

**République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique**



**Centre Universitaire d'EL-Oued
Institut des Sciences et de Technologies**



**Mémoire de Fin d'Etude
Présenté pour l'obtention du diplôme de**

LICENCE ACADEMIQUE

**Domaine : Sciences et de Technologies
Filière: Génie Électrique
Spécialité: Contrôle et Diagnostic des Systèmes Électriques**

Thème

**Contribution à l'étude d'une
machine asynchrone à double
alimentation sans balais en vue de
son application dans le domaine
de l'énergie éolienne**

**Diriger par:
TIR ZOHEIR**

**Réaliser par:
HANAFI MOHAMED
HASSANI HOUSSAM**

Soutenu le 10 Juin 2012

Liste de Figure

Figure 1.1	Turbine à axe vertical.
Figure 1.2	Turbine à axe horizontale.
Figure 1.3	principale composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne
Figure 1.4	principale composantes de l'éolienne à axe horizontale.
Figure 1.5	Tube de courant d'air autour d'une éolienne
Figure 1.6	Coefficient de puissance
Figure 1.7	Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.
Figure 1.8	Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.
Figure 1.9	Flux d'air sur un profil de pale « stall ».
Figure 1.10	Flux d'air sur un profil de pale « stall ».
Figure 1.11	Flux d'air sur un profil de pale « stall ».
Figure 1.12	Les différents modes de fonctionnement de la MADA
Figure 1.13	Fonctionnement en mode hyper synchrone
Figure 1.14	Fonctionnement en mode hyper synchrone
Figure(II.1)	Représentation schématique d'une machine asynchrone à double alimentation
Figure(II.2)	Principe de la transformation de park appliquée à la MADA

Liste de symbole :

MADA : machine asynchrone à double alimentation

R_s : est la résistance d'une phase statorique ;

R_r : est la résistance d'une phase rotorique.

L_{aa} : C'est l'inductance propre d'une phase statorique ;

L_{ab} : C'est l'inductance mutuelle entre deux phases statoriques ;

L_{AA} : C'est l'inductance propre d'une phase rotorique ;

L_{AB} : C'est l'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques ;

L_{aA} : C'est l'inductance mutuelle maximale entre une phase statorique et une phase

J : est le moment d'inertie du rotor de la machine en (kg.m^2) ;

Ω_r : est la vitesse angulaire mécanique du rotor en (rad/s) ;

p : est le nombre de paires de pôles ;

Ω_r : est la vitesse angulaire électrique de rotation du rotor ;

f_r : est le coefficient de frottement en (N.m.s/rd) ;

C_{em} : est le couple électromagnétique en (N.m) ;

C_r : est le couple résistant en (N.m).

θ : est l'angle entre l'axe rotorique A et l'axe statorique a ;

θ_r : est l'angle entre l'axe rotorique A, et l'axe de Park direct d ;

θ_s : est l'angle entre l'axe statorique a, et l'axe de Park direct d ;

ω_a : est la vitesse angulaire du système d'axes (d, q) ;

ω_r : est la vitesse angulaire électrique rotorique.

X : Vecteur d'état.

A : Matrice d'évolution d'état du système.

B : Matrice de commande.

U : Vecteur du système de commande

Sommaire

Chapitre 1

Introduction générale	(1)
1.Introductio	(4)
2.Historique	(5)
2.1.Définitio de l'énergie éolienne	(5)
2.2.Types d'aérogénérateurs	(6)
2.3.principales composantes des éoliennes à axe horizontal	(7)
3.Conversion de l'énergie éolienne	(9)
3.1.Loi de BETZ	(9)
3.2.Production d'énergie mécanique	(12)
Utilité de la vitesse variable	(12)
3.3.Modes de régulation	(13)
3.3.1.Systeme a décrochage aérodynamique « stall »	(13)
4.Conversion électromécanique	(15)
4.1.Systeme de génération d'électricité	(15)
4.1.1.Systeme utilisant la machine asynchrone	(15)
4.1.2.Systeme utilisant la machine asynchrone	(15)
4.1.3. Systeme utilisant des machine spéciales	(15)
4.2.Utilisation de MADA dans la conversion électromécanique	(15)
4.2.1.principe de fonctionnement	(16)
4.2.1.1.Moteur en hypo synchronisme	(17)
4.2.1.2.Moteur en hyper synchronisme	(17)
4.2.1.3.Génératrice en hypo synchronisme	(17)
4.2.1.4. Génératrice en hyper synchronisme	(17)
1.3.Connectio au réseau	(17)

Analyse et fonctionnement de la MADA	(19)
5.Conclusion	(20)

Chapitre 2

Introduction	(22)
Modèle Mathématique de la MADA	(23)
Hypothèses de simplification	(23)
Modèle effectif de la MADA	(23)
Equations électriques de la MADA	(24)
Application de la transformation de park à la MADA	(26)
Mise en équation de la MADA dans le repère de park	(28)
II.2.5.1. Equation des tensions	(28)
II.2.5.2.Equation des flux	(29)
II.2.5.3.Choix du référentiel	(30)
II.2.5.4.Expression du couple électromagnétique de la MADA dans le repère de park	(31)
II.3.Modèle de la MADA dans le repère de park sous forme d'état	(32)
Résultats de simulation de la MADA	(34)
Interprétation des résultats	(35)
II.4.Conclusion	(36)
Bibliographies	(37)
Conclusion générale	(38)

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Avec la crise mondiale marquée par la hausse du prix du pétrole, nous constatons l'émergence des énergies renouvelables qui se caractérisent par leur stock inépuisable et durable. Elles sont propres et ont un faible impact sur l'environnement d'où leur succès grandissant dans l'opinion publique, chez les investisseurs et les pouvoirs publics.

La source principale de ce type d'énergie est le soleil. Cette énergie est captée dans sa forme primaire à travers les cellules photovoltaïques ou thermo solaires. Elle peut être également transformée par la nature en courants marins à l'origine de l'énergie hydrolienne (énergie des vagues) ou en mouvement de masse d'air à l'origine de l'énergie éolienne (énergie du vent). Cette dernière offre des bénéfices certains pour la communauté, son prix peut être maîtrisable sans faire l'objet de spéculation sur le marché. Le développement de son industrie a pour effet d'absorber une main d'œuvre nombreuse et variée.

Ce type d'énergie procure l'avantage de ne pas être centralisé mais d'être disponible là où a lieu la demande. En effet, l'éloignement engendre des pertes considérables à travers les câblages dont l'investissement se caractérise par des coûts très importants. Aujourd'hui, le transport classique de l'électricité est remis en question grâce à la disponibilité et la démocratisation des éoliennes et donc une décentralisation de la production.

Compte tenu de ces arguments, de la grande superficie et du fort potentiel Algérien relatif au gisement éolien, nous avons choisi de traiter le processus de production de ce type d'énergie.

Les premières machines électriques qui furent utilisées dans le domaine éolien étaient les machines asynchrones [1]. En effet, celles-ci présentent plusieurs avantages tels que leur moindre coût, leur robustesse et leur entretien réduit.

Ce travail est structuré en deux chapitres de la manière suivante :

Le premier chapitre sera consacré à des généralités sur le système d'énergie éolienne accompagnées d'une analyse et principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) et leur avantage en voie d'utilisation au système éolien.

Dans le second chapitre, une modélisation de la MADA sera reproduite. Celle-ci sera suivie par une simulation par logiciel MATLAB afin de pouvoir connaître son comportement physique à travers l'évolution leurs grandeurs physique (électriques, magnétiques et mécaniques)

Étant donné l'engouement pour ce procédé de production d'électricité par la communauté universitaire, les entreprises et les pouvoirs publics, nous nous proposons de mettre en évidence quelques perspectives de recherche pour l'amélioration du dispositif.

Chapitre I

Chapitre 1

Analyse du fonctionnement du système de production de l'énergie éolienne à base d'une MADA

1. Introduction

Une grande partie des éoliennes de grande puissance utilise les machines asynchrones à double alimentation (MADA). Cette génératrice permet une production d'électricité à vitesse variable. Elle donne l'occasion, alors, de mieux contrôler les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent. Bon nombre de configurations existent, elles utilisent divers types de convertisseurs statiques. Pour chaque configuration nous disposons d'une commande adaptée ainsi que de performances spécifiques.

2. Historique

L'énergie éolienne est l'une des premières formes d'énergie employée par l'homme. Elle fut utilisée pour la propulsion des navires ensuite pour les moulins à céréales. La première utilisation connue de l'énergie éolienne remonte à 2000 ans avant J-C. Les Babyloniens avaient conçu à cette époque tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie en faisant usage de la puissance du vent. Ce n'est qu'au moyen âge que les moulins à vent furent introduits en Europe pour moudre le blé et assécher les terres inondées au pays-Bas.

En 1890 Poul La Cour a eu l'idée d'associer une turbine éolienne à une génératrice. Cette application a évolué en terme de puissance et de rendement durant tout le 20ème siècle et jusqu'au début du 21ème. Elle fut utilisée à travers le monde notamment dans les zones isolées telles que les îles du pacifique. Les Pays-bas se sont avérés les leaders incontestés dans les domaines de la construction des éoliennes (50% des éoliennes dans le monde sont de fabrication Hollandaise) [1]. La crise pétrolière de 1973 a alerté les états non producteurs d'énergie fossile sur la nécessité du développement de l'énergie éolienne. En 2006 l'Algérie a décidé de se doter de la technologie éolienne en implantant la première ferme éolienne à Tindouf. Elle aura une puissance de 50 MW et, d'ici 2015, 5% des besoins algériens en électricité seront assurés par les énergies renouvelables dont l'énergie éolienne [2].

3. Présentation du système éolien

3.1.Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" i.e (non dégradée), géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (plus de 45 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [2].

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie fossile (Centrale thermique ou à cycle combiné) sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores.

