

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE DE JIJEL



FACULTE DES  
SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
Département d'Electrotechnique

Projet de fin d'Etudes pour l'obtention du Diplôme  
de Master en Electrotechnique

Option : commande des systèmes électriques

Thème :

Commande de la génératrice asynchrone

à double alimentation par un convertisseur rotorique

Proposé par :

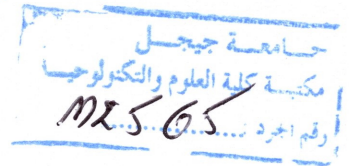
Mr : B.Medjahed

Réalisé par :

Djouhar Abdessalam

Lahlou Nadjib

Promotion : Juin 2016





## *Remerciements*

*Avant tout, nous remercions Dieu Le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience, et la santé durant toutes ces longues années d'étude. Nous tenons à exprimé nos sincères remerciements à tous nos enseignants de L'université de JIJEL, notamment à notre Notre enseignant et promoteur Mr. Boubakeur Medjahed, d'avoir proposé le sujet sur lequel nous avons travaillé, et qui a assuré la direction et l'encadrement du travail présenté dans ce mémoire. Nous tenons aussi à remercier les membres du jury d'examen, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail. Enfin, Nos remerciements vont à tous ceux qui ont soutenu de près ou de loin à réussir ce travail.*

*Nos vives salutations.*



## Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

- Aux êtres les plus chers à mon cœur, ma mère et mon père, qui m'ont beaucoup soutenu durant mon cursus d'étude et à qui je serai éternellement reconnaissant ;
  - A ma chère sœur;
  - A mes frères ;
- A mon encadreur Monsieur Boubakeur Medjahed pour son amabilité et sa disponibilité ;
- A tous les enseignants qui m'ont aidé de près ou de loin à obtenir mon master en électrotechnique ;
  - A tous mes amis ;
- Enfin à tous ceux et celles qui m'ont encouragé et soutenu.

Djouhar abdessalam

Jijel ,Juin 2016

# Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

- Aux êtres les plus chers à mon cœur, ma mère et mon père, qui m'ont beaucoup soutenu durant mon cursus d'étude et à qui je serai éternellement reconnaissant ;
  - A mes chères sœurs ;
  - A mes frères ;
- A mon encadreur Monsieur Boubakeur Medjahed pour son amabilité et sa disponibilité ;
- A tous les enseignants qui m'ont aidé de près ou de loin à obtenir mon master en électrotechnique ;
  - A tous mes amis ;
- Enfin à tous ceux et celles qui m'ont encouragé et soutenu.

Nadjib LAHLOU

Jijel ,Juin 2016



# Sommaire

## **sommaire**

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## **chapitre I**

### **L'état de l'art sur les systèmes éoliens**

I.1.Introduction.....	2
I.2. Description d'un système éolien.....	2
I.2.1. Définition de l'énergie éolienne.....	2
I.2.2. Les différents types des éoliennes.....	3
I.2.2.1. Le type à axe vertical .....	3
I.2.2.2. Le type à axe horizontal.....	4
I.2.3. Les composants d'un système éolien.....	5
I.2.3.1. Le mât.....	6
I.2.3.2. La nacelle.....	6
I.2.3.3. Ensemble (rotor-pales).....	7
I.2.4. principe de fonctionnement .....	8
I.3. Les avantages et les inconvénients des systèmes éoliens.....	9
I.3.1. Les avantages .....	9
I.3.2. Les inconvénients .....	9
I.4. l'énergie cinétique du vent et la production d'énergie mécanique.....	10
I.4.1. Puissance récupérable .....	11
I.5. Régulation de la puissance d'une éolienne .....	11

I.6. Les différentes technologies d'éoliennes.....	12
I.6.1. Les éoliennes à vitesse fixe .....	12
I.6.1.1. Les avantages de la vitesse fixe.....	12
I.6.1.2. Les inconvénients de la vitesse fixe.....	12
I.6.2. Les éoliennes à vitesse variable .....	13
I.6.2.1. Les avantages de la vitesse variable.....	13
I.6.2.2. Les inconvénients de la vitesse variable.....	13
I.7. Les types des machines utilisées.....	13
I.7.1. Machine synchrone.....	14
I.7.2. la machine asynchrone.....	14
I.7.3. Machine asynchrone à double alimentation .....	14
I.8 Avantages et inconvénients de la MADA.....	15
I.8.1 Avantages de la MADA .....	15
I.8.2 Inconvénients de la MADA .....	16
I.9 Conclusion.....	16

## **Chapitre II**

### **Modélisation de la MADA et du convertisseur rotorique**

II.1 Introduction .....	17
II.2 Structure de la MADA .....	17
II.2.1 MADA à rotor bobiné .....	17
II.2.2 MADA sans balais.....	18

