classe est dite MADA simple [21] . Le rotor a son propre alimentation à travers un onduleur tandis que le stator est connecté à un réseau triphasé. La (Figure II.7) montre le schéma de principe de cette configuration.

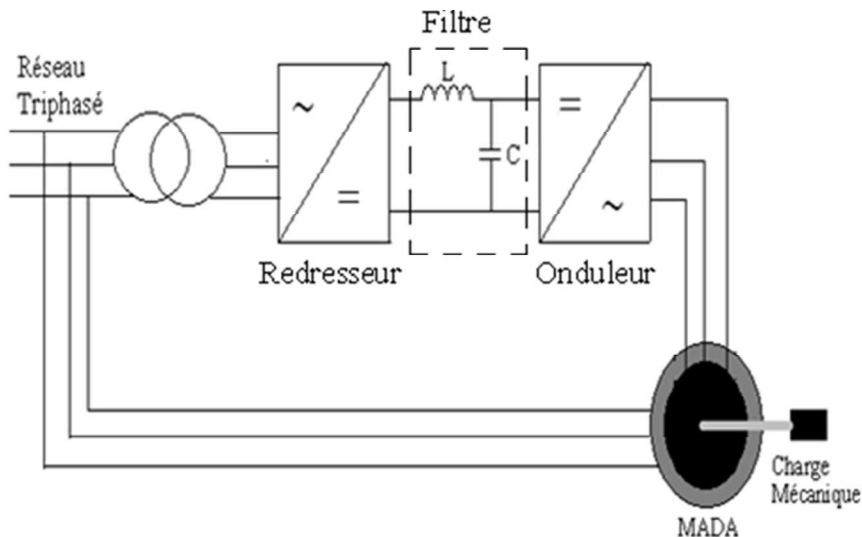


Figure II.7 : Schéma de principe de la première configuration .

II.3.4.2 Deuxième configuration

Les enroulements statoriques sont connectés à un réseau triphasé fixe tandis que le rotor est relié à un cycloconvertisseur. La (Figure II.8) représente un schéma de principe de cette configuration.

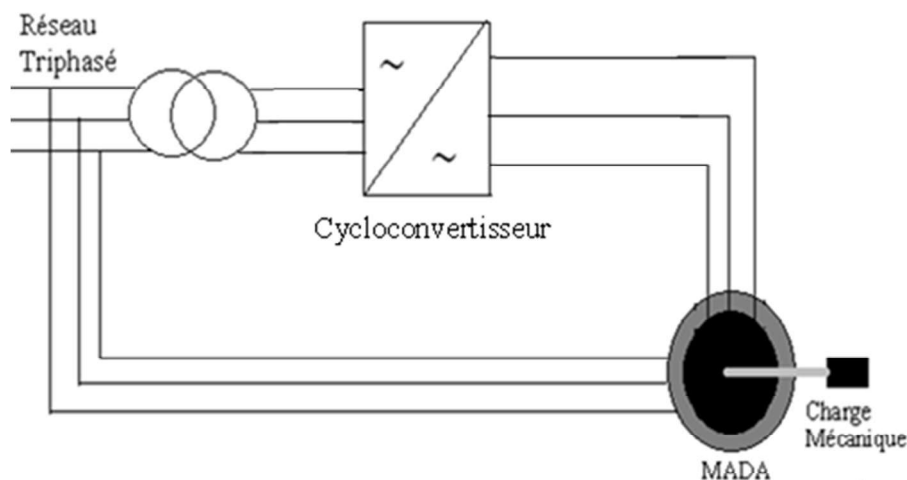


Figure II.8 : Schéma de principe de la deuxième configuration .

II.3.4.3 Troisième configuration

Pour une MADA alimentée par des convertisseurs indépendants, on peut prendre différentes formes [22]:

Les figures II.9, II.10 et II.11 présentent respectivement la première forme où on remarque que les deux onduleurs sont alimentés en parallèle par un redresseur commun. La seconde où les deux onduleurs sont alimentés par leurs propres redresseurs et pour la dernière l'alimentation est assurée par deux cycloconvertisseurs.

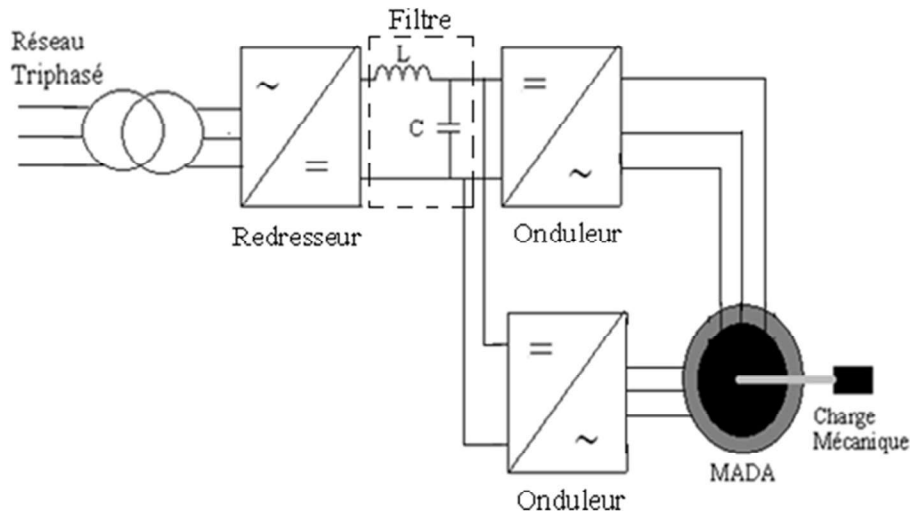


Figure II.9 : Alimentation de la MADA avec deux onduleurs et un bus continu commun

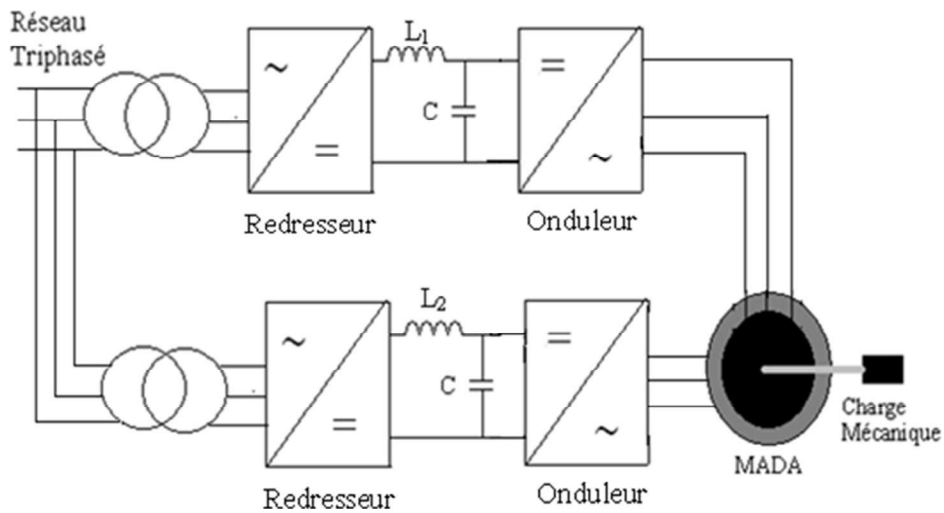


Figure II.10 : Alimentation de la MADA avec deux onduleurs avec deux bus continus indépendants

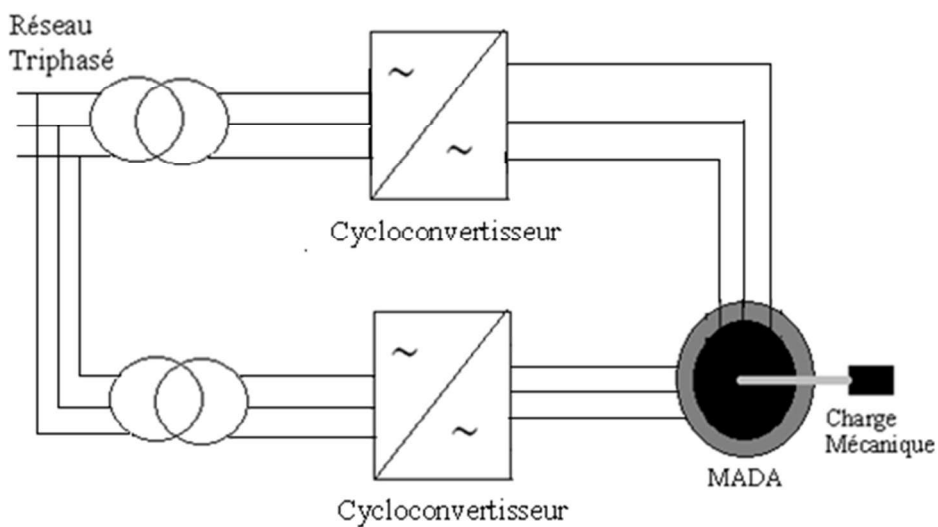


Figure II.11 : Alimentation de la MADA par deux cycloconvertisseurs.

II.3.5 Fonctionnement en mode générateur

L'utilisation de la MADA pour la production de l'énergie électrique à partir de l'énergie éolienne est très répandue [18, 23-24].

La conversion de l'énergie éolienne à base d'une MADA est devenue, en termes de développement, l'une des plus importantes et les plus prometteuses des sources d'énergies renouvelables à travers le monde.

La littérature est abondante dans ce domaine et les thèmes abordés sont très variés, il s'agit parmi elle [25-26] :

- Modélisation et commande des génératrices éoliennes ;
- Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie ;
- Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service.

La configuration qui est largement répandue dans les systèmes éoliens à vitesse variable avec MADA est représentée par la (Figure II.12). On distingue que le rotor est alimenté par un convertisseur tandis que le stator est directement lié au réseau électrique.