Hormis l'aspect visuel des éoliennes, leur impact sur l'environnement est réduit. Une éolienne ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur laquelle elle est implantée, permettant alors à la plupart des sites de conserver leurs activités industrielles ou agricoles.

3.2. Types d'aérogénérateurs

Un aérogénérateur est un dispositif utilisé pour le transfert de l'énergie cinétique du vent vers l'arbre de transmission en mouvement rotatif. Plusieurs types existent, ils se caractérisent par la position de leur axe de rotation et des performances qui leurs sont propres.

3.2.1. Aérogénérateurs à axe vertical

Elles ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. De nombreuses variantes ont vu le jour mais rares sont celles qui ont atteint le stade de l'industrialisation.

Ce type d'éolienne a été de plus en plus abandonné à cause des différents inconvénients qu'il a posés. Des problèmes d'aéroélasticité et la grande occupation du sol ont été les raisons de cet abandon au profit des éoliennes à axe horizontale [3].



Figure 1.1 - Turbine à axe vertical.

3.2.2. Aérogénérateurs à axe horizontal

Ce type d'éolienne est le plus répandu dans le monde. Ce système se base sur le principe de portance aérodynamique, les pales sont profilées de la même façon qu'une aile d'avion et la circulation du flux d'air dans la turbine entraîne la rotation du rotor de la machine [3].

Les éoliennes généralement utilisées pour la production d'électricité sont des éoliennes rapides à 2 ou à 3 pales [4], ceci pour plusieurs raisons :

- Elles sont légères et donc moins chères.
- Elles tournent plus vite car le multiplicateur utilisé présente un rapport de multiplication moins important d'où sa légèreté et des pertes réduites.
- Le couple nécessaire pour la mise en route de ce type d'aérogénérateur est très faible et donc un fonctionnement à faible vitesse de vent.

Ces raisons expliquent notre restriction à ce type d'aérogénérateur dans la suite de nos travaux.



Figure 1.2 - Turbine à axe horizontal.

3.3. Principales composantes des éoliennes à axe horizontal

L'éolienne à axe horizontale (Figure 1.4), sera décrite en citant ses différents composants.

En générale, l'éolienne à axe horizontale est constituée de trois éléments principaux ; La tour (mat), la nacelle et les pales qui sont supportées par le moyeu [21].

- La tour : C'est un élément porteur, généralement un tube en acier ou un treillis métallique. Avec l'augmentation des puissances nominales des éoliennes, le mat devient de plus en plus haut pour éviter les perturbations près du sol mais aussi permettre l'utilisation de pales plus longues. La tour a une forme conique ou cylindrique. A l'intérieur sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, l'appareillage de connexion au réseau de distribution et l'échelle d'accès à la nacelle.

- La nacelle : Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler la turbine éolienne à la génératrice électrique (figure 1.3). Elle comprend les éléments suivants :
 - Arbre.
 - Multiplicateur.
 - Roulements.
 - Le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.
 - Le générateur qui est dans le cas de cet exposé une MADA.
 - Les systèmes d'orientation des pales (régulation de la vitesse) et de la nacelle (la surface balayée par l'aérogénérateur doit être perpendiculaire à la direction du vent).

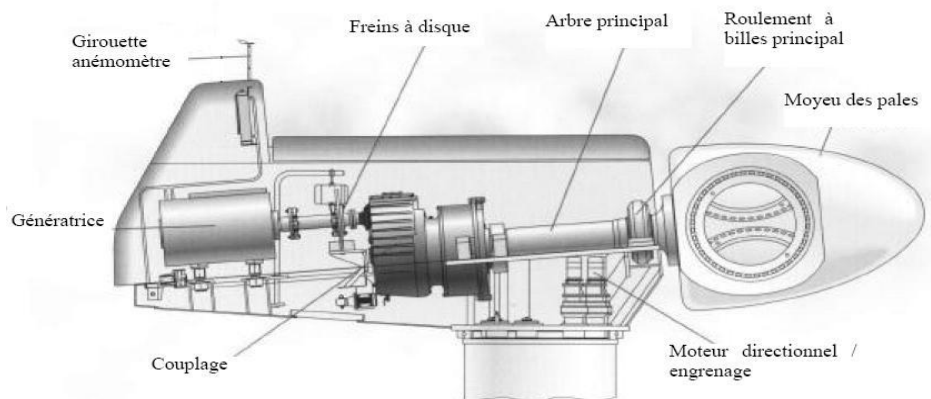


Figure 1.3 – Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne.

- Les pales : Elles permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Leur nombre est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs, car ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité.
- Le moyeu : C'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des à-coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse de vent.

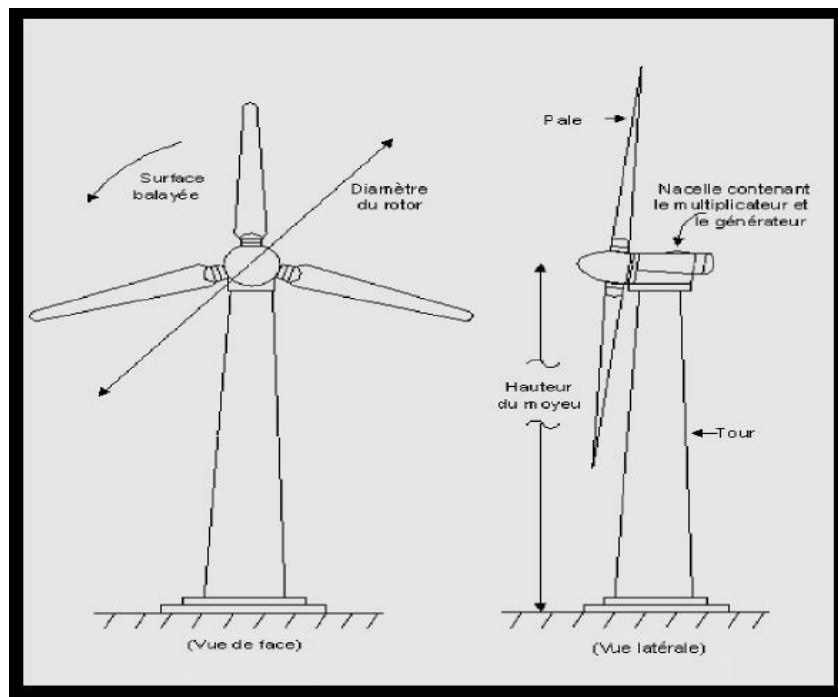


Figure 1.4 – Principales composants de l'éolienne à axe horizontale.

4. Conversion de l'énergie éolienne

La capacité de l'aérogénérateur à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de rotation a été la déduction logique et inévitable, en d'autres termes sine qua non, de son utilisation pour la production de l'énergie électrique.

Cependant, il est à noter que pour l'emploi efficace de cette ressource il est indispensable d'étudier les caractéristiques aérodynamiques de la turbine utilisée.

4.1. Loi de BETZ

La théorie du moteur éolien à axe horizontal a été établie par BETZ. Il suppose que « le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse V_1 et à l'infini aval d'une vitesse V_2 » [4]

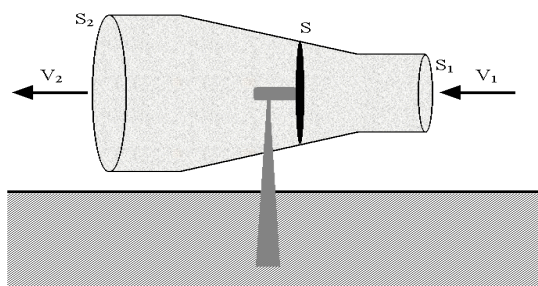


Figure. 1.5 -Tube de courant d'air autour d'une éolienne

Considérant le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure 1-5 sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. Désignant par V la vitesse de l'air traversant l'aérogénérateur, par S_1 et S_2 les sections amont et aval du tube d'air et par S la surface balayée par l'hélice. L'égalité qui traduit l'incompressibilité de l'air et la permanence de l'écoulement s'écrit [4], [5] :

$$S_1 V_1 = S V = S_2 V_2 \quad (1.1)$$

La force exercée par l'air sur l'aérogénérateur d'après le théorème d'EULER :

$$F = \rho \cdot S V \cdot (V_1 - V_2) \quad (1.2)$$

D'où la puissance absorbée par l'aérogénérateur:

$$P_{aero} = F \cdot V = \rho \cdot S V^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (1.3)$$

La puissance absorbée par l'aérogénérateur est aussi égale à la variation de l'énergie cinétique E_c de la masse d'air qui le traverse d'où :

$$\frac{\Delta E_c}{\Delta t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S V \cdot (V_1^2 - V_2^2) = P_{aero} = \rho \cdot S V^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (1.4)$$

On en déduit:

$$V = (V_1 - V_2) / 2 \quad (1.5)$$

En remplaçant l'expression de V dans les relations 1.2 et 1.3 on obtient :

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S (V_1^2 - V_2^2) \quad (1.6)$$

$$P_{aero} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S (V_1^2 - V_2^2) \cdot (V_1 + V_2) \quad (1.7)$$

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

$$P_{mt} = \rho \cdot S \cdot V_1^3 / 2 \quad (1.8)$$

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

$$\frac{P_{aero}}{P_{mt}} = \frac{(1 + \frac{V_1}{V_2}) \cdot (1 - (\frac{V_1}{V_2})^2)}{2} = C_p \quad (1.9)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation (1.9), on s'aperçoit que le ratio $\frac{P_{aero}}{P_{mt}}$ appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maximum pour

$\frac{V_1}{V_2} = \frac{16}{27}$ qui égale à 0,59 (Figure 1.6). Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie expérimentalement 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.