II.2.3 MADA en cascade .....	18
II.3. Les différents modes de fonctionnement de la MADA .....	19
II.3.1 Moteur hypo-synchrone .....	19
II.3.2. Moteur hyper-synchrone .....	19
II.3.3. Générateur hypo-synchrone .....	20
II.3.4. Générateur hyper-synchrone .....	20
II.4 Hypothèses simplificatrices .....	20
II.5. Modélisation de la MADA .....	20
II.5.1. Equations générales de la MADA .....	21
II.5.1.1 Equations électriques .....	21
II.5.1.2. Les équations magnétiques .....	21
II.5.1.3. L'équations mécanique .....	22
II.6. La transformation de PARK .....	23
II.6.1 Matrice de Park .....	23
II.6.2 Application de la transformation de Park .....	24
II.7 Choix du référentiel .....	26
II.7.1 Modèle de la MADA liés au champ tournant .....	26
II.8 Simulation de la MADA .....	27
II.8.1 Résultats de simulation.....	28
II.9 Les convertisseurs utilisés .....	29
II.9.1 convertisseur AC/DC/AC avec stockage.....	29
II.9.2 Convertisseurs AC /AC sans stockage.....	29
II.9.2.1 Convertisseur matriciel .....	30

# *Introduction générale*

## Introduction générale

L'énergie électrique est le pilier de notre société moderne. Sans électricité elle serait vraiment « obscure » et ceci sur tous les plans. En outre, c'est une énergie qui est facile à transporter, de ce fait elle devient un élément primordial.[1]

Le vent était à l'origine de l'invention des moulins du même nom dans le but d'en retirer de l'énergie mécanique. Vers le milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle, l'arrivée des machines à vapeur industrielles ont « exterminées » les moulins à vent.

En 1974, avec la crise pétrolière, des études et des expériences sur les éoliennes ont été effectuées afin de palier à ce manque d'énergie. D'autant plus que les besoins de la société a considérablement augmenté.

N'oublions pas aussi que l'exploitation pétrolière ne peut durer indéfiniment ce qui prévoit une pénurie de pétrole, par conséquent d'énergie, d'où la nécessité de prendre très au sérieux l'importance des éoliennes et de mettre l'accent sur son développement.

Bien que certains pays se seraient tournés vers d'autres formes d'énergie renouvelables, faisant appel d'une manière directe ou indirecte à l'énergie solaire, il semble que l'éolien détrône considérablement cette énergie et ceci comme énergie d'appoint complémentaire à l'énergie nucléaire.

Cette énergie potentielle va être utilisée pour produire de l'énergie électrique suivant le schéma des centrales électriques.

Notre travail consiste à parler de la modélisation et la simulation de la commande électrique d'une machine asynchrone à double alimentation dans le cadre de la commande vectorielle directe d'une génératrice asynchrone à double alimentation pour la production de l'énergie éolienne.

Ce travail se répartit comme suit :

- Le premier chapitre est un aperçu théorique sur la conversion éolienne
- Dans le second chapitre, on donnera une étude sur modélisation de la machine asynchrone et de l'onduleur.
- Le troisième chapitre est consacré à la commande des puissances : active et réactive par un convertisseur rotorique.
- Finalement, une conclusion générale synthétisera les points les plus marquants.



# Chapitre I

L'état de l'art sur les systèmes éoliens

## **I.1. Introduction**

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme, comme le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre et de la biomasse, ces sources permettant de la production décentralisée de l'électricité, peuvent contribuer à résoudre le problème de l'électrification des sites isolés où un grand nombre d'individus est dépourvu de tout apport énergétique [1].

Parmi toutes les énergies renouvelables l'éolien représente la vedette, elle est l'une des plus prometteuses, l'utilisation du moulin à vent c'est la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. Au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisées avec succès pour générer de l'électricité [2].

Actuellement des plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et pour le rôle de conversion d'énergie cinétique de vent à énergie électrique. Généralement une éolienne doit comporter :

- Une partie électrique qui permet de la contrôler électriquement, machine électrique associée à la commande par exemple ils utilisent des machines synchrones ou asynchrones avec des stratégies de commande de ces machines.
- Une partie mécanique permet de la contrôler mécaniquement (orientation des paliers De l'éolienne, orientation de la nacelle).

Dans ce chapitre nous présentons un état de l'art sur les systèmes éoliens débutant par la définition de ces systèmes et les différents types utilisés essentiellement le type à axe horizontal avec leurs constitutions, ainsi l'étude théorique de la conversion de l'énergie cinétique de vent.

La dernière partie de ce chapitre illustre les différents types de machines électriques utilisés notamment la machines asynchrones à double alimentation.

## **I.2. Description d'un système éolien**

### **I.2.1. Définition de l'énergie éolienne**

L'aérogénérateur ou éolienne est un dispositif que transforme l'énergie cinétique de vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique, disponible sur un arbre qui transmise le mouvement puis en énergie électrique avec un générateur électromagnétique.