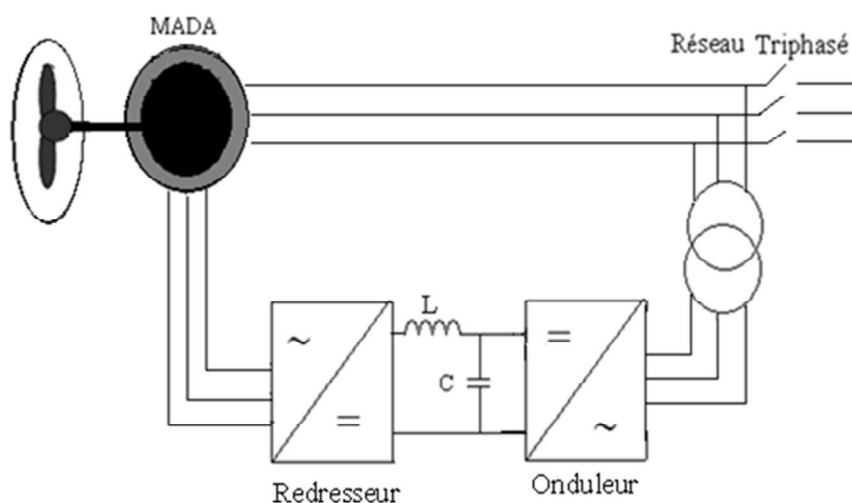


Figure II.12 : Alimentation de la MADA pour une application génératrice .

II.3.6 Principe de fonctionnement de la MADA

La MADA est une machine asynchrone à rotor bobiné avec l'enroulement du stator connecté directement au réseau. Le champ des enroulements statoriques tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire $\omega_s = 2\pi f_s$. Le rotor est constitué par des enroulements triphasés relié à un convertisseur de puissance bidirectionnel par un système balais-bague, qui tourne avec la vitesse ω .

Dans le cas où le nombre de pôles au stator et au rotor sont identiques, la vitesse angulaire de rotation du rotor est définie par :

$$\omega = \omega_s \pm \omega_r = P\Omega_m \quad (\text{II} - 1)$$

Avec :

Ω_m : vitesse mécanique du rotor ;

«s» et «r» désignent respectivement les grandeurs statoriques et rotoriques ; P : nombre de paire de pôles.

Si la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme ($\omega < \omega_s$) le champ tournant créé par les enroulements du stator tourne dans le même sens que celui créé par les enroulements du rotor ; c'est-à-dire que la machine fonctionne en régime hypo-synchrone, dans ce cas le signe (-) est attribué dans l'équation (I.1). Dans le cas contraire, la vitesse étant supérieure à celle du synchronisme ($\omega_s < \omega$) , les champs tournants créés par les enroulements du stator et du rotor tournent dans des sens opposés ; c'est-à-dire que la machine fonctionne en régime hyper-synchrone et le signe (+) apparait dans l'équation (I.1).

D'autre part, la relation qui relie la fréquence du stator et celle du rotor est donnée par [5] :

$$f_s = f_r + P \cdot f_m \quad (\text{II} - 2)$$

Avec :

f_m : fréquence de rotation du rotor.

Le glissement g est défini comme suit :

$$g = \frac{f_r}{f_s} = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad (\text{II} - 3)$$

$g > 0$: régime hypo-synchrone.

$g < 0$: régime hyper-synchrone.

II.3.7 Avantages et inconvénients de la MADA

Comme les autres machines, la MADA présente quelques avantages et inconvénients qui sont liés à sa structure, sa stratégie de commande et ses applications.

II.3.7.1 Avantages de la MADA

Comme avantages de la MADA, on peut citer :

- La mesure des courants au stator et rotor, donne une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique [20].

- Le circuit rotorique de la MADA peut être piloté par un convertisseur de fréquence ayant une puissance relativement faible par rapport au stator. Ce convertisseur rotorique de haute commutation est utilisé pour réaliser de hautes performances dynamiques en termes de temps de réponse, de minimisation des harmoniques et d'amélioration de rendement [22].
- En fonctionnement générateur, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse [17].
- Le principal avantage est qu'elle pourrait permettre de passer d'un fonctionnement à un autre [18].
- La possibilité de fonctionner à couple constant au delà de la vitesse nominale.

II.3.7.2 Inconvénients de la MADA :

- La MADA présente une structure non linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande.
- La machine à double alimentation requiert un collecteur à trois bagues au rotor. Donc pour une même puissance, ce moteur est un peu plus long et à peine plus lourd que le moteur asynchrone à cage équivalent [27].
- Elle est plus volumineuse qu'une MAS à cage de puissance équivalente. L'aspect multi- convertisseurs, augmente le nombre de convertisseurs et par conséquent le prix [18].
- Utilisation d'un nombre de convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur) [19].

II.4 Conclusion :

Ensuite nous avons présenté les deux types de machines électriques (asynchrone, synchrone) et leur application ainsi que leurs adaptations à un système éolien,

A la fin de ce chapitre nous avons présenté la structure de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) ainsi que son intérêt, par la suite notre travail se focalise sur cette dernière.

Chapitre III

Modélisation d'un système éolien base sur une GADA

III.1 Introduction :

Dans la chaîne de conversion de l'énergie éolienne, la turbine et la génératrice sont les éléments les plus importants, puisque la turbine assure une transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique qui permet de faire tourner le rotor de la génératrice et cette dernière est la composante qui assure la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Ce chapitre est consacré à la modélisation de la turbine et la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). Cette étape permet de comprendre le comportement dynamique et l'interaction électromécanique de la turbine et la génératrice.

III.2 Description du système éolienne :

Le système éolien à vitesse variable étudié dans ce mémoire, basé sur une GADA, est illustré à la Figure III.1. La turbine, via un multiplicateur, entraîne la GADA, laquelle est raccordée au réseau électrique directement par le stator mais également au travers de convertisseurs statiques triphasés par le rotor .

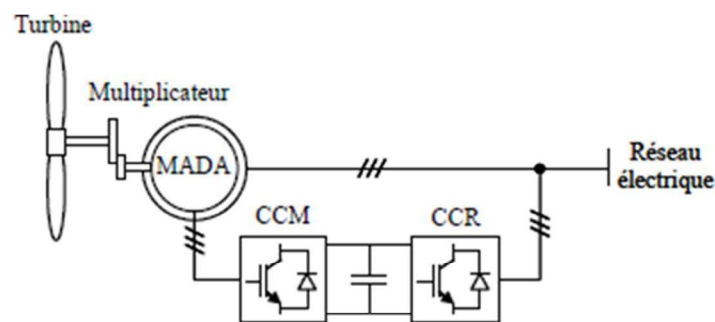


Figure III.1 : Système éolien à vitesse variable basé sur une MADA [28].

III.3 Modélisation de la turbine :

Un système éolien transforme l'énergie de la masse d'air en mouvement et délivre une puissance mécanique caractérisée par la vitesse de rotation et le couple mécanique.

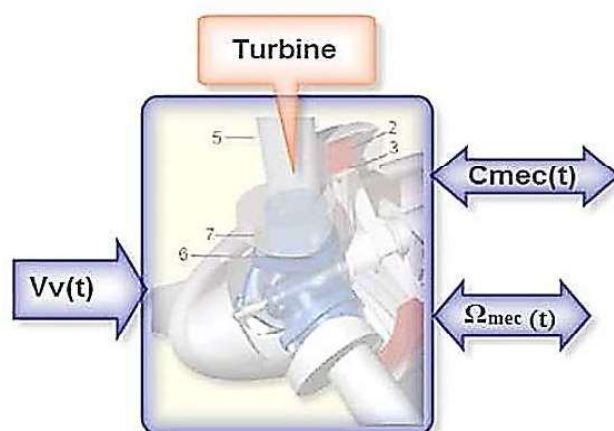


Figure III.2 : Entrées – sorties du modèle de la turbine éolienne.

Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de gain K .

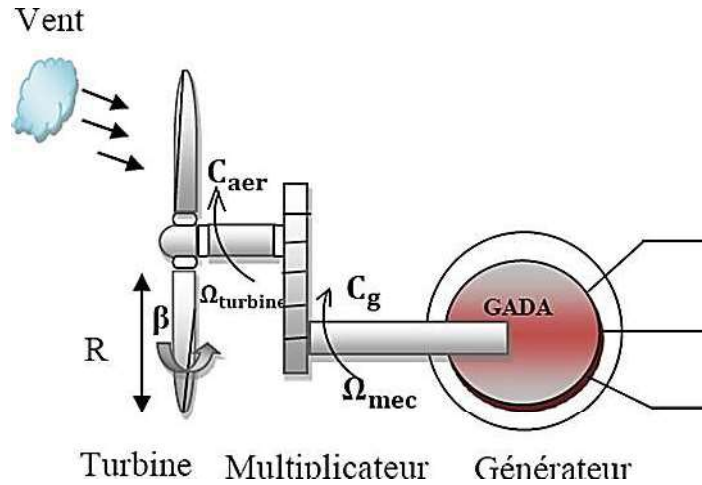


Figure III.3 : Schéma de la turbine éolienne.

L'équation donne la valeur du couple qui est créé sur les pales de l'éolienne par la masse d'air ayant une vitesse V_v .

$$C_{turb} = \frac{1}{2} C_c(\lambda) \rho \pi R^3 V_v^2 \quad (\text{III} - 1)$$

En réalité, ce couple éolien n'est pas égal au couple mécanique présent sur l'arbre de la turbine surtout à cause de l'inertie conséquente de la turbine Jet, dans une moindre mesure, des frottements mécaniques f . Il est donc impossible de considérer la turbine vue de l'arbre mécanique comme une source de couple liée directement à la vitesse du vent.

Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse (rapide) de la génératrice Figure III.3. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{turb}}{K} \quad (\text{III} - 2)$$

$$\Omega_{mec} = K \Omega_{turb} \quad (\text{III} - 3)$$

Avec Ω_{mec} la vitesse de la génératrice.

Le multiplicateur présente des inconvénients, comme la nécessité d'une maintenance, un taux de panne élevé, des pertes énergétiques supplémentaires, un bruit acoustique parfois gênant un encombrement important.

III.3.1 Equation dynamique de l'arbre :

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 :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (\text{III} - 4)$$

Où J est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice.

Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C_{mec} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} , et le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - f \cdot \Omega_{mec} \quad (\text{III - 5})$$

Il est plus logique de le considérer comme une source de vitesse. L'équivalence électrique d'un tel système inertiel est montrée sur le schéma de la figure:[29]

III.4 Schéma de simulation de bloc de la turbine

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine se déduit des équations précédentes et est représenté sur la Figure III.5.