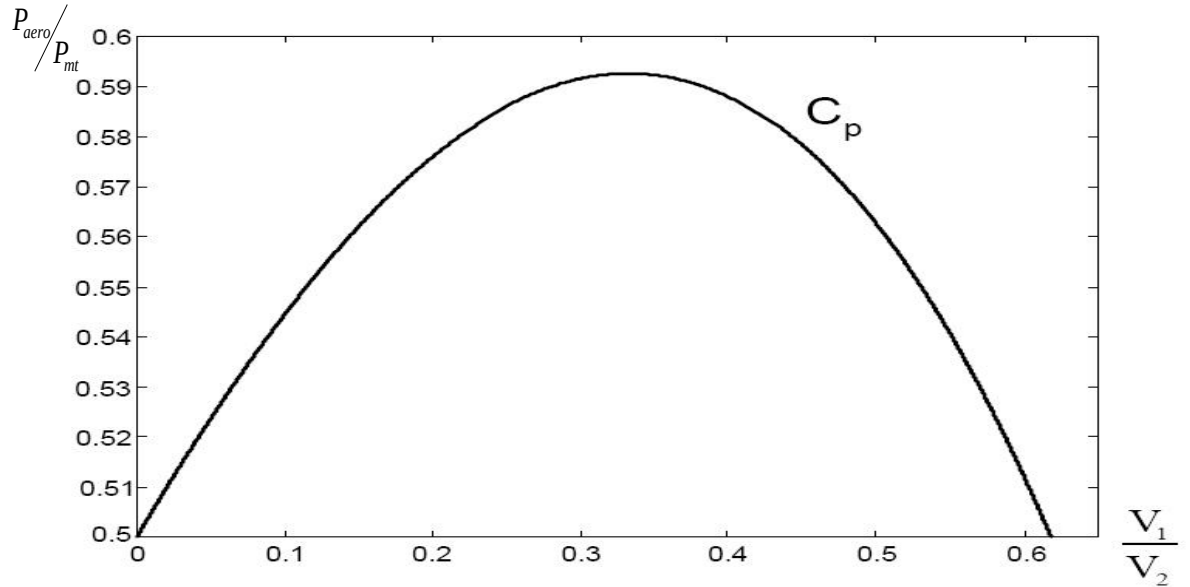


Figure 1.6 -Coefficient de puissance.

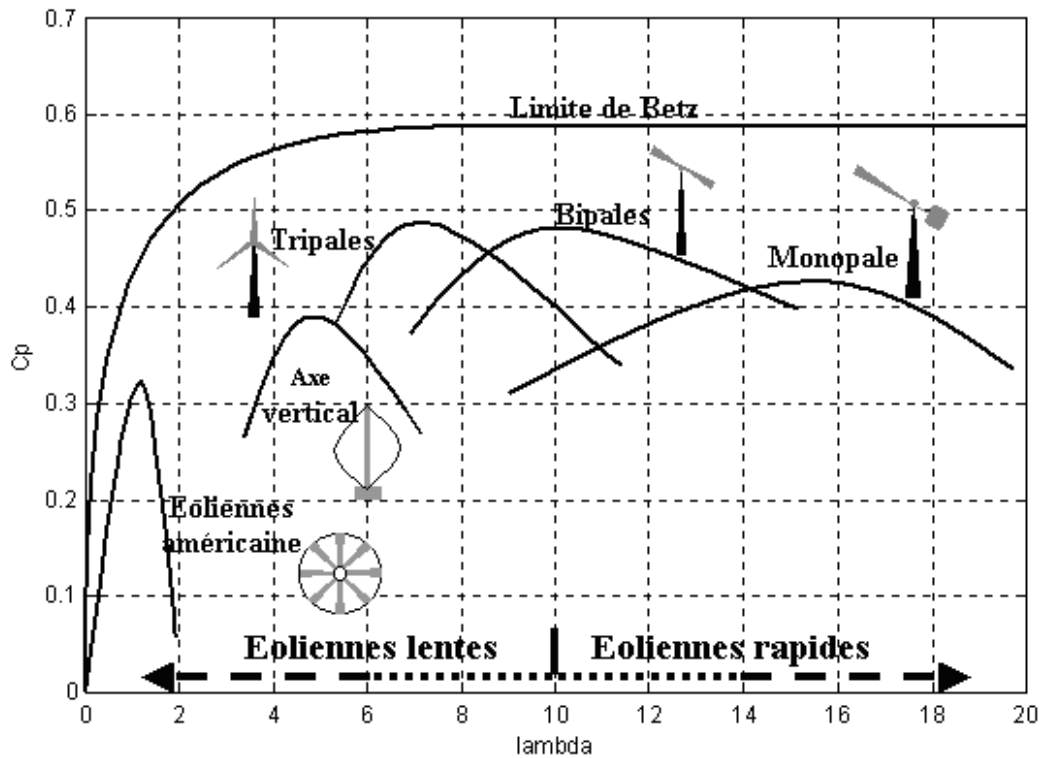


Figure 1.7 -Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance (Figure 1.7) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite (lors d'augmentation de la vitesse). Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique.

Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 45 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts [5].

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance (Figure 1.7) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente.

4.2. Production d'énergie mécanique

En combinant les équations (1.8) et (1.9), la puissance mécanique P_{aero} disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_{aero} = \left(\frac{P_{aero}}{P_{mt}} \right) \cdot P_{mt} = C_p(\lambda) \cdot P_{mt} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (1.10)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{V_1} = \frac{\Omega_{mec} \cdot R}{G \cdot V_1} \quad (1.11)$$

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

Ω_{mec} : Vitesse de rotation de l'arbre du générateur.

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent.

4.3. Utilité de la vitesse variable

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la figure (1.8)

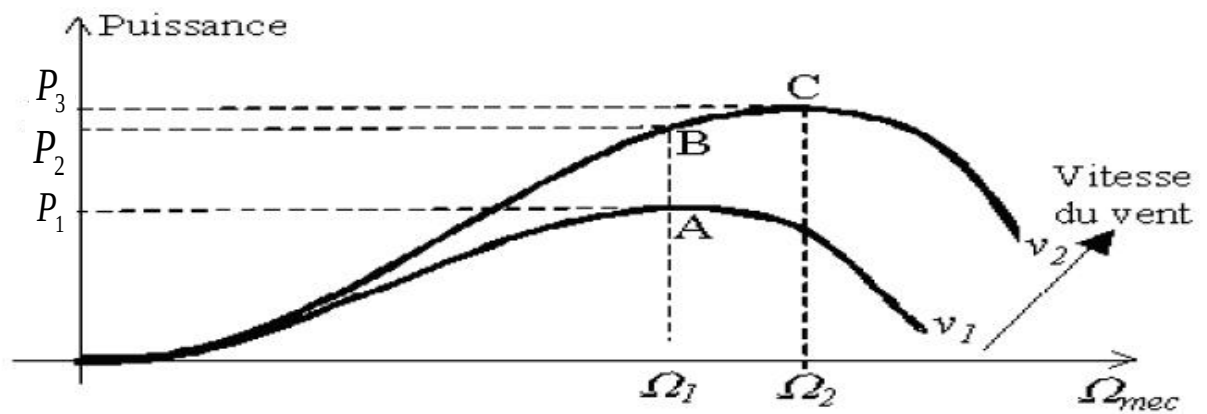


Figure 1.8 -Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.

Pour la vitesse du vent V_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 , on obtient une puissance maximale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de V_1 à V_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (Vitesse fixe), une puissance P_2 est transmise (point B) alors que la puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire d'augmenter la vitesse de la génératrice à une vitesse Ω_2 . Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de puissance.

4.4. Modes de régulation

La vitesse de rotation des pales de l'aérogénérateur ne doit pas dépasser une vitesse maximale car cela pourrait endommager le dispositif de conversion. Différentes méthodes de régulation de la vitesse existent, parmi lesquelles certaines sont basées sur le principe de l'orientation des pales, d'autres sont plus simples et utilisent le principe de décrochage aérodynamique afin de réguler la vitesse. Les méthodes précédemment citées sont expliquées dans ce qui suit :

4.4.1. Système à décrochage aérodynamique « *stall* »

C'est le système le plus simple et le moins coûteux car il se base sur le principe de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale V_n , l'aspiration créée par le profil de la

pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale (Figure 1.9) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation [10].

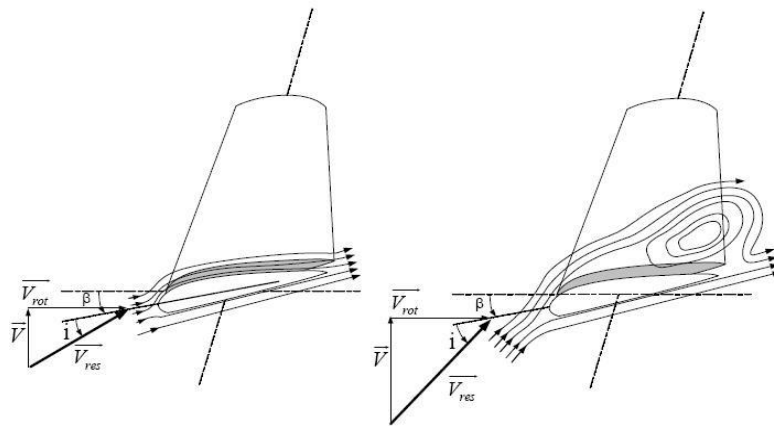


Figure 1.9 - Flux d'air sur un profil de pale " stall ".

4.4.2. Système d'orientation des pales « Pitch »

Le système de réglage aérodynamique se base sur le principe de l'augmentation de l'angle de calage (Figure 1.10) ce qui diminue la valeur du facteur de puissance (Figure 1.11) d'où une diminution du rendement de la turbine, ceci empêche l'augmentation de la vitesse de rotation de l'aérogénérateur.