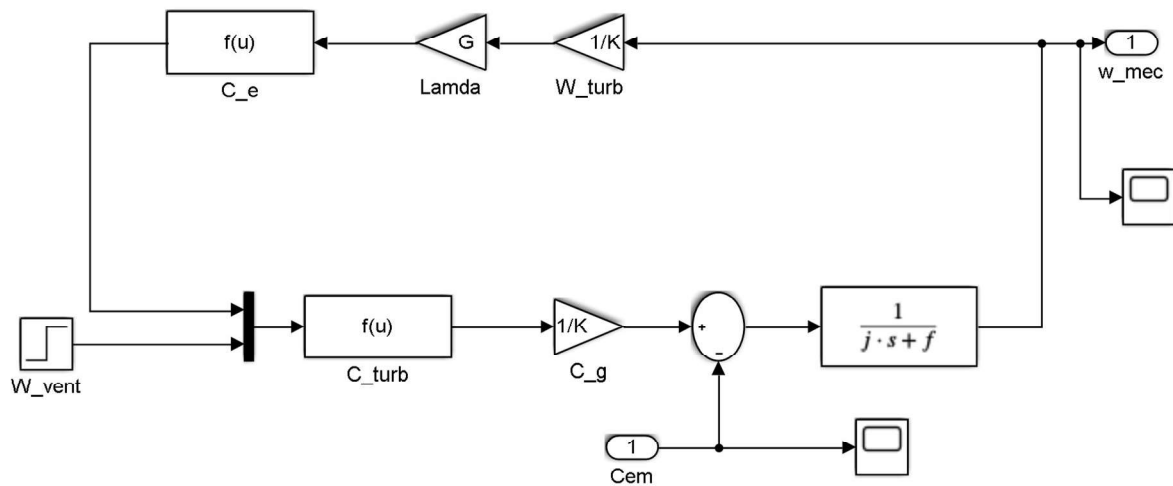


Figure III.4: Schéma de simulation de bloc de la turbine.

Les entrées de la turbine sont la vitesse du vent, l'angle d'orientation des pales et la vitesse de rotation de la turbine. Le modèle du multiplicateur transforme la vitesse mécanique et le couple aérodynamique respectivement en vitesse de la turbine et en couple de multiplicateur. Le modèle de l'arbre décrit la dynamique de la vitesse mécanique, il a donc deux entrées : le couple du multiplicateur et le couple électromagnétique fourni par la génératrice. Le schéma bloc montre que la vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur le couple électromagnétique de la génératrice.

La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice de ce système.

Résultats de la simulation :

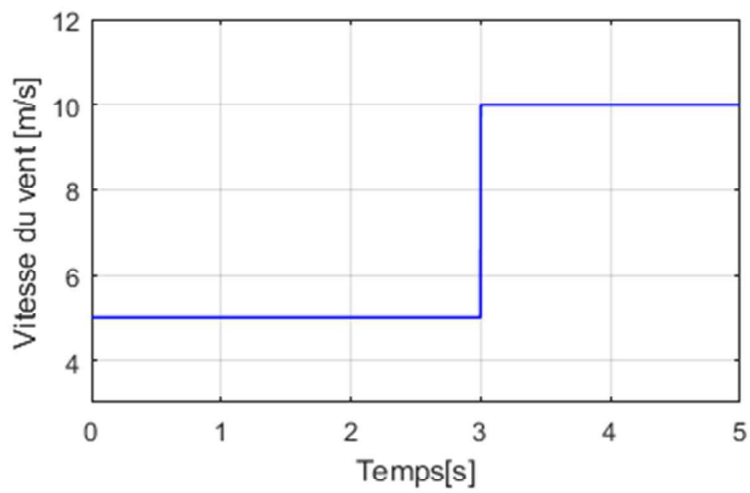


Figure III.5: Vitesse du vent applique à la turbine.

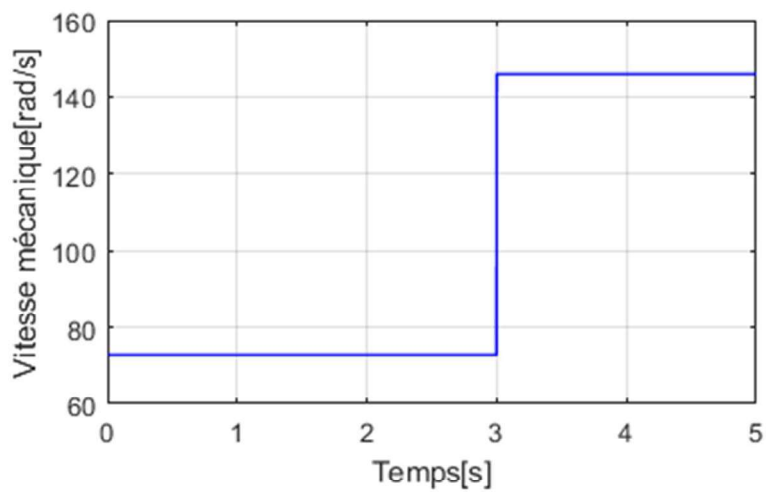


Figure III.6: Vitesse de l'arbre.

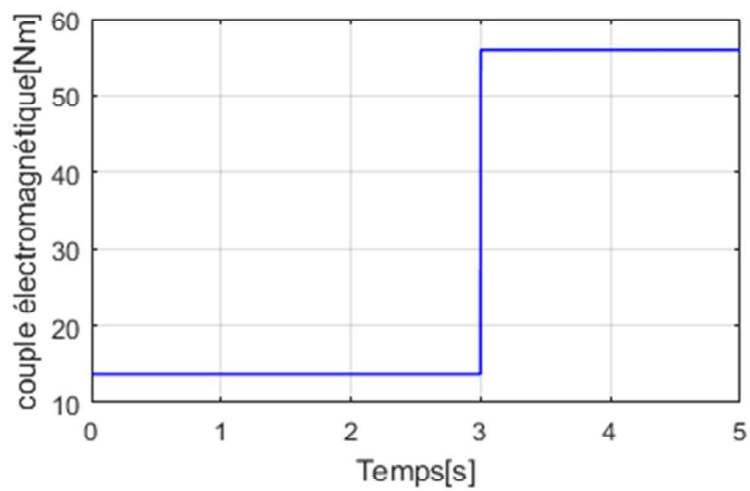


Figure III.7: couple électromagnétique de la MADA.

III.5 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

III.5.1 Hypothèses simplificatrices :

Le modèle repose sur les hypothèses simplificatrices classiques suivantes :

- entrefer constant.
- effet des encoches négligé.
- distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- influences de l'effet de peau et de l'échauffement non prises en compte.
- circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- pas de régime homopolaire puisque le neutre n'est pas connecté.

Ces choix signifient entre autres que les flux sont additifs, que les inductances propres sont constantes et qu'il y a une variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

La structure générale de la machine asynchrone doublement alimentée est composée de six enroulements dans l'espace électrique. Les axes statoriques sont décalés entre eux d'un angle $(2/3)$, ainsi que les axes rotoriques. L'angle θ représente l'angle entre l'axe de la phase rotorique de référence R_b et l'axe fixe de la phase statorique de référence S_b . Les axes rotoriques tournant avec ω_r par rapport aux axes statoriques fixes, sont représentés par la (Figure III.9).

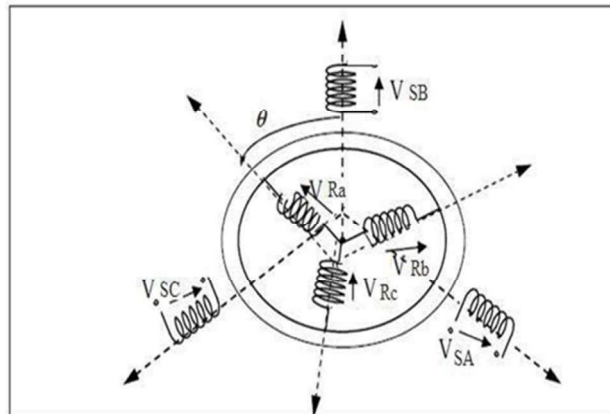


Figure III.8 : Représentation de la MADA dans le système triphasé.

III.5.2 Représentation de la MADA dans le système triphasé (a, b, c) :

Les équations générales de la machine asynchrone à double alimentation dans un repère triphasé [30].

- Equations électriques :

Par application de la loi de Faraday à chaque enroulement, on peut écrire :

$$\frac{d\phi}{dt} = V - R_i \quad (\text{III} - 6)$$

On applique cette relation sur l'enroulement triphasé du stator et de rotor on trouve [28] :

➤ pour le stator :

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s I_{sa} + \frac{d\varphi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s I_{sb} + \frac{d\varphi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s I_{sc} + \frac{d\varphi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III - 7})$$

➤ pour le rotor :

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r I_{ra} + \frac{d\varphi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = R_r I_{rb} + \frac{d\varphi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = R_r I_{rc} + \frac{d\varphi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III - 8})$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \end{cases} \quad (\text{III - 9})$$

Avec :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} ; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (\text{III - 10})$$

• Equations magnétiques :

Les équations magnétiques sont données par les expressions suivantes:

$$\begin{bmatrix} \varphi_s \\ \varphi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |L_s| & |M_{sr}| \\ |M_{rs}| & |L_r| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (\text{III - 11})$$

Tel que :

$$[\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} ; [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{III - 12})$$

$$[I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} ; [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{III - 13})$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} ; [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{III - 14})$$

$$[M_{rs}]^t = [M_{sr}] = [M] = M_{sr} * \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{III } 15)$$

Avec :

I_s, I_r : Inductance propre d'une phase statorique et rotorique,

M_s, M_r : Inductance mutuelle entre phases statoriques et rotoriques.

$[L_s]$: matrice d'inductances statoriques. $[L_r]$: matrice d'inductances rotoriques.

$[M_{sr}]$: matrice d'inductances mutuelles du couplage stator-rotor.