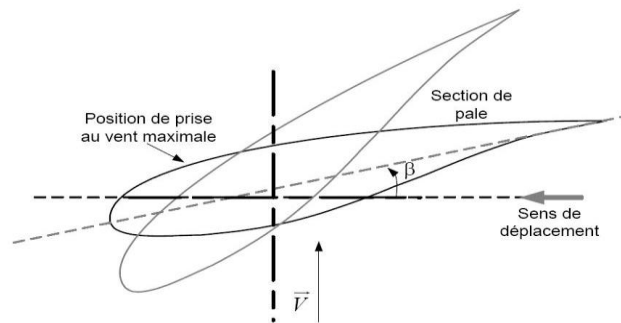


Figure 1.10 - Flux d'air sur un profil de pale " stall ".

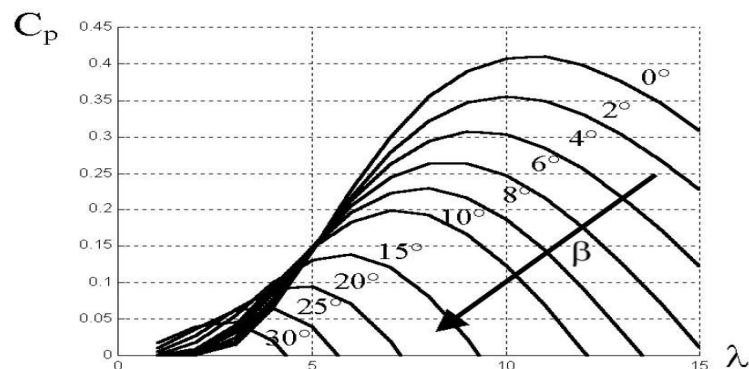


Figure 1.11 - Flux d'air sur un profil de pale " stall ".

5. Conversion électromécanique

La production de l'énergie éolienne se base sur le principe de la conversion de l'énergie du vent en énergie mécanique de rotation. Cela se fait grâce à la turbine à axe horizontal décrite précédemment. La conversion de l'énergie mécanique en électrique implique une génératrice couplée à la turbine.

5.1. Systèmes de génération d'électricité

A travers la littérature spécialisée nous avons rencontré plusieurs types de génératrices adaptées aux éoliennes. Nous avons pu les classer suivant trois variantes citées ci-dessous:

5.1.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone

Elle représente la configuration la plus répandue dans le monde. L'écoulement du vent dans la turbine étant en constante fluctuation, ce type de machine offre la possibilité de travailler à vitesse variable tout en respectant les contraintes de fréquence et de tension.

5.1.2. Systèmes utilisant la machine synchrone

Le stator de cette machine est relié à une interface électronique composée d'un onduleur et d'un redresseur permettant d'assurer la circulation du flux de puissance tout en ayant deux fréquences différentes au stator et au réseau.

5.1.3. Systèmes utilisant des machines spéciales

Ce type de machines est communément appelé machines à reluctance variable. Elles peuvent être excitées par les courants triphasés au stator ou ne pas l'être. Ce type de machine reste à l'état de prototype et ne satisfait pas les critères de l'industrialisation [5].

5.2. Utilisation de MADA dans la conversion électromécanique

Contrairement aux machines asynchrones à cage ou aux machines synchrones qui sont contraintes à fonctionner à la vitesse du synchronisme ou dans son voisinage, la MADA est une machine dont la vitesse de fonctionnement est située sur une grande plage de variation.

Par cette caractéristique intéressante, la MADA connaît un succès grandissant dans le domaine de la conversion électromécanique.

5.2.1. Principe de fonctionnement

La MADA comme son nom l'indique est une machine doublement alimentée. Elle a le surnom de « machine généralisée » vu sa flexibilité de fonctionnement. Grâce à l'accès au rotor et via une interface électronique il est possible de contrôler la vitesse de rotation ainsi que le facteur de puissance.

Le fonctionnement de la MADA se base sur le principe du contrôle de l'écoulement de la puissance de glissement [5]. Au lieu de dépenser en pertes Joule la puissance rotorique on peut la récupérer et l'injecter dans le réseau. La difficulté étant que la fréquence des courants rotoriques f_r est égale à g fois la fréquence du réseau. Durant des années cette difficulté était surmontée grâce à un groupement de machine [7]. Avec l'apparition des semi-conducteurs une solution plus pratique a été mise au point. Une interface électronique composée d'un redresseur, bus continu et un onduleur permettrait le passage de la puissance de glissement vers le réseau.

Nous verrons dans les paragraphes suivants comment une MADA peut être transformée en génératrice à vitesse variable en contrôlant l'écoulement de puissance entre le rotor et le réseau. Suivant les sens du transfert de puissance entre le rotor et le réseau mais aussi entre celui-ci et le stator, la MADA devient ainsi génératrice ou moteur. De plus, grâce à ce mécanisme, sa vitesse de rotation peut être contrôlée. Les différents modes de fonctionnement de la MADA sont décrits ci-dessous (Figure 1.12):

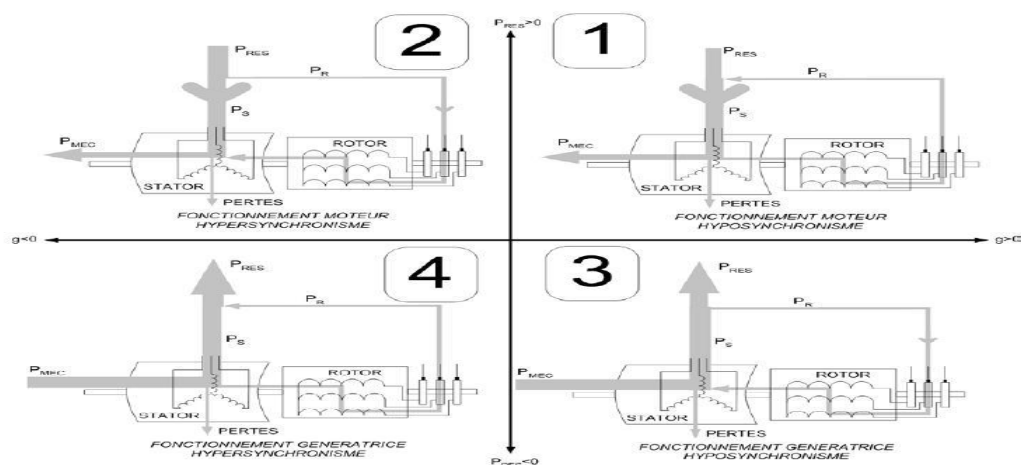


Figure 1.12 – Les différents modes de fonctionnement de la MADA.

5.2.1.1. Moteur en hypo synchronisme

L'énergie absorbée du réseau est transformée partiellement en énergie mécanique. L'autre partie est injectée au réseau à travers les contacts glissants du rotor. Pour les moteurs à cage, l'énergie de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor.

5.2.1.2. Moteur en hyper synchronisme

La puissance statorique est fournie par le réseau ainsi que la puissance de glissement. Les machines à cage ne peuvent avoir ce type de fonctionnement car celui-ci ne peut être obtenu qu'à l'aide d'un accès au rotor via un circuit électronique.

5.2.1.3. Génératrice en hypo synchronisme

L'énergie mécanique est transmise à l'arbre de la machine, celui-ci la fournit au stator, lequel la transmet au réseau. Afin de permettre un fonctionnement hyposynchrone, l'énergie de glissement, provenant du réseau, se doit d'être transmise au rotor. Ainsi pour le fonctionnement générateur hyposynchrone, une alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de la vitesse de rotation.

Il est évident qu'un moteur à cage ne peut avoir ce type de fonctionnement, car celui-ci n'a pas d'accès permettant un apport de puissance au rotor.

5.2.1.4. Génératrice en hyper synchronisme

La totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à $g \cdot P_{mec}$ est transmise par l'intermédiaire du rotor.

I.3 Connexion au réseau

Nous allons étudier dans le paragraphe suivant les convertisseurs de puissance statiques qui relient le rotor de la MADA avec le réseau. Ainsi que, les enroulements triphasés

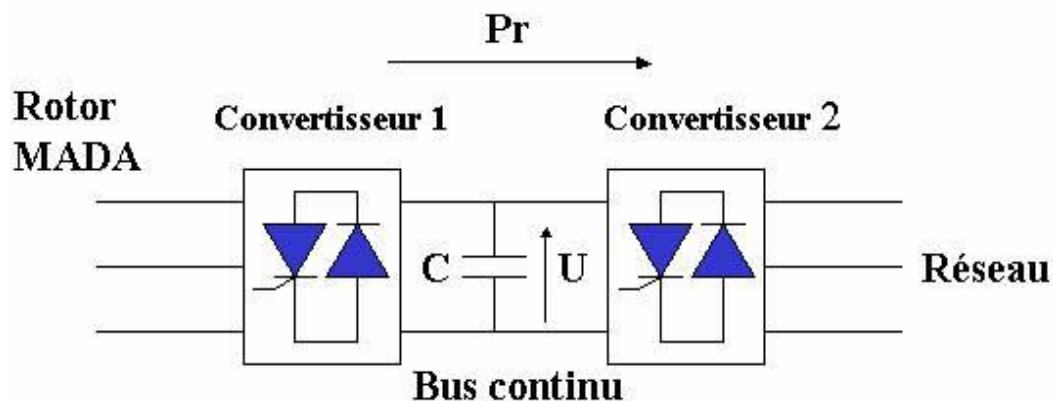
du stator sont directement reliés au réseau.

Le convertisseur statique se compose d'un redresseur, un bus continu et un onduleur. Il est réversible en courant puisque la puissance rotorique (P_r) transitée par le convertisseur dans un sens pour un fonctionnement hypersynchrone, et dans le sens opposé pour un fonctionnement hyposynchrone. L'onduleur devient redresseur et le redresseur devient onduleur.