$[M_{rs}]$: matrice d'inductances mutuelles du couplage stator-rotor

θ : l'angle repère de l'axe d'une phase rotorique par rapport à l'axe fixe de la phase statorique.

- Equations mécanique :

L'équation mécanique reflétant le mouvement de rotation de l'arbre du moteur électrique est donné par le couple électromagnétique [31].

$$C_{em} = \frac{1}{2} \cdot [I_s]^t \cdot \left\{ \frac{d}{d\theta} [L] \right\} \cdot [I_r] \quad (\text{III } 16)$$

Avec :

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_s] & [M] \\ [M] & [L_r] \end{bmatrix} \quad (\text{III } 17)$$

Et :

$$[I] = [I_{sa} \ I_{sb} \ I_{sc} \ I_{ra} \ I_{rb} \ I_{rc}]^t = \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (\text{III } 18)$$

Les matrices $[L_s]$ et $[L_r]$ ne contiennent que des termes constants lorsque l'angle θ varie, cela permet de simplifier l'expression du couple soit:

$$C_{em} = \frac{1}{2} \cdot [I_s]^t \cdot \left\{ \frac{d}{d\theta} [M] \right\} \cdot [I_r] \quad (\text{III } 19)$$

On peut également exprimer le couple électromagnétique en fonction du couple résistant C_r créé par la charge mécanique du moteur, du moment d'inertie de toutes les parties tournantes et du coefficient de frottement visqueux f :

$$C_e = j \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega - C_r \quad (\text{III } 20)$$

III.5.3 Passage de triphasé au biphasé (Transformation de Park) :

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions et aux flux un changement de variable faisant intervenir l'angle entre l'axe d'une phase (V_a) statorique et le système d'axe (d, q), elle est définie par [28]:

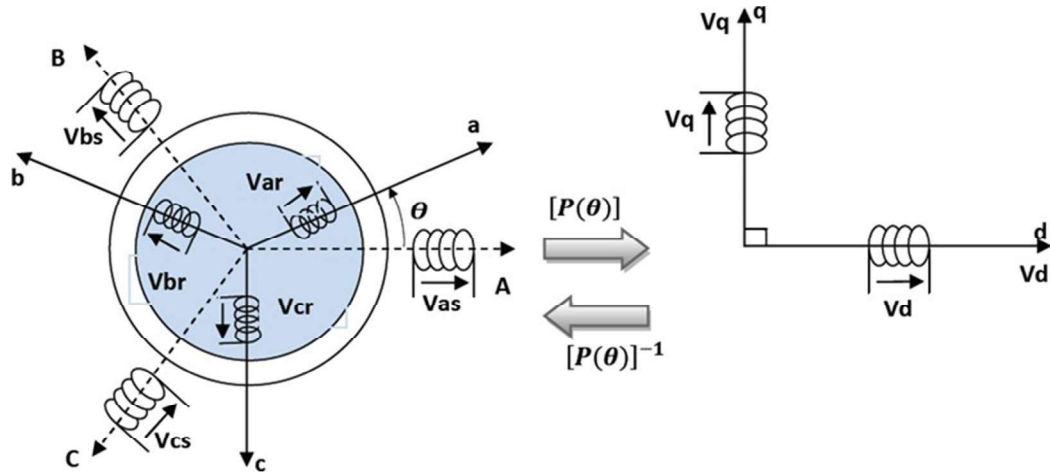


Figure III.9 : Passage du triphasé au biphasé et l'inverse

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III} - 21)$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III} - 22)$$

III.5.4 Application de la transformation de PARK :

En appliquant la transformation de Park aux équations de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère quelconque (équations (III-7), (III-8)). Alors le modèle de la machine est obtenu en tenant compte des composantes homopolaires sous la forme suivante[28] :

$$[P(\theta)]^{-1}[V_{dq}] = [R][P(\theta)]^{-1}[i_{dq}] + \frac{d}{dt}[P(\theta)] - 1[\varphi_{dq0}] \quad (\text{III} - 23)$$

$$[P(\theta)][V_{dq0}] = [R][i_{dq0}] + \left[\frac{d}{dt}[P(\theta)] - 1[\varphi_{dq}] \right] \quad (\text{III} - 24)$$

$$[P(\theta)] \left[\frac{d}{dt}[P(\theta)]^{-1} \right] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \left[\frac{d\theta}{dt} \right] \quad (\text{III} - 25)$$

Tel que :

$\theta = \theta_s$ pour les grandeurs statoriques

$\theta = \theta_s - \theta_r$ pour les grandeurs rotoriques

En remplaçant la relation (III - 25) dans (III - 24) on obtient le modèle biphasé équivalent suivant[28] :

$$\begin{cases} V_d = R_{id} + \frac{d\varphi_d}{dt} - \frac{d\theta}{dt} f \varphi_q \\ V_q = R_{iq} + \frac{d\varphi_q}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \varphi_d \\ V_0 = R_{i0} + \frac{d\varphi_0}{dt} \end{cases} \quad (\text{III - 26})$$

III.5.5 Représentation de la MADA dans un repère biphasé (dq) :

En multipliant les systèmes des équations (II.4) par la matrice de Park, on obtient [28]

- Equation électriques :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III - 27})$$

- Equations magnétiques :

Les flux statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s \cdot I_{sd} + M \cdot I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s \cdot I_{sq} + M \cdot I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r \cdot I_{rd} + M \cdot I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r \cdot I_{rq} + M \cdot I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III - 28})$$

Les angles de Park relatifs aux grandeurs statoriques et rotoriques sont liés, d'après la Figure III.11, par la relation [28]:

$$\theta_s = \theta_e - \theta_r$$

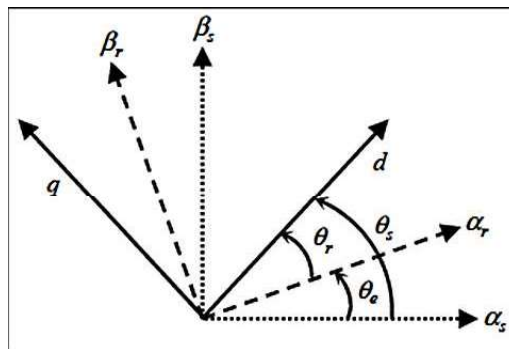


Figure III.10 : Angles de Park des grandeurs statoriques et rotoriques

- Equation mécanique :

$$C_{em} = \frac{P_m}{\Omega_s} ; \Omega_s = \frac{\omega_s}{p} ; C_{em} = p \frac{P_m}{\omega_s} \quad (\text{III - 29})$$

Le couple électromagnétique C_{em} peut être exprimé, à partir des flux et des courants statoriques, par :

$$C_{em} = p \cdot (\varphi_{sd} \cdot I_{sd} - \varphi_{sq} I_{sd}) \quad (\text{III - 30})$$

En remplaçant les flux par leurs expressions données par les relations (III-28) on peut établir d'autres expressions pour le couple :

$$C_{em} = p \cdot (\varphi_{rd} \cdot I_{rq} - \varphi_{rq} \cdot I_{rd}) \quad (\text{III - 31})$$

$$C_{em} = p \cdot M (I_{sq} \cdot I_{rd} - I_{sd} \cdot I_{rq}) \quad (\text{III - 32})$$

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_r} (\varphi_{sq} \cdot I_{rd} - \varphi_{sd} \cdot I_{rq}) \quad (\text{III - 33})$$

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_r} (\varphi_{rd} \cdot I_{sq} - \varphi_{rq} \cdot I_{sd}) \quad (\text{III - 34})$$

En appliquant les relations fondamentales de la dynamique à la machine, l'équation mécanique est [32] :

$$\frac{J}{P} \frac{d(\omega_r)}{dt} = C_e - C_r - C_f \quad (\text{III - 35})$$

J : moment d'inertie des parties tournantes (du moteur avec la charge).

C_e : couple résistant.

C_f : couple de frottement.

$$C_e = J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega - C_r \quad (\text{III - 36})$$

III.6 Modèle de la machine en représentation d'état :

La représentation d'état de la MADA dépend du repère et du choix des variables d'état pour les équations électriques. On écrit les équations dans le repère (d, q) car c'est la solution la plus générale [32].

Le choix des variables d'état, dépend des objectifs soit pour la commande soit pour l'observation. On choisit pour notre cas le vecteur d'état suivant [1]: $[I_{sd} \ I_{sq} \ \varphi_{rd} \ \varphi_{rq}]^T$. On écrit le modèle de la machine utilisée pour la commande sous forme d'un système d'équations d'état:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = AX + BU \\ Y = CX \end{cases} \quad (\text{III - 37})$$

Avec :

X : vecteur d'état du système,

A : matrice d'état du système,

B : matrice de commande,

U : vecteur de commande $[V_{sd} \ V_{sq} \ V_{rd} \ V_{rq}]^T$

Y : vecteur de sortie,

C : matrice d'observation.