Sachant que ($P_r = g \cdot p_s$), et que généralement, la valeur absolue du glissement ' g ' est très inférieur à 1, p_r est seulement une fraction de la puissance statorique p_s . Le signe de p_r change avec le glissement g .

On a deux modes de fonctionnement possibles pour la génératrice selon le signe du glissement g .

Sens 1 : Fonctionnement en mode hypersynchrone :

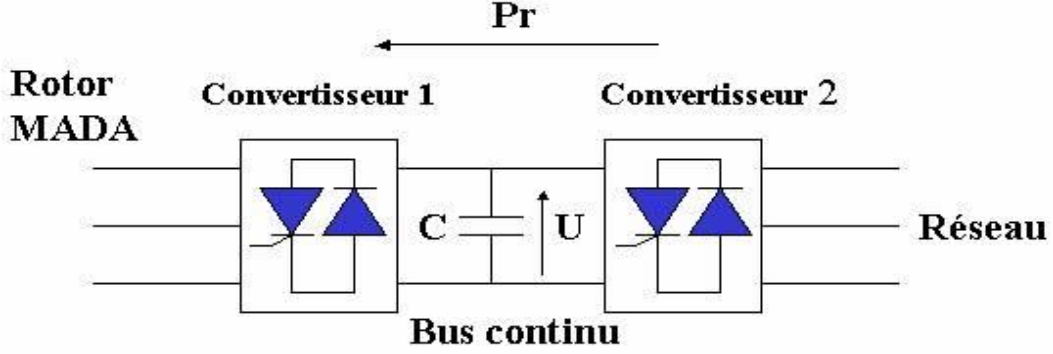


Le convertisseur 1 fonctionne en redresseur. Le redresseur transforme la tension alternative et le courant alternatif délivrés par la MADA en tension continue et courant continu. Le condensateur crée un bus intermédiaire.

Le convertisseur 2 fonctionne en onduleur. L'onduleur récupère cette tension continue et ce courant continu. On règle la commande de l'onduleur pour ajuster et obtenir à la sortie de l'onduleur un signal avec une amplitude et une fréquence adaptées à celles du réseau, après le passage par le transformateur élévateur de tension.

Le passage par le bus continu est indispensable pour permettre à l'onduleur de réguler l'amplitude et la fréquence de la tension de sortie. Le réseau est considéré comme une source de courant, car on prend en compte les inductances du réseau, [3].

Sens 2 : Fonctionnement en mode hyposynchrone :



Le convertisseur 2 fonctionne comme redresseur. Il transforme le signal fourni par le réseau en signal continu.

Le convertisseur 1 fonctionne en onduleur. L'onduleur règle l'amplitude et la fréquence du signal à envoyer vers le rotor de la MADA : Il agit sur les tensions aux bornes des circuits rotoriques pour alimenter la machine à courant alternatif, [3].

I.4 Analyse et fonctionnement de la MADA

La MADA est une machine asynchrone à rotor bobiné avec l'enroulement du stator connecté directement au réseau. Le rotor a des enroulements triphasés reliés à un convertisseur de puissance bidirectionnel avec un système ballais bague. Le stator désigné par "s" et le rotor par "r", et par " n_p " le nombre de paires de pôles de la machine, défini par la relation entre la fréquence du stator et du rotor, comme suit :

$$f_s = f_r + n_p f_m \quad (\text{I-1})$$

Avec f_m : la fréquence de rotation du rotor.

Le glissement g est défini par :

$$g = \frac{f_r}{f_s} = \frac{n_s - n_m}{n_s} \quad (\text{I-2})$$

n_m : est la vitesse mécanique du rotor et n_s la vitesse de synchronisme de la MADA donnée par :

$$n_s = \frac{60 \cdot f_s}{n_p} \quad (\text{I-3})$$

Les figures (I-5) et (I-6) représentent l'évolution de la fréquence et de la tension du rotor en fonction du glissement, où le circuit du stator est alimenté directement par le réseau et le rotor en circuit ouvert, ces grandeurs dépendent de la vitesse opérationnelle de la machine, [2].

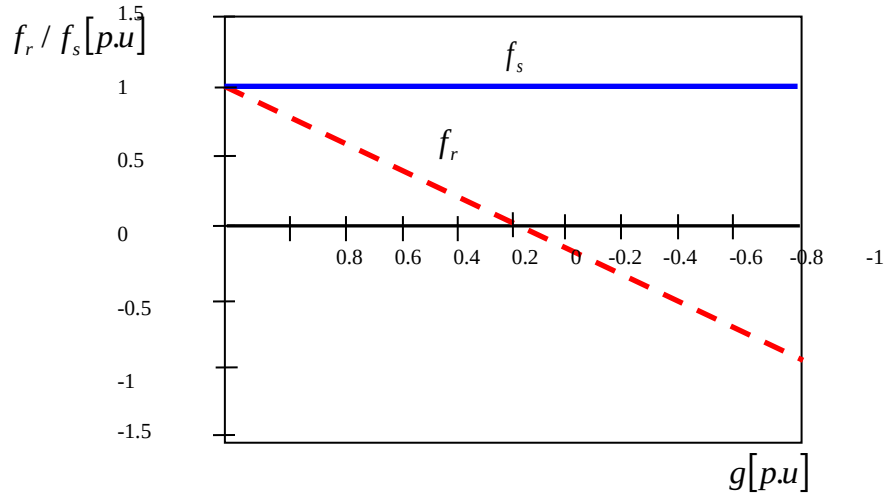


Fig. (I-5) : Fréquences de la MADA en fonction de glissement

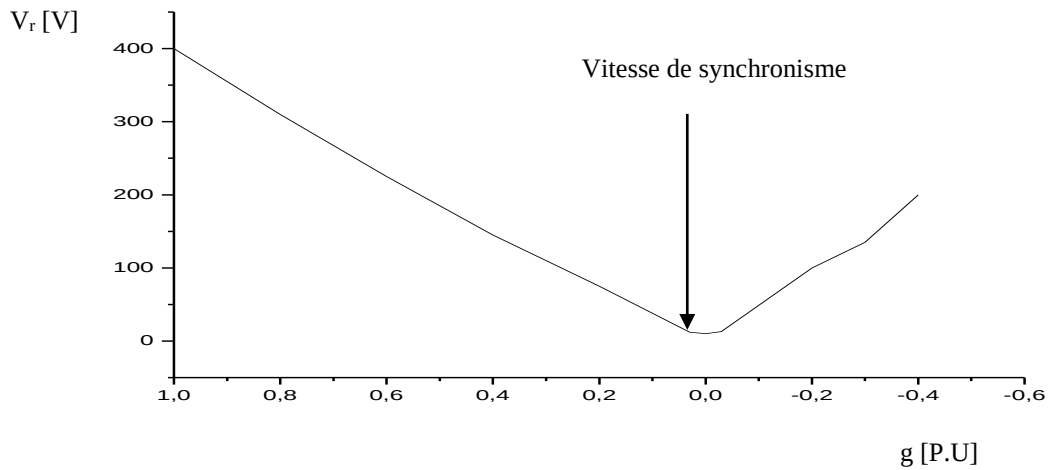


Fig. (I-6) : Tension mesurée du rotor de la MADA en fonction de glissement.

6. Conclusion

A travers la synthèse bibliographique relative à la machine asynchrone à double alimentation nous avons pu noter le rôle de celle-ci et ses avantages par rapport aux autres machines conventionnelles.

La MADA se distingue au plan économique par l'utilisation de convertisseurs de plus faible puissance. Elle a l'avantage d'être flexible d'où le nom de machine généralisée. Le fonctionnement sur les quatre cadrans dans une large gamme de vitesse est l'argument majeur de sa supériorité. Grâce à une commande spécifique cette machine peut être dédiée à l'optimisation des échanges d'énergie d'où son application dans la génération d'énergie éolienne.

La MADA devient une alternative qu'aux autres génératrices de productions d'énergie électrique dans les réseaux isolés mais aussi en tant que génératrice d'appoint lors des pics de consommations. Car dans le cas des groupes électrogènes, le fonctionnement à vitesse variable permet de réduire la consommation du carburant [5].

Etant donné que la structure Scherbius avec convertisseur MLI offre une simplicité de fonctionnement et un faible coût de fabrication et de maintenance, nous nous baserons sur cette dernière dans la suite de notre travail.

Dans le prochain chapitre on va voir la modélisation de la MADA, et leurs courbes qui caractérisent le fonctionnement de cette dernière.

Chapitre 02

Modélisation et Simulation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation

II.1 Introduction :

La modélisation de la machine électrique est une phase primordiale de son développement, les progrès de l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes tel que le logiciel du MATLAB, et d'envisager l'optimisation des machines électriques.

Ainsi, la modélisation de la MADA permet de guider les développements par une quantification des phénomènes. En outre elle est d'un apport précieux en permettant d'une part de restituer une image approximative de ce que l'on peut observer expérimentalement et d'autre part de prévoir les comportements de la MADA, plus variés que ceux de l'observation expérimentale.

Pour obtenir le modèle d'un tel système ; trois tâches doivent être accomplies : choisir le modèle, déterminer ses paramètres et enfin vérifier sa validité expérimentalement, dans ce chapitre sera limité par la modélisation et la simulation de la MADA.

II.2 Modèle Mathématique de la MADA:

Mathématiquement, les machines électriques sont représentées par des modèles entres/sorties sous forme de fonction de transfert ou encore sous forme standard d'équations en variable d'état, ou sous forme matricielle. Ce modèle mathématique a pour but de simplifier l'étude de la machine, il est basé sur la transformation des enroulements de la machine originale en des enroulements équivalents du point de vue électrique et magnétique disposés selon des axes fictifs. Cette transformation a pour effet de rendre les inductances propres et mutuelles du modèle indépendantes de la rotation.

II.2.1 Hypothèses de simplification :

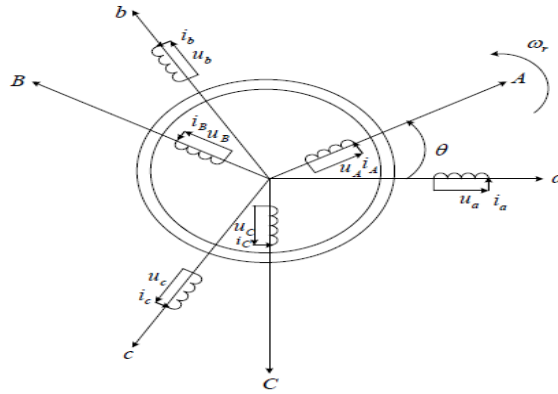
Pour simplifier l'étude de la asynchrone idéalisée machine, on considère les hypothèses simplificatrices suivantes :

- ❖ La parfaite symétrie de la machine tant magnétique qu'électrique.
- ❖ Les forces magnétomotrices créent par chaque phase du stator ou rotor ont une répartition sinusoïdale.
- ❖ L'effet de la variation de la température sur les résistances statorique et rotorique est négligeable.
- ❖ On néglige l'effet de peau.
- ❖ L'entrefer est constant.
- ❖ Le circuit magnétique non saturé et perméabilité constant.
- ❖ Les pertes ferromagnétiques négligeables.

II.2.2 Modèle effectif de la MADA :

La machine asynchrone à double alimentation peut être modélisée par six équations électriques et une seule équation mécanique qui concerne la dynamique du rotor. Elle peut être schématisée par la figure (II.1).

Les phases sont désignées par a, b, c pour le stator et A, B, C pour le rotor. L'angle électrique θ définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases statoriques et rotoriques.



Figure(II.1) Représentation schématique d'une machine asynchrone à double alimentation.

II.2.3 Equations électriques de la MADA :

Les enroulements illustrés par la figure (II.1) obéissent aux équations électriques qui s'écrivent sous la forme matricielle suivante.

$$[U_{abc}] = R_s [i_{abc}] + \frac{d[\phi_{abc}]}{dt} \quad (II.1)$$

$$[U_{ABC}] = R_r [i_{ABC}] + \frac{d[\phi_{ABC}]}{dt} \quad (II.2)$$

Où :

R_s est la résistance d'une phase statorique ;

R_r est la résistance d'une phase rotorique.

Les matrices suivantes représentent respectivement :

$[U_{abc}] = [U_a U_b U_c]^t$: le vecteur des tensions statoriques ;

$[i_{abc}] = [i_a i_b i_c]^t$: le vecteur des courants statoriques ;

$[\phi_{abc}] = [\phi_a \phi_b \phi_c]^t$: le vecteur des flux statoriques.

On définit de même, par changement d'indices, les vecteurs rotoriques :

$[U_{ABC}] = [U_A U_B U_C]^t$: le vecteur des tensions rotoriques ;

$[i_{ABC}] = [i_A i_B i_C]^t$: le vecteur des courants rotoriques ;

$[\phi_{ABC}] = [\phi_A \phi_B \phi_C]^t$: le vecteur des flux rotoriques.

Les équations des flux totalisés couplés avec les phases statoriques et rotoriques, sont données par les expressions suivantes :

Pour le stator :

$$[\phi_{abc}] = [L_s][i_{abc}] + [L_{sr}][i_{ABC}] \quad (\text{II.3})$$

Pour le rotor :

$$[\phi_{ABC}] = [L_r][i_{ABC}] + [L_{sr}][i_{abc}] \quad (\text{II.4})$$

Où : $[L_s]$ est la matrice des inductances statoriques, elle est donnée par :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ab} \\ L_{ab} & L_{aa} & L_{ab} \\ L_{ab} & L_{ab} & L_{aa} \end{bmatrix}$$

$[L_r]$ est la matrice des inductances rotoriques, elle est donnée par :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AB} \\ L_{AB} & L_{AA} & L_{AB} \\ L_{AB} & L_{AB} & L_{AA} \end{bmatrix}$$

Et $[L_{sr}]$ est la matrice des inductances mutuelles, entre le stator et le rotor, elle est donnée par:

$$[L_{sr}] = L_{aA} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta \end{bmatrix}_{AB}$$

Avec :

L_{aa} : C'est l'inductance propre d'une phase statorique ;

L_{ab} : C'est l'inductance mutuelle entre deux phases statoriques ;

L_{AA} : C'est l'inductance propre d'une phase rotorique ;

L_{AB} : C'est l'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques ;

L_{aA} : C'est l'inductance mutuelle maximale entre une phase statorique et une phase rotorique.

En introduisant les équations (II.3) et (II.4) dans les équations (II.1) et (II.2) respectivement, on obtient :

$$[U_{abc}] = R_s[i_{abc}] + [L_s] \frac{d[i_{abc}]}{dt} + \frac{d([L_{sr}][i_{ABC}])}{dt} \quad (\text{II.5})$$

$$[U_{ABC}] = R_r [i_{ABC}] + [L_r] \frac{d[i_{ABC}]}{dt} + \frac{d([L_{sr}]^t [i_{abc}])}{dt} \quad (\text{II.6})$$

La dernière relation importante complétant le modèle de la machine asynchrone à double alimentation, est l'équation fondamentale mécanique décrivant la dynamique du rotor. Cette équation est donnée par :

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} + f_r \Omega_r = C_{em} - C_r \quad (\text{II.7})$$

Où :

J est le moment d'inertie du rotor de la machine en (kg.m²) ;

Ω_r est la vitesse angulaire mécanique du rotor en (rad/s) ;

Avec : $\Omega_r = \frac{\omega_r}{p}$

Tel que :

p : est le nombre de paires de pôles ;

Ω_r : est la vitesse angulaire électrique de rotation du rotor ;

f_r : est le coefficient de frottement en (N.m.s/rd) ;

C_{em} est le couple électromagnétique en (N.m) ;

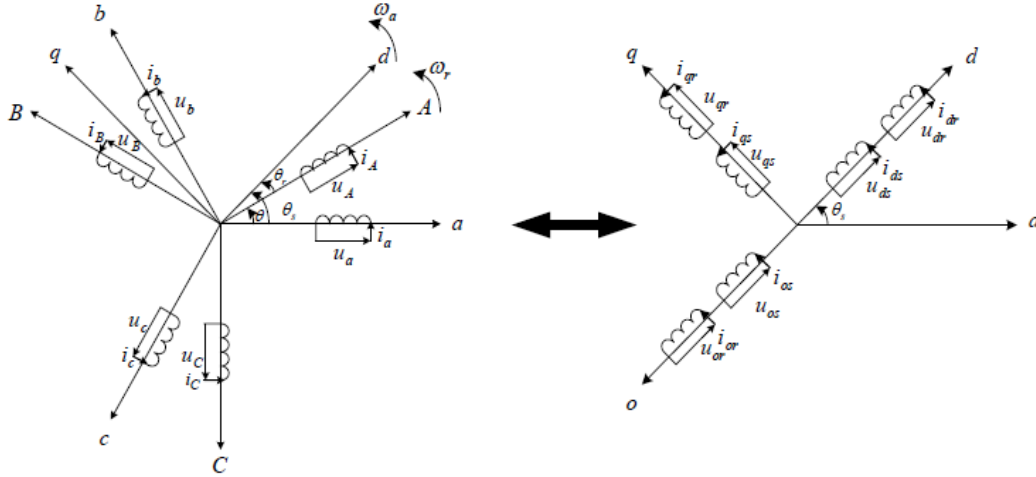
C_r est le couple résistant en (N.m).

Le modèle réel de la machine asynchrone à double alimentation est composé d'un ensemble d'équations différentielles ordinaires à coefficients variables en fonction de l'angle de rotation θ (voir la matrice des inductances mutuelles entre le stator et le rotor). On utilise la transformation de Park qui permet d'obtenir un système d'équations à coefficients constants, en transformant les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents.

II.2.4 Application de la transformation de Park à la MADA:

Transformation de Park consiste à transformer un système d'enroulements triphasés d'axes a, b, c, en un système équivalent à deux enroulements biphasés d'axes d, q créant la même force magnétomotrice. La composante homopolaire intervient pour équilibrer le système transformé, c'est-à-dire, elle ne participe pas à la création de cette fmm de sorte que l'axe homopolaire peut être choisi orthogonal au plan (d,q). La condition de passage du système triphasé au système biphasé est la création d'un champ électromagnétique tournant avec des forces magnétomotrices égales. Ceci conduit à la conservation de puissances instantanées et la réciprocité des inductances mutuelles, et permet d'établir une

expression du couple électromagnétique dans le repère correspondant au système transformé, qui reste invariable pour la machine réelle. Le schéma de la figure (II-2) montre le principe de la transformation de Park appliquée à la machine asynchrone à double alimentation.



Figure(II.2) Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA

Où :

θ : est l'angle entre l'axe rotorique A et l'axe statorique a ;

θ_r : est l'angle entre l'axe rotorique A, et l'axe de Park direct d ;

θ_s : est l'angle entre l'axe statorique a, et l'axe de Park direct d ;

ω_a : est la vitesse angulaire du système d'axes (d, q) ;

ω_r : est la vitesse angulaire électrique rotorique.

Grâce à cette transformation, on définit une matrice unique appelée matrice de Park donnée par :

$$[A] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \psi & \cos\left(\psi + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin \psi & -\sin\left(\psi + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

Les grandeurs statoriques et rotoriques dans le repère de Park sont exprimées en utilisant les deux transformations suivantes :

- Pour le stator :

$$[X_{dqs}]_s = [A_s][X_{abc}] \quad (II.8)$$

-Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} X_{dqo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{ABC} \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Telle que X est une grandeur qui peut être une tension U, un courant I, ou un flux ϕ .