On déduit les équations des courants rotorique à partir des équations du flux rotoriques (III-28). [28]

$$\begin{cases} I_{rd} = \frac{1}{L_r} \varphi_{rd} - \frac{M}{L_r} I_{sd} \\ I_{rq} = \frac{1}{L_r} \varphi_{rq} - \frac{M}{L_r} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III - 38})$$

On remplace les courants rotoriques dans les équations des flux statoriques (III-28) on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s \sigma I_{sd} - \frac{M}{L_r} \varphi_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s \sigma I_{sq} - \frac{M}{L_r} \varphi_{rq} \end{cases} \quad (\text{III - 39})$$

Avec :

$$\sigma = \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r}\right) \quad (\text{III - 40})$$

En remplaçant φ_{sd} et φ_{sq} en fonction de I_{rd} et I_{rq} dans les équations des tensions statoriques (III-27), on aboutit aux équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + L_s \sigma \frac{I_{sd}}{dt} + \frac{M}{L_r} \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_s (L_s \sigma I_{sq} + \frac{M}{L_r} \varphi_{rq}) \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + L_s \sigma \frac{I_{sq}}{dt} + \frac{M}{L_r} \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - \omega_s (L_s \sigma I_{sd} + \frac{M}{L_r} \varphi_{rd}) \end{cases} \quad (\text{III - 41})$$

On détermine la dérivée de flux rotorique à partir les équations des tensions rotoriques (II.22) :

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{rd}}{dt} = V_{rd} - R_r I_{rd} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{rq} \\ \frac{d\varphi_{rq}}{dt} = V_{rq} - R_r I_{rq} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III - 42})$$

On remplace les deux courants rotorique (III-39) dans les équations des dérivées du flux rotoriques (III-42) on trouve :

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{rd}}{dt} = V_{rd} - \frac{R_r}{L_r} \varphi_{rd} + \frac{M R_r}{L_r} I_{sd} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{rq} \\ \frac{d\varphi_{rq}}{dt} = V_{rq} - \frac{R_r}{L_r} \varphi_{rq} + \frac{M R_r}{L_r} I_{sq} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III - 43})$$

On remplace le dernier système d'équation dans le système d'équation des tensions statoriques (III-41) on trouve :

$$\begin{cases} \frac{dI_{sd}}{dt} = -\gamma I_{sd} + \omega_s I_{sq} + \frac{K}{T_r} \varphi_{rd} + K \omega_r \varphi_{rq} + \frac{1}{L_s \sigma} V_{sd} - K V_{rd} \\ \frac{dI_{sq}}{dt} = -\omega_s I_{sd} - \gamma I_{sq} - K \omega_r \varphi_{rd} + \frac{K}{T_r} \varphi_{rq} + \frac{1}{L_s \sigma} V_{sq} - K V_{rq} \end{cases} \quad (\text{III - 44})$$

Et:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{rd}}{dt} = \frac{M}{T_r} I_{sd} - \frac{1}{T_r} \varphi_{rd} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{rq} + V_{rd} \\ \frac{d\varphi_{rq}}{dt} = \frac{M}{T_r} I_{sq} - \frac{1}{T_r} \varphi_{rq} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{rd} + V_{rq} \end{cases} \quad (\text{III - 45})$$

Donc :

$$A = \begin{bmatrix} -\gamma & \omega_s & \frac{K}{T_r} & \omega_r \\ -\omega_s & -\gamma & -\omega_r K & \frac{K}{T_r} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & \omega_{sl} \\ 0 & \frac{M}{T_r} & -\omega_{sl} & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \quad (\text{III - 46})$$

Et :

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s \sigma} & 0 & -K & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s \sigma} & 0 & -K \\ 0 & 0 & K & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K \end{bmatrix} \quad (\text{III - 47})$$

Avec :

$$\begin{cases} \frac{R_s}{L_s} = \frac{1}{T_s} \\ \frac{R_r}{L_r} = \frac{1}{T_r} \\ K = \frac{M}{L_r L_s \sigma} \\ \gamma = \left(\frac{1}{T_s \sigma} + \frac{MK}{T_r} \right) \end{cases} \quad (\text{III - 48})$$

L'équation mécanique régissant la partie tournante de la machine est donnée par [28] [32] :

$$C_{em} = -\frac{3}{2} p \cdot \frac{M}{L_r} (\varphi_{rd} \cdot I_{sd} - \varphi_{rq} \cdot I_{sq}) \quad (\text{III - 49})$$



Figure III.11 : schéma du modèle de la MADA en représentation d'état

III.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la turbine et de la machine asynchrone à double alimentation, fonctionnement en générateur. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices Nous avons constaté que le modèle du MADA est un système à équations différentielles. Pour simplifier le modèle de la machine nous avons établi le modèle de la machine dans un système d'axe biphasé (d, q) lié au champ tournant à l'aide de la transformation de PARK.

Le chapitre suivant fera l'objet du découplage des puissances active et réactive par la commande vectorielle directe basées sur la technique d'orientation du flux statorique.

Chapitre IV

Commande vectorielle de la génératrice asynchrone à double alimentation

IV.1 Introduction :

La commande vectorielle est l'une des techniques les plus utilisées pour la commande des machines électriques. Elle repose sur une loi de commande conduisant à une caractéristique de réglage similaire à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée.

Le contrôle vectoriel de la GADA sera question de maîtriser les échanges d'énergie et notamment les transferts de puissances active et réactive envoyées sur le réseau. Pour le cas de ce travail, le référentiel (d, q) est calé sur le flux statorique. La commande concerne, bien entendu, les puissances renvoyées sur le réseau, donc du côté du stator (convention générateur) et par conséquent le rotor sera considéré comme un organe de commande (convention récepteur) [33].

L'objectif de ce chapitre est d'introduire des algorithmes de la commande vectorielle pour le contrôle des puissances active et réactive générées par la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA)

IV.2 La commande vectorielle directe :

Cette commande a été proposée par Blaschke. Dans ce cas, la connaissance du module de flux et de sa phase est requise pour assurer un découplage entre le couple et le flux quel que soit le régime transitoire effectué. En effet, le flux est régulé par une contre réaction, donc il doit être mesuré ou estimé à partir des signaux de tensions statoriques et de courants. Afin d'accéder à l'information concernant l'amplitude et la phase du flux, on peut utiliser des capteurs (sondes à effet de Hall, spires de mesure) placés sous les dents du stator (entrefer de la machine).

L'avantage de cette technique est qu'elle dépend moins des variations paramétriques. Cependant, l'inconvénient de cette méthode est que les capteurs sont mécaniquement fragiles et ne peuvent pas travailler dans des conditions sévères telles que les vibrations et les échauffements excessifs. De plus, les signaux captés sont entachés d'harmoniques et leur fréquence varie avec la vitesse ce qui nécessite des filtres ajustables automatiquement [34], [35], [36] [37].

IV.3 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique :

Dans ce qui suit nous allons supposer que l'axe d du repère de Park est orienté suivant le flux statorique. Ce choix n'est pas au hasard mais il se justifie par le fait que la machine est souvent couplée à un réseau puissant de tension et de fréquence constante, ce qui entraîne un flux constant au stator de la machine [38][39].

Nous allons donc nous contenter de rappeler le modèle diphasé de la machine asynchrone dans le référentiel (d, q) lié au champ tournant que nous comptons utiliser par la suite pour la commande de la MADA :

- Les équations des tensions:

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{IV - 1})$$

- Les équations des flux :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s \cdot I_{sd} + M \cdot I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s \cdot I_{sq} + M \cdot I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_s \cdot I_{rd} + M \cdot I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_s \cdot I_{rq} + M \cdot I_{sq} \end{cases} \quad (\text{IV - 2})$$

Le couple électromagnétique est donné par la relation suivante :

$$C_{mec} = p \cdot \frac{M}{L_s} (\varphi_{sd} \cdot I_{rq} - \varphi_{sq} \cdot I_{rd}) \quad (\text{IV - 3})$$

IV.4 Stratégie de commande en puissance active et réactive de la MADA :

Nous avons vu dans les chapitres précédents que l'intérêt de l'utilisation de la MADA, outre la taille du convertisseur, était de pouvoir fonctionner à vitesse variable en suivant la caractéristique de puissance optimale de l'éolienne [35]. Cette caractéristique montre que pour chaque vitesse de vent, il existe une vitesse de rotation optimale (correspondant à la valeur maximale du coefficient de puissance) permettant à l'éolienne d'avoir le meilleur rendement possible. Pour pouvoir tourner à cette vitesse optimale, à vitesse de vent donné, la turbine doit avoir un couple mécanique résistant donné, c'est à dire une puissance active débitée par la MADA. C'est en utilisant cette référence de puissance que la machine peut alors être commandée [36].

IV.4.1 Relation entre courants statoriques et courants rotoriques :

Dans ce paragraphe, nous considérons que la GADA fonctionne en mode hyper-synchrone, ce qui permet un transfert optimal de puissance en utilisant la commande vectorielle avec orientation du flux statorique. A cet effet nous allons, donc déterminer les équations qui lient les puissances actives et réactives statoriques aux grandeurs rotoriques sur lesquelles nous agissons pour commander la machine.

Il s'agit d'obtenir un certain découplage entre le stator et le rotor afin que l'expression du couple soit similaire à celle du couple de la machine à courant continu. Le principe consiste à orienter le flux statorique suivant l'axe d du référentiel tournant (Figure IV.1).

On a donc : $\varphi_{sq} = 0$ et par suite $\varphi_{sd} = \varphi_s$

- Pour les machines de moyenne et forte puissance utilisées dans les éoliennes, on peut de façon légitime négliger la résistance statorique R_s tout en considérant le flux statorique constant.

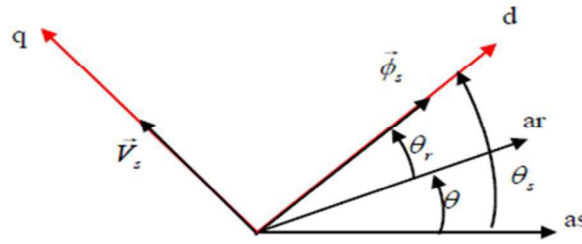


Figure IV.1: Orientation du flux statorique [39].

Dans l'hypothèse où le flux ϕ_{sd} est maintenu constant (ce qui est assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator). Le choix de ce repère rend le couple électromagnétique produit par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendant du courant rotorique d'axe q.

L'expression du couple électromagnétique devient alors :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_s} (\phi_{sd} \cdot I_{rq}) \quad (\text{IV - 4})$$

En utilisant les simplifications ci-dessus, nous pouvons simplifier les équations des tensions et des flux statoriques comme suit :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \cdot \phi_s \end{cases} \quad (\text{IV - 5})$$

$$\begin{cases} \phi_{sd} = \phi_s = L_s \cdot I_{sd} + M \cdot I_{rd} \\ \phi_{sq} = 0 = M \cdot I_{rq} + L_s \cdot I_{sq} \end{cases} \quad (\text{IV - 6})$$

A partir des équations (IV-6), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques:

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{\phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} \cdot I_{rd} \\ I_{sq} = -\frac{M}{L_s} \cdot I_{rq} \end{cases} \quad (\text{IV - 7})$$

IV.4.2 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques :

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} \cdot I_{sd} + V_{sq} \cdot I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} \cdot I_{sd} - V_{sd} \cdot I_{sq} \end{cases} \quad (\text{IV - 8})$$

L'adaptation de ces équations au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ($V_{sd} = 0$) donne:

$$\begin{cases} P_s = V_{sq} \cdot I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} \cdot I_{sd} \end{cases} \quad (\text{IV - 9})$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (IV-7) dans l'équation (IV-9) nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive:

$$\begin{cases} P_s = -V_{sq} \frac{M}{L_s} \cdot I_{rq} \\ Q_s = V_s \frac{\varnothing_s}{L_s} - V_s \frac{M}{L_s} \cdot I_{rd} \end{cases} \quad (\text{IV - 10})$$

En tirant $\varnothing_s = \frac{V_s}{\omega_s}$ de l'équation (IV-5), l'expression de la puissance réactive devient :

$$Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \frac{M}{L_s} \cdot I_{rd} \quad (\text{IV - 11})$$

IV.4.3 Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques :

On pourrait exprimer les tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques, en remplaçant dans l'équation (IV-1) les valeurs des courants statoriques de l'équation (IV-7) et en remplaçant le résultat ainsi obtenu dans l'équation (IV-12). Ainsi, nous obtenons :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rd}}{dt} - g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rq}}{dt} + g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \cdot \omega_s \frac{M \cdot V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{IV - 12})$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire [40]:

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \cdot \omega_s \frac{M \cdot V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{IV - 13})$$

Où g correspond au glissement de la machine asynchrone.

V_{rd} et V_{rq} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus. L'influence des termes de couplage entre

les deux axes en $\left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$ est minime. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle

de commande permettra de les compenser

En revanche le terme $\left(g \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s} \right)$ représente une force électromotrice dépendante de la

vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de traînage. Le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur [35].

Les équations (IV-10), (IV-11) et (IV-13) nous permettent d'établir le schéma bloc du système électrique de la MADA à réguler (Figure IV.2).

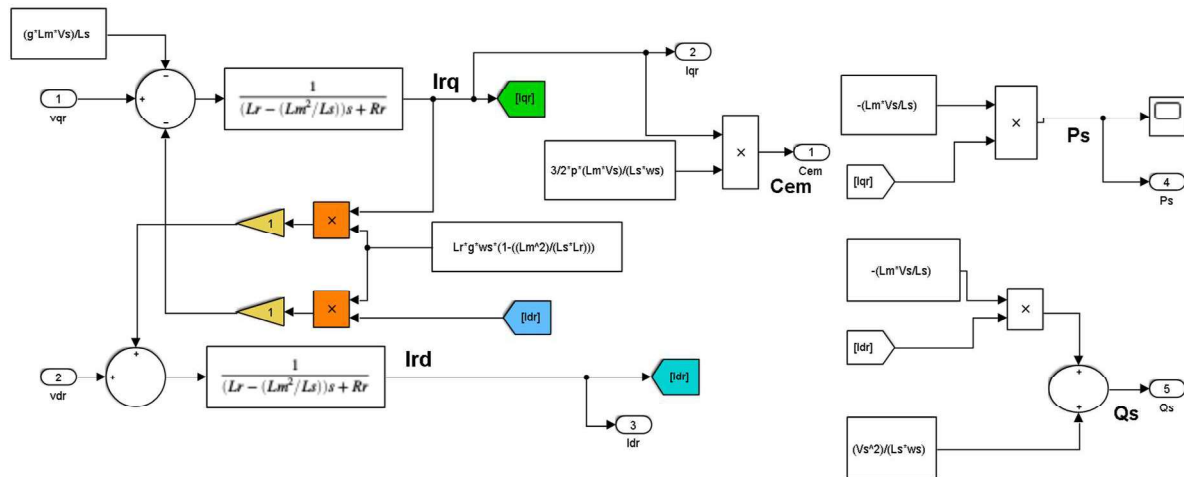


Figure IV.2: Schéma bloc de la simulation du système à réguler .

Ce schéma fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactives statoriques. Il montre également que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donné qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe q rotorique et la puissance active pour l'axe d rotorique [35].

IV.5 Commande vectorielle de la MADA en génératrice :

Pour réaliser la commande bouclée, de régulateur classique de type PI est utilisés. Ce type de régulateur assurent une erreur statique nulle grâce à l'action intégrale tandis que la rapidité de la réponse est établie par l'action proportionnelle [35]

Une structure par boucles imbriquées sera utilisée pour pouvoir contrôler séparément les puissances Q_s et P_s . A cet effet, on a proposé un mode de contrôle suivent.

Cette méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.

IV.5.1 Commande directe des puissances active et réactive :

La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives

et réactives. Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la génératrice [38].

Considérons le schéma bloc du système à réguler de la (Figure IV.3) afin de déterminer les éléments à mettre en place dans la boucle de régulation. La commande des puissances de sortie de la GADA dépend des tensions rotoriques V_{rd} et V_{rq} à contrôler. Si l'on regarde la relation qui lie les courants rotoriques aux puissances statoriques, on voit apparaître le terme $\left(\frac{M.V_s}{L_s}\right)$.

Nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \cdot \frac{M.V_s}{L_s} \end{cases} \quad (IV - 14)$$

V_{rd} et V_{rq} : les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la génératrice pour obtenir les courants rotoriques voulus.

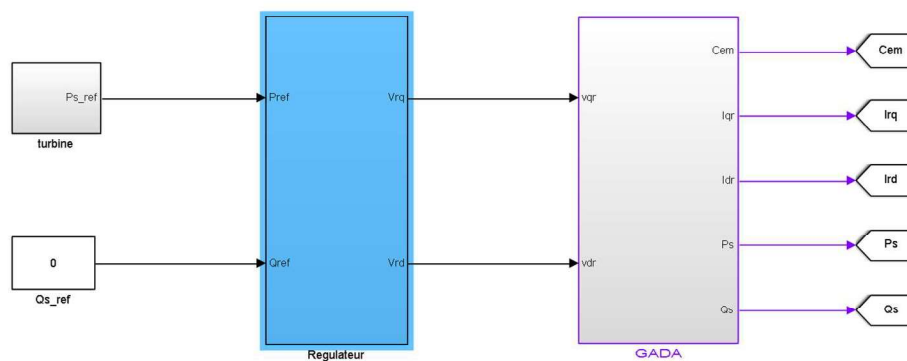


Figure IV.3: Schéma bloc de la simulation de GADA avec la régulateur.

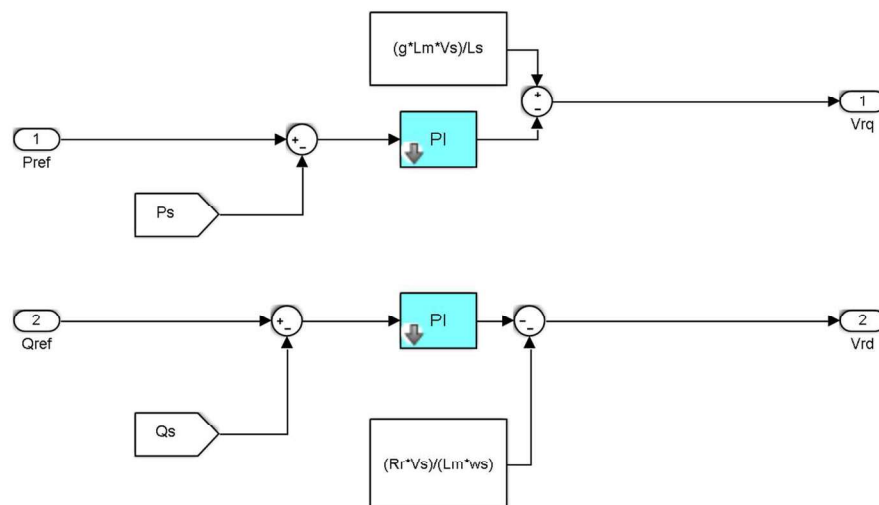


Figure IV.4: Schéma bloc de la simulation de la commande directe de la puissance active et réactive .

IV.5.2 Type et synthèse du régulateur PI:

Les régulateurs PI utilisés pour le réglage des puissances active et réactive et des courants I_{rd} et I_{rq} . Nous avons utilisé ce type de régulateur en raison de leur performance et de leur rapidité de calcul et la simplicité à mettre en œuvre.

La synthèse d'un régulateur Proportionnel – Intégral est réalisée. Ce type de régulateur reste le plus communément utilisé pour la commande de la GADA en génératrice, ainsi que dans de nombreux systèmes de régulation industriels.

Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes de la conception des régulateurs PI. Ce type de régulateur résulte de la combinaison harmonieuse de deux actions.

- une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité de la dynamique du système.
- une action intégrale qui permet d'éliminer l'écart entre la grandeur de consigne et celle que l'on désire asservir (erreur statique).

Le schéma de la figure III.6 montre un système en boucle fermée corrigé par un régulateur PI

dont la fonction de transfert est de la forme $\left(K_p \frac{K_i}{p}\right)$.

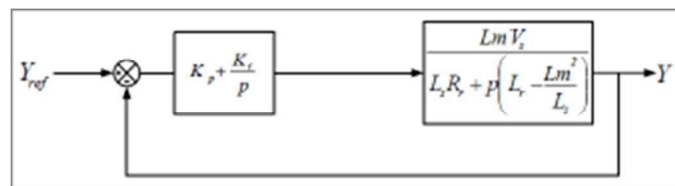


Figure IV.5: Schéma bloc d'un système régulé par un PI.

La Fonction de Transfert en boucle Ouverte (FTBO) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante:

$$FTBO = \frac{p \frac{K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}} \cdot \frac{\frac{V_s \cdot M}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p + \frac{R_r}{L_r - \frac{M^2}{L_s}}} \quad (IV - 15)$$

Afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert, nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur, ce qui se traduit par l'égalité suivante

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_r}{L_r - \frac{M^2}{L_s}} \quad (IV - 16)$$

Fonction de transfert en boucle ouverte devient alors:

$$FTBO = F_{0(t)} = \frac{\frac{V_s \cdot M}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{\frac{p}{K_p}} \quad (IV - 17)$$

Notons toutefois que la compensation de constantes de temps n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs dépendent directement de ces paramètres. Si tel n'est pas le cas la compensation est moins performant.