Avec :

$$\begin{bmatrix} A_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(\psi = \theta_s) \end{bmatrix} \text{ et } \begin{bmatrix} A_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(\psi = \theta_r) \end{bmatrix}.$$

II.2.5 Mise en équation de la MADA dans le repère de Park:

Dans le repère de Park, on a les transformations suivantes :

- Pour les tensions :

$$\begin{bmatrix} U_{dqo} \end{bmatrix}_s = \begin{bmatrix} A_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{abc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

$$\begin{bmatrix} U_{dqo} \end{bmatrix}_r = \begin{bmatrix} A_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{ABC} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

- Pour les courants :

$$\begin{bmatrix} i_{dqo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

$$\begin{bmatrix} i_{dqo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ABC} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

- Pour les flux :

$$\begin{bmatrix} \phi_{dqo} \end{bmatrix}_s = \begin{bmatrix} A_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{abc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

$$\begin{bmatrix} \phi_{dqo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{ABC} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

II.2.5.1 Equations des tensions:

Pour le stator, on a :

$$\begin{bmatrix} U_{abc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{abc} \end{bmatrix} + \frac{d[\phi_{abc}]}{dt} \quad (\text{II.16})$$

En multipliant l'équation (II.16) par la matrice $\begin{bmatrix} A_s \end{bmatrix}$, il vient :

$$\begin{bmatrix} A_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_s \end{bmatrix} R_s \begin{bmatrix} i_{abc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_s \end{bmatrix} \frac{d[\phi_{abc}]}{dt} \quad (\text{II.17})$$

Alors :

$$\begin{bmatrix} U_{dqo} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{dqo} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_s \end{bmatrix} \frac{d[\phi_{abc}]}{dt} \quad (\text{II.18})$$

Le développement de l'équation (II.18) donne :

$$U_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_a \phi_{qs} \quad (\text{II.19})$$

$$U_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} - \omega_a \phi_{ds} \quad (\text{II.20})$$

$$U_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\phi_{os}}{dt} \quad (\text{II.21})$$

Où : $\omega_a = \frac{d\theta_s}{dt}$ est la vitesse angulaire du système d'axes (d,q).

En procédant d'une façon analogue à celle du stator, on trouve pour le rotor :

$$U_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_a - \omega_r) \phi_{qr} \quad (\text{II.22})$$

$$U_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_a - \omega_r) \phi_{dr} \quad (\text{II.23})$$

$$U_{or} = R_r i_{or} + \frac{d\phi_{or}}{dt} \quad (\text{II.24})$$

II.2.5.2 Equations des flux :

Pour le stator, en multipliant l'équation (II.3) par $[A_s]$ on trouve :

$$[A_s] [\phi_{abc}] = [A_s] [L_s] [i_{abc}] + [A_s] [L_{sr}] [i_{ABC}] \quad (\text{II.25})$$

Donc :

$$[\phi_{dqo}] = [A_s] [L_s] [i_{abc}] + [A_s] [L_{sr}] [i_{ABC}] \quad (\text{II.26})$$

Après la simplification, on trouve :

$$\phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \quad (\text{II.27})$$

$$\phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \quad (\text{II.28})$$

$$\phi_{os} = L_s i_{os} \quad (\text{II.29})$$

Pour le rotor, et de la même manière, on trouve :

$$\phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \quad (\text{II.30})$$

$$\phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \quad (\text{II.31})$$

$$\phi_{or} = L_r i_{or} \quad (\text{II.32})$$

Avec :

$L_s = L_{aa} - L_{ab}$: est l'inductance cyclique statorique ;

$L_{os} = L_{aa} + 2 L_{ab}$: est l'inductance homopolaire statorique ;

$M = \frac{2}{3} L_{aA}$: est l'inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor ;

$L_r = L_{AA} - L_{AB}$: est l'inductance cyclique rotorique ;

$L_{or} = L_{AA} + 2 L_{AB}$: est l'inductance homopolaire rotorique

Jusqu'à maintenant, le modèle de Park n'est pas complètement défini, puisque la vitesse de rotation ω_a du repère (d,q) par rapport au stator est quelconque. Les équations des tensions sont affectées, par le choix du référentiel, c'est-à-dire de la vitesse de rotation ω_a .

II.2.5.3 Choix du référentiel :

En général, l'étude du comportement dynamique des machines électriques peut se faire suivant la transformation de Park pour différents référentiels. Le choix du référentiel s'effectue suivant le phénomène à étudier et les simplifications offertes par ce choix. Trois types de référentiels sont intéressants en pratique :

- **Référentiel lié au stator** : Ce référentiel est appelé aussi système d'axes (α, β). Dans ce cas, ($\omega_a = 0$). Ce système est utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines électriques [4]. Les équations électriques de la machine deviennent :

Au stator :

$$U_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} \quad (\text{II.33})$$

$$U_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} \quad (\text{II.34})$$

$$U_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\phi_{os}}{dt} \quad (\text{II.35})$$

Au rotor :

$$U_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \omega_r \phi_{qr} \quad (\text{II.36})$$

$$U_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \omega_r \phi_{dr} \quad (\text{II.37})$$

$$U_{or} = R_r i_{or} + \frac{d\phi_{or}}{dt} \quad (\text{II.38})$$

- **Référentiel lié au rotor** : Dans ce cas, le système d'axes (d,q) est immobile par rapport au rotor et tourne avec la vitesse ($\omega_a = \omega_r$). Ce système d'axes est utilisé pour étudier les processus transitoires dans les machines synchrones et asynchrones avec une connexion non symétrique des circuits du rotor [4].

Les équations électriques de la machine dans ce référentiel deviennent :

Au stator :

$$U_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_r \phi_{qs} \quad (\text{II.39})$$

$$U_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_r \phi_{ds} \quad (\text{II.40})$$

$$U_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\phi_{os}}{dt} \quad (\text{II.41})$$

Au rotor :

$$U_{dr} = R_s i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} \quad (\text{II.42})$$

$$U_{qr} = R_s i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} \quad (\text{II.43})$$

$$U_{or} = R_s i_{or} + \frac{d\phi_{or}}{dt} \quad (\text{II.44})$$

-Référentiel lié au champ tournant :

Ce référentiel est appelé aussi système d'axes(X,Y) il tourne avec la vitesse du champ électromagnétique, c'est-à-dire($\omega_a=\omega_s$) les équations électriques deviennent :

Au stator :

$$U_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \quad (\text{II.45})$$

$$U_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \quad (\text{II.46})$$

$$U_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\phi_{os}}{dt} \quad (\text{II.47})$$

Au rotor :

$$U_{dr} = R_s i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \quad (\text{II.48})$$

$$U_{qr} = R_s i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} \quad (\text{II.49})$$

$$U_{or} = R_s i_{or} + \frac{d\phi_{or}}{dt} \quad (\text{II.50})$$

II.2.5.4 Expression du couple électromagnétique de la MADA dans le repère de Park :

Pour étudier les phénomènes transitoires (démarrage, freinage, variation de la charge) avec une vitesse rotorique variable, il faut ajouter l'équation du mouvement (II.7) au système d'équations différentielles modélisant la machine [6].

La forme générale du couple électromagnétique d'une machine asynchrone triphasée modélisée dans le repère de Park est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = \frac{3pM}{2L_r} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) = \frac{3p}{2} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) \quad (II.51)$$

II.3 Modèle de la MADA dans le repère de Park sous forme d'état :

Pour la machine asynchrone à double alimentation les variables de contrôle sont les tensions statorique et rotorique. En considérant les courants statorique et rotorique comme des vecteurs d'état, alors le modèle de la MADA est par l'équation d'état suivante:

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} = A.X + B.U \quad (II.52)$$

Avec:

X : Vecteur d'état.

A : Matrice d'évolution d'état du système.

B : Matrice de commande.

U : Vecteur du système de commande.

Où:

$$X = [i_{sd} \ i_{sq} \ i_{rd} \ i_{rq}]^T ;$$

$$U = [V_{sd} \ V_{sq} \ V_{rd} \ V_{rq}]^T ;$$

Pour la représentation matricielle:

$$\begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & -\omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega) M & -R_r & (\omega_s - \omega) L_r \\ -(\omega_s - \omega) M & 0 & -(\omega_s - \omega) L_r & -R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & -\omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega) M & -R_r & (\omega_s - \omega) L_r \\ -(\omega_s - \omega) M & 0 & -(\omega_s - \omega) L_r & -R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} \quad (II.53)
\end{aligned}$$

On pose:

$$\begin{aligned}
[L] &= \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \\
[Z] &= \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & -\omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega) M & -R_r & (\omega_s - \omega) L_r \\ -(\omega_s - \omega) M & 0 & -(\omega_s - \omega) L_r & -R_r \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Alors l'équation (II.33) dévient:

$$\frac{dX}{dt} = [L]^{-1} \cdot [Z] \cdot X + [L]^{-1} U \quad (II.54)$$

Par analogie de l'équation II.48 avec l'équation II.45 on trouve:

$$A = [L]^{-1} [Z]$$

$$B = [L]^{-1}$$

La matrice $[Z]$ peut être écrite comme suit:

Dans le but de simplifier la réalisation par SIMULINK/MATLAB la matrice $[Z]$ peut être décomposée de la forme suivante:

$$[Z] = -[Z_1] - \omega \cdot [Z_2] + \omega_s \cdot [Z_3]$$

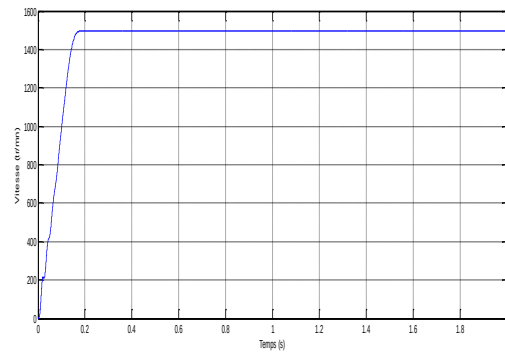
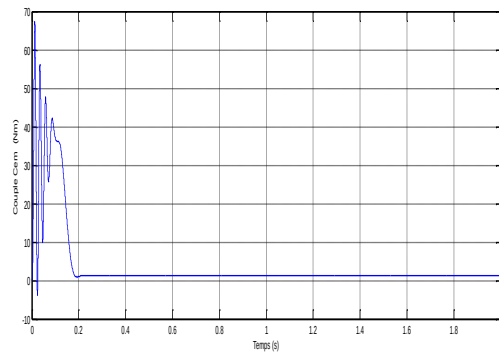
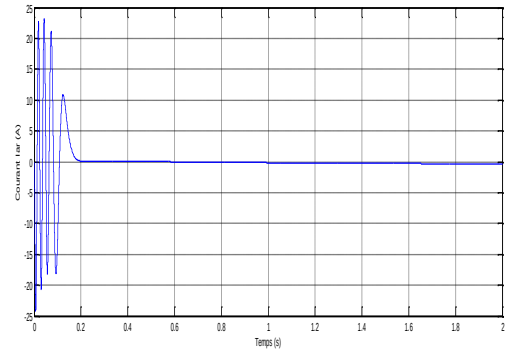
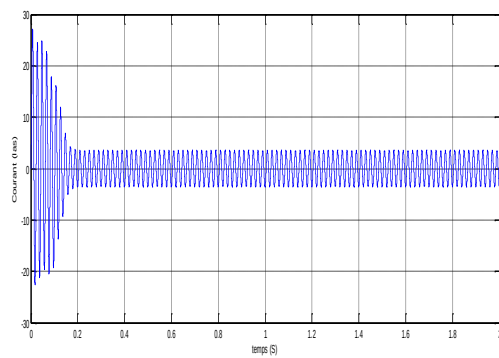
Avec :

$$[Z_1] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}, [Z_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix}, [Z_3] = \begin{bmatrix} 0 & L_s & 0 & M \\ -L_s & 0 & -M & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix}$$

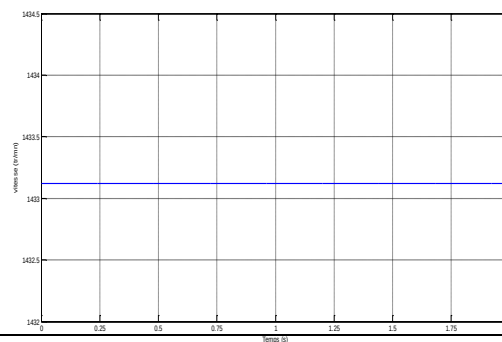
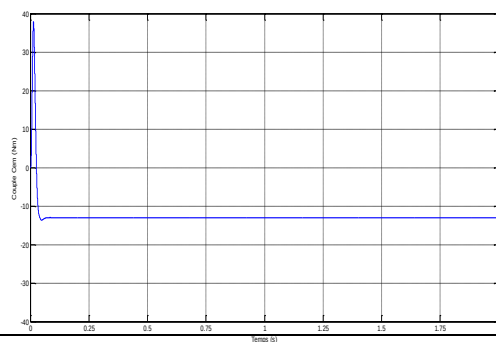
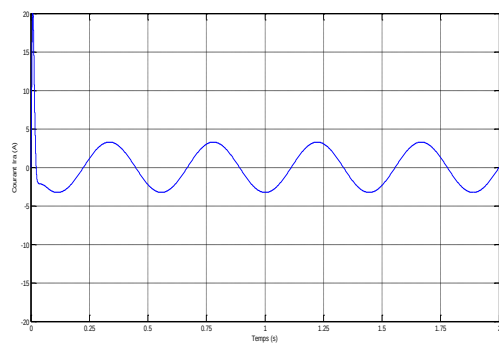
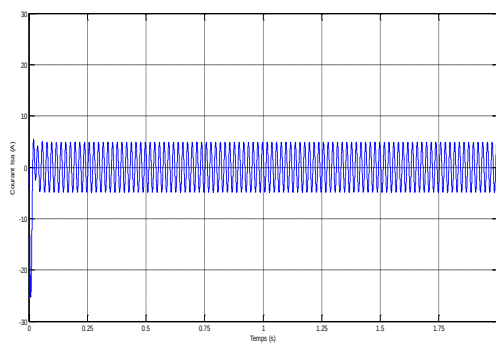
Résultats de simulation de la MADA

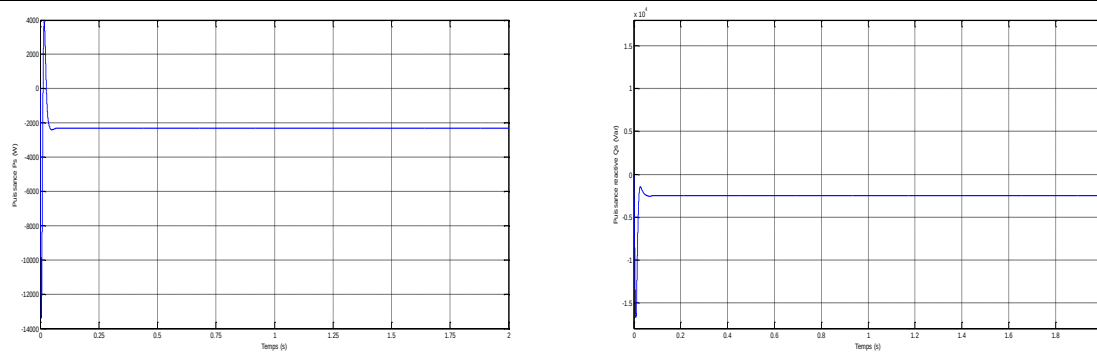
$f_r = f_n = 3 \text{ Hz}$ pour une tension $U_r = 0 \text{ V}$.

A-MADA en Fonctionnement moteur :



B- MADA en Fonctionnement générateur :





Interprétation des résultats

a) En fonctionnement moteur :

En pratique, si la fréquence peut être régulée dans une large plage, il est recommandé de varier la tension dans une marge ne dépassent pas les 25v.

b) En fonctionnement génératrice :

Les figures ci-dessus qui sont obtenus lors fonctionnement générateur ,a entrainée à une vitesse fixe égale à 1432 tr/min,alimentée directement par une source de tension triphasée parfaite au niveau du stator avec une fréquence du réseau qui est 50Hz et d'amplitude de 220v.

Les résultats de simulation obtenus montrent que pendant le régime dynamique,la puissance délivrée au réseau est négatif attient au démarrage une valeur maximale11.94KW.On constate ainsi l'importance des courants statoriques et rotoriques pendant le démarrage,après un temps égale à environs 0.05s,ils se stabilisent et prennent leurs formes sinusiales avec une fréquence de 50Hz pour les courants statoriques.

II.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons vu que la machine asynchrone à double alimentation, a été ramenée à une machine biphasée équivalente à l'aide de la transformation de Park permettant le passage d'un repère triphasé à un autre biphasé.

D'autre part, cette étude constitue une contribution à l'introduction des outils des simulations numériques utilisées dans les études des comportements des moteurs asynchrones lorsque ce dernier est soumis à une modification de leurs conditions de fonctionnement.

Par ailleurs, en ce qui concerne le diagnostic des défaillances du moteur asynchrones, la détection des défauts au niveau de ce dernier, peut se manifester par l'évolution des grandeurs représentant le comportement électrique et mécanique à savoir, les courants statoriques, flux, le couple et la vitesse. Pour cela il faut tenir compte de l'évolution du signal (ou signaux) qui reflète (ent) d'une manière plus précise l'état de notre moteur.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le but de ce mémoire reste l'exploration des possibilités d'introduction de la MADA dans des applications éoliennes. Pour cela on a traité les aspects qui englobent le développement d'un tel système : l'état de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne, la modélisation, l'analyse de fonctionnement.

En premier lieu, notre étude a été orientée vers la connaissance du système d'énergie éolienne, puis la connaissance de la MADA, ce dernier a été modélisé où le stator est alimenté par une source de tension constante et au rotor par une source de tension supposée parfaite, équilibrée ; sinusoïdale, d'amplitude et de fréquence réglable à partir de ses équations (électrique, mécanique), le but assigné de cette modélisation est d'avoir l'influence des variations appliquées aux tensions rotorique, fréquence rotorique et couple résistant.

Suite aux résultats obtenus dans cette étude, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement de la MADA sont envisageables :

- Etablissement d'un modèle de la MADA prenant en compte la résistance de phase statorique et la saturation magnétique.
 - Utilisation d'autres types de régulateurs plus performants dans la commande du dispositif.
 - Utilisation d'un algorithme de maximisation de la puissance captée par différentes techniques : Logique floue, réseau de neurones.
 - L'intégration d'un système de stockage inertiel.
 - L'étude des perturbations de la production de l'énergie éolienne vis à vis des déséquilibres du réseau.
-

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A.MERICKI, *"Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance"*, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 5 avril 2005.

- [2] D.BENACHOUR, El Watan, 30 novembre 2006.

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

- [4] D.LE GOURIERE, *"Energie éolienne"*, éditions EYROLLES, pp 28-31.

- [5] F.POITIER, *"Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne"*, thèse de doctorat, Université de Nantes, 19 décembre 2003.

- [6] G. SEGUIER, *"Electrotechnique industrielle"*, éditions TEC & DOC, pp 513-514.

- [7] L.BAGHLI, *"Modélisation et commande de la machine asynchrone"*, notes de cours de l'IUFM de Lorraine – Nancy 1, non édité, France, 2005.

- [8] I.HAMZAOUI, *"Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur"*, mémoire de magistère, ENP, Janvier 2008.