La Fonction de Transfert en boucle fermée (FTBF) on obtient :

$$FTBF = \frac{F_{0(t)}}{1+F_{0(t)}} = \frac{1}{1+p\tau_r} \quad \text{avec } \tau = \frac{1}{K_p} \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{M \cdot V_s} \quad (IV - 18)$$

τ_r : temps de réponse du système.

On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$\begin{cases} K_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{M \cdot V_s} \\ K_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{R_r \cdot L_s}{M \cdot V_s} \end{cases} \quad (IV - 19)$$

IV.6 Résultats de simulation des commandes vectorielle direct de GADA :

La simulation de la machine, de la partie électrique et de la commande directe a été implantée dans l'environnement MATLAB/SIMULINK afin d'effectuer des tests de la régulation. Nous avons donc soumis ce système à des échelons de de vitesse de vent afin d'observer le comportement de sa régulation.

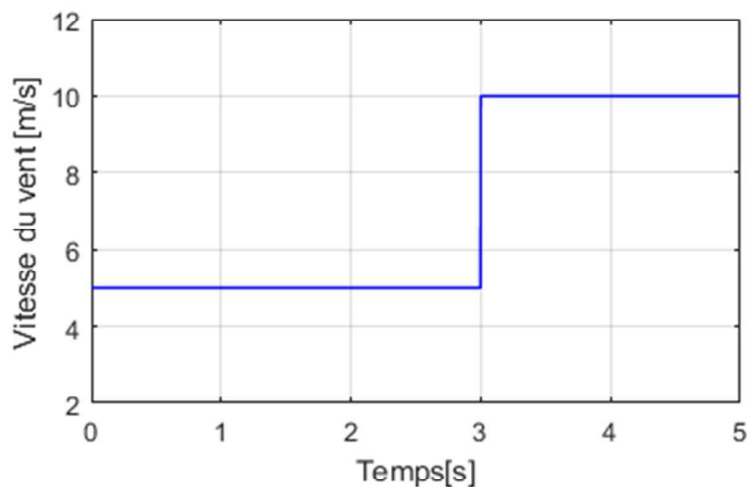


Figure IV.6: La vitesse du vent

En général, la vitesse du vent varie et n'est pas fixe, mais dans ce travail nous dirons avec un changement de vitesse du vent à 3s où la vitesse passe de 5m/s à 10m/s

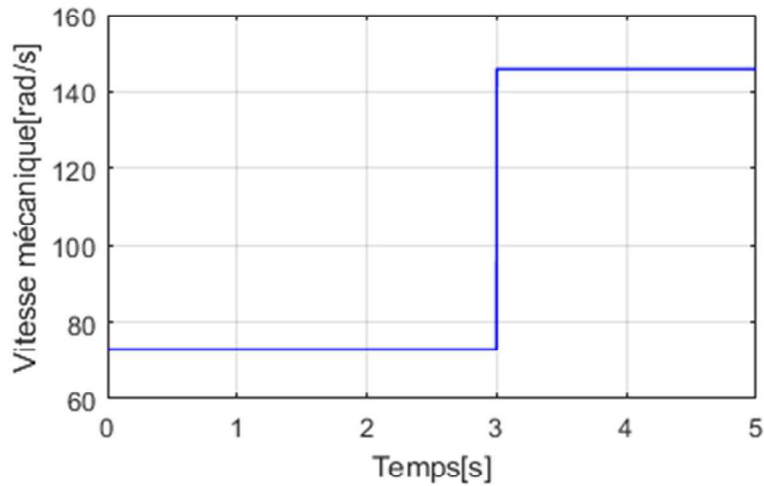


Figure IV.7: La vitesse mécanique.

Lorsque la vitesse du vent est appliquée à la turbine, la turbine donne une vitesse angulaire de 75 rad/s qui évolue en 3s pour devenir 145 rad/s

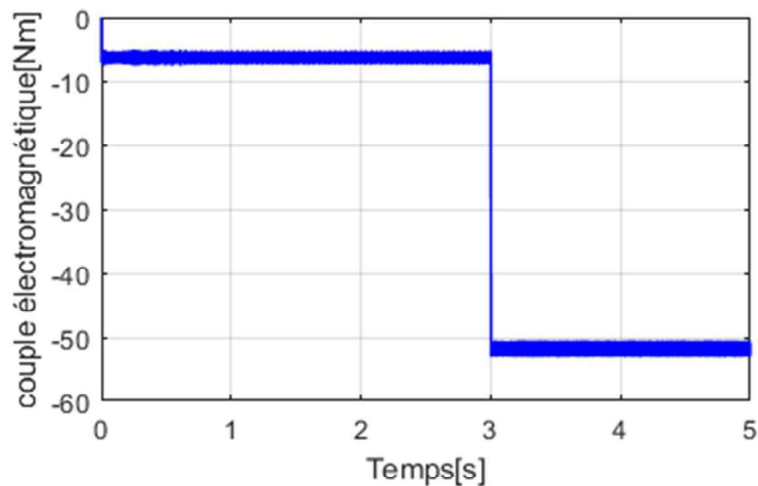


Figure IV.8: Couple électromagnétique.

Les rotations de l'arbre appliqué au générateur de 0s jusqu'à 03s nous donnent un couple électromagnétique de -7Nm, à 3s et plus il ya un 'augmentation de la rotation de l'arbre qui nous donnent le couple électromagnétique de -53Nm.

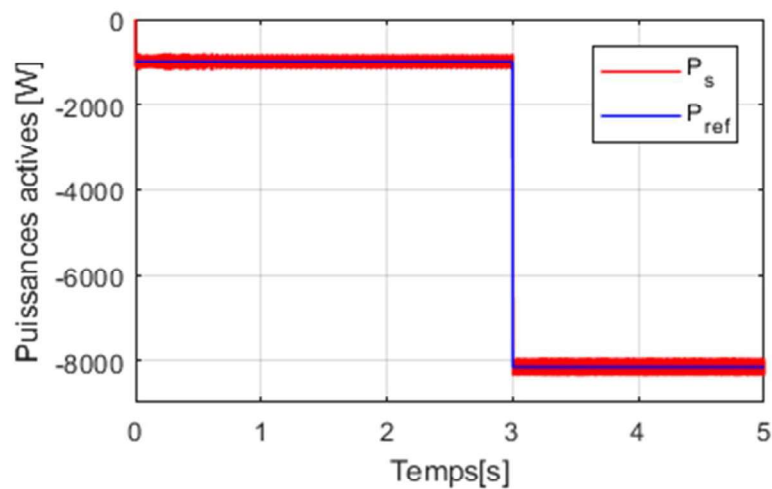


Figure IV.9: La puissance active.

Selon P_{ref} est la multiplication $C_{em} \times \Omega_{mec}$ c est le raison de nous remarquer le changement de P de -1000w à -8000w.

A cause de la robustesse de la commande vectorielle. On remarque que les valeurs de la puissance active mesuré sont presque égales les valeurs de la puissance de référence.

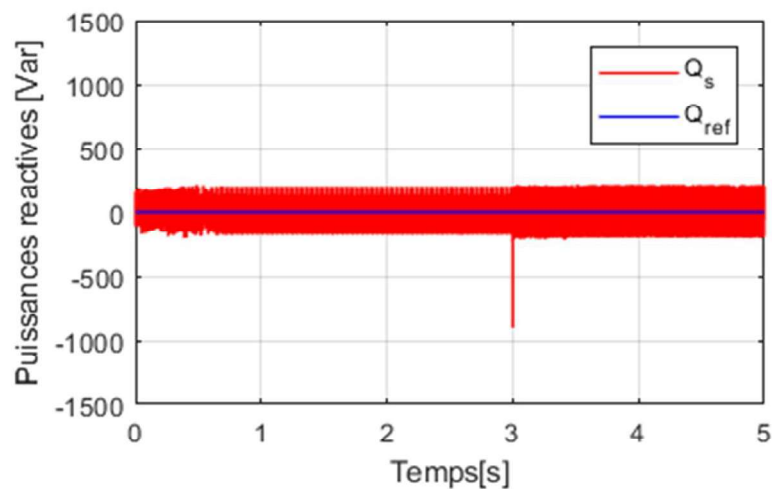


Figure IV.10: La puissance réactive

La valeur de Q_s est approximativement 0Var car prendre la valeur de référence de puissance réactive de 0Var

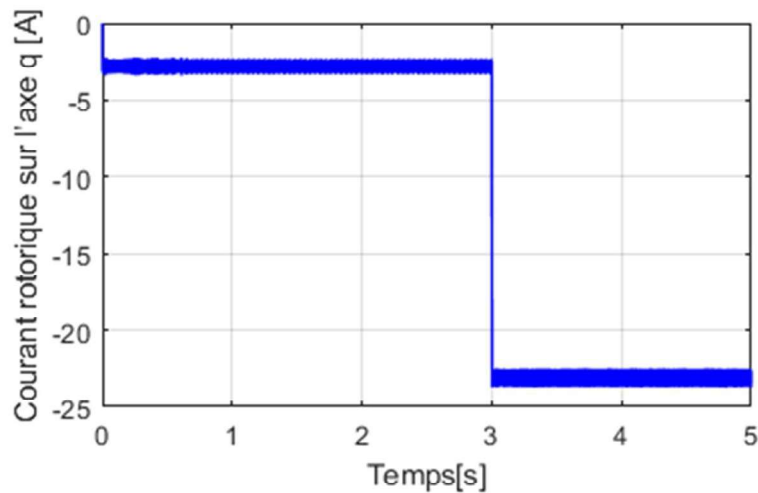


Figure IV.11: Courant rotorique sur l'axe q.

Parce que la valeur de référence de la puissance est variée de -1000W à -8000W, la valeur de i_q change de -2,5A à -23A en 3s.

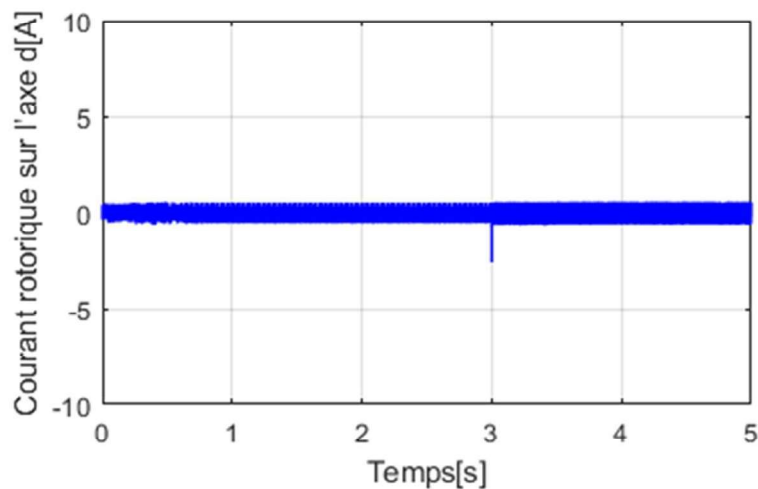


Figure IV.12: Courant rotorique sur l'axe d.

Puisque la valeur de référence de puissance réactive est 0Var, la valeur de $i_d = 0A$

IV.7 Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de présenter la structure de la commande et la stratégie de la régulation finalement choisie de la MADA dans un système éolien et la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique, la mise en équation le choix de repère diphasé et la simplification nécessaire à la synthèse de régulateurs est présentée.

Les résultats obtenus en utilisant le logiciel MATLAB SIMULINK en général, c'était très satisfaisant et motivant.

Conclusion générale

L'objectif principal dans ce mémoire porte sur l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation dans un système de production d'énergie éolienne et l'étude de système de la génératrice (GADA) qui est la plus utilisée pour ce mode de production d'énergie électrique.

Dans le premier chapitre est consacré à une étude générale de l'énergie éolienne, un rappel de notions fondamentales nécessaires à la compréhension du système éolienne. Ensuite on a présenté les différents types d'éoliennes.

Le second chapitre on a présenté les différents types des machines électriques utilisées dans cette conversion d'énergie, nous ont amenés à choisir un système de génération d'énergie éolienne basé sur une machine asynchrone à double alimentation de par ces qualités de fonctionnement. Il est noté que l'utilisation de la MADA dans les éoliennes connaît une évolution très rapide à cause de ses performances vis-à-vis des autres machines.

Les résultats de simulations obtenus dans le troisième chapitre montrent que le système éolien basé sur la MADA donne des résultats satisfaites et de bonnes performances.

Annexe :

Les paramètres de la génératrice asynchrone à double alimentation, sont donnés dans le tableau 1

Valeurs nominales : 4KW ; 220/380V- 50Hz ; 15/8.6A ; 1440 tr/min.

signification	Valeur numérique du paramètre
Rs (Résistance du stator)	0.455 Ω
Rr (Résistance du rotor)	0.62 Ω
Ls (Inductance stator)	0.084 H
Lr (Inductance du rotor)	0.081 H
M (Inductance Mutuelle)	0.078 H
J (Moment d'inertie)	0.3125 Kg.m ²
f (Coefficient de frottement)	6.73 e-3 N.m.s/rd

Paramètre de la turbine :

signification	Valeur numérique du paramètre
Rayon de l'éolienne	R=35.25
Surface	S=pi*(R) ²
Densité volumique de l'air	ro=1.22
Gain de multiplicateur de vitesse	M=90
Inertie de l'arbre	J=0.1235
Coefficient de frottement	f=0.0024

Bibliographiques

- [1] D. YUCEF, Commande par réseaux de neurones d'une MADA intégrée à un système éolien, MÉMOIRE Magister en Électrotechnique, SIDI BEL-ABBÈS, 2009.
- [2] H. M. Amine, Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques, Mémoire Magister en Electrotechnique Sétif, 2012.
- [3] B. BELTRAN, Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation, BRETAGNE OCCIDENTALE, 6 juillet 2010 .
- [4] M.djellouli M, Etude et Simulation d'une éolienne (Turbine+MADA) à vitesse variable suivant les deux modes de fonctionnement hypo et hyper-synchrone, , Mémoire Master en Electrotechnique Tlemcen ,13.10.2013
- [5] N. HAMDI, « Modélisation et commande des génératrices éoliennes »; mémoire de magister en électrotechnique, université de Constantine, 24/01/2008.
- [6] D. YUCEF, Commande par réseaux de neurones d'une MADA intégrée à un système éolien, MÉMOIRE Magister en Électrotechnique, SIDI BEL-ABBÈS, 2009.
- [7] W. Eole, énergie éolienne: <http://ww7.eole.org/>
- [8] RANDEE HOLMES et SUSAN EDWARDS, « L'ABC des technologies de l'énergie renouvelable », <http://www.pollutionprobe.org>, septembre2003.
- [9] « Rapport Mondial 2010 sur l'énergie Eolienne », 10th. world Wind energy conférence & renewable energy exhibition, 31 oct. au 2 nov. 2011.
- [10] G. ABDELKADER, R. M. ILYAS, « Commande par modes glissants d'une éolienne basé sur machine asynchrone à double alimentation », mémoire de master en automatique, octobre 2011.
- [11] Adam MIRECKI, « étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse,
- [12] B. A. ASMA, Etude de la commande d'un système éolien base sur une GADA, Université Hadj Lakhdar - Batna, 2016.

- [13] S. A. BELARBI, M. MALKI, Etude et Simulation d'un aérogénérateur connecté au réseau (Turbine + MADA + Réseau) en mode continu et discret, Mémoire De Master En
- [14] Ling Peng, « Reconfiguration du dispositif de commande d'une éolienne en cas de creux de tension », Thèse de Doctorat de l'école centrale de Lille.
- [15] Akkari.N, « contribution a l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone a double alimentation », Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2010.
- [16] Dendouga.A, « contrôle de la puissance active et réactive de la machine à double Alimentation (DFIM) », Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2010.
- [17] F. Poitiers, « Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'Utilisation de L'Energie Eolienne : Machine Asynchrone à Cage Autonome, Machine Asynchrone à Double Alimentation Reliée au Réseau », Thèse de Doctorat en et Génie Electrique, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, France, 2003.
- [18] V. Paul-Etienne, « Commande non-Linéaire d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation », Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [19] Abbas Mourad, Mechentel Mohamed , « Modélisation et Commande d'une MADA Alimentée par une Cascade à Trois Niveaux, Application à l'Energie Eolienne », Ecole Nationale Polytechnique, 10, AV. Hassen Badi, El-Harrach, Algérie, 2006.
- [20] Georges Salloum, « Contribution à la Commande Robuste de la Machine Asynchrone à Double Alimentation », Thèse de Doctorat en Génie Électrique, Institut National Polytechnique De Toulouse, France, 2007.
- [21] Sejir Khojet el Khil, « Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA)», Thèse de doctorat de l'institut national Polytechnique de Toulouse, 2006.
- [22] Elbia Youcef, «Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté», Thèse de Magister en électrotechnique de l'université de Batna, 2009.
- [23] Naouel Hamdi, « Modélisation et commande des génératrices éoliennes », Thèse de Magister en Electrotechnique de l'universite de Constantine, 2008.
- [24] Hamzaoui Ihssen, « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur », Thèse de Magister en électrotechnique de l'école Nationale Polytechnique, 2008.

[25] Aggoun Gania, « étude qualitative de l'association convertisseur machine pour L'entraînement électrique d'un système de génération électrique», Thèse de Magistère de l'université Tizi-Ouzou, Algérie.

[26] S.Areski, «Contribution a l'étude et la commande d'une machine asynchrone double alimentée par onduleur multiniveaux», Thèse de Magister de l'universite Houari Boumediene,2005 étoil.

[27] Leila Benalia, «commande en tension des moteurs a induction double alimentes» Thèse de doctorat en électrotechnique de l'université de Batna, 2010.

[28] B. Meriem, Contribution à la Commande Robuste de la Machine Asynchrone à Double Alimentation MADA, Mémoire De Magister En Génie Electrique Ecole Nationale Polytechnique d'Oran, 2013 / 2014.

[29] A. Abdelli, Optimisation multicritère d'une chine éolienne passive, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2007.

[30] H. TAMRABET, Robustesse d'un Contrôle Vectoriel de Structure Minimale d'une Machine Asynchrone, mémoire de magister, université de Batna, 20 /05 /2006.

[31] M. Z.BOUDJEMAA, M. BOUNADJA, Commande Non Linéaire par retour d'État d'un Moteur Asynchrone à Double Alimentation par Régulateur PI-Flou, Revue des Sciences et de la Technologie –RST- Volume 1 N°2, janvier 2010.

[32] D. YOUCEF, Commande par réseaux de neurones d'une MADA intégrée à un système éolien, MÉMOIRE Magister en Électrotechnique, SIDI BEL-ABBÈS, 2009.

[33] M. Z.BOUDJEMAA, M. BOUNADJA, Commande Non Linéaire par retour d'État d'un Moteur Asynchrone à Double Alimentation par Régulateur PI-Flou, Revue des Sciences et de la Technologie –RST- Volume 1 N°2, janvier 2010.

[34] A.L.NEMMOUR, contribution à la command véctorielle de la machine asynchrone à double alimentation, mémoire de magister, université de Batna, Algerie , 2002.

[35] P. Frédéric, ETUDE ET COMMANDE DE GENERATRICES ASYNCHRONES POUR L'UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE -Machine asynchrone à cage autonome - Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, Thèse de Doctorat en Electronique et Génie Electrique à l'Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.

[36] H. BEKHADA, Controle Robuste d'aerogenerateur, Mémoire De Magister En Génie Electrique, ecole normale supérieure de l'enseignement technologique d'oran,

2011/2012.

[37] D. YUCEF, Commande par réseaux de neurones d'une MADA intégrée à un système éolien, MÉMOIRE Magister en Électrotechnique, SIDI BEL-ABBÈS, 2009.

[38] A. BOYETTE, Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne, Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, 11 décembre 2006.

[39] B. A. Ben Nadji Hocine, commande de la puissance active et réactive du GADA par la Méthode de mode glissant, El-Oued, septembre 2015

[40] A. M. SIDDO .& I. S. NOUHOU, Étude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne, Mémoire de fin étude d'ingénieur en électrotechnique, École Nationale Polytechnique, El-Harrach, 2007.