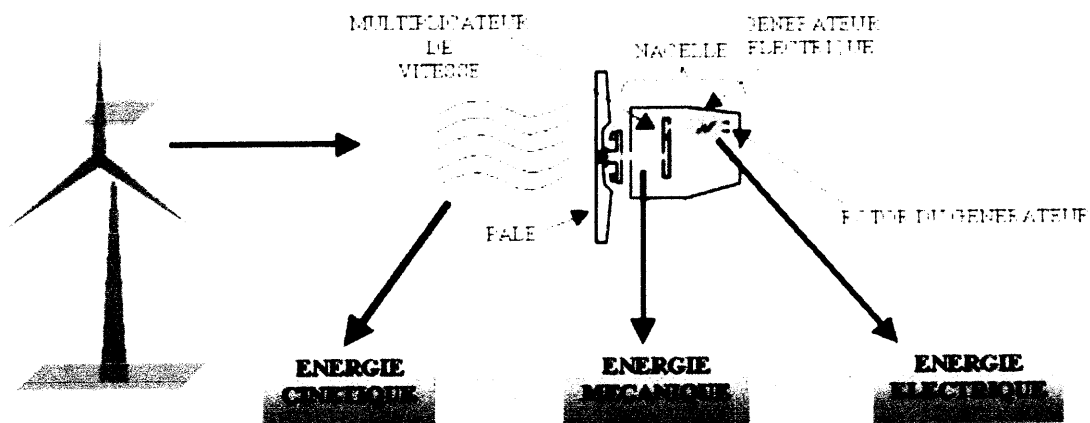


Figure I.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent.

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, Le vent est une ressource propre et inépuisable qui peut produire d'électricité pratiquement sans l'émission des gaz polluants [3], 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 (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences.

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie thermique en générale (nucléaire , gaz et vapeur...) 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 en mer où la présence du vent est plus régulière.

## I.2.2. Les différents types des éoliennes

### I.2.2.1. Le type à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité, il a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et possède l'avantage d'avoir les organes de

commande et le générateur au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance donc facilement accessibles[4].

Cependant, ceci ne constitue qu'un inconvénient mineur dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau, Contrairement il aussi possède nombres de désavantage comme :

- L'efficacité globale de ce type n'est pas impressionnante.
- L'éolienne ne démarre pas automatiquement, parce qu'il est alors possible d'utiliser la génératrice comme un moteur absorbant du courant du réseau pour démarrer l'éolienne.

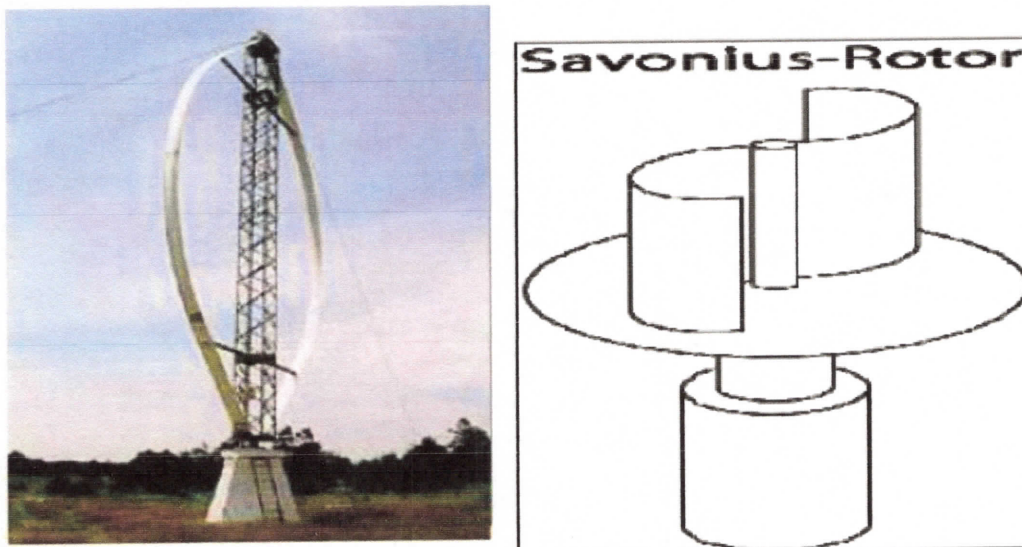


Figure I.2: Différents type des éoliennes à axe vertical type "Darrieus et Savonius".

#### I.2.2.2. Le type à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal beaucoup plus largement employées, elles besoin souvent un mécanisme d'orientation des pales, dans ces types d'éolienne l'arbre est parallèle au sol, Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie entre 1 et 3 ou multi-pales, généralement 80% sont des aérogénérateurs tripales.

Ce type présente un rendement aérodynamique plus élevé, démarrant de façon autonome et présente un faible encombrement au niveau du sol.

Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale.



Figure I.3: Éolienne à axe horizontal.

On peut distinguer les capteurs éoliens dont l'hélice est en amont par rapport au vent, « hélice au vent » et ceux dont l'hélice est en aval par rapport au vent, « hélice sous le vent » [5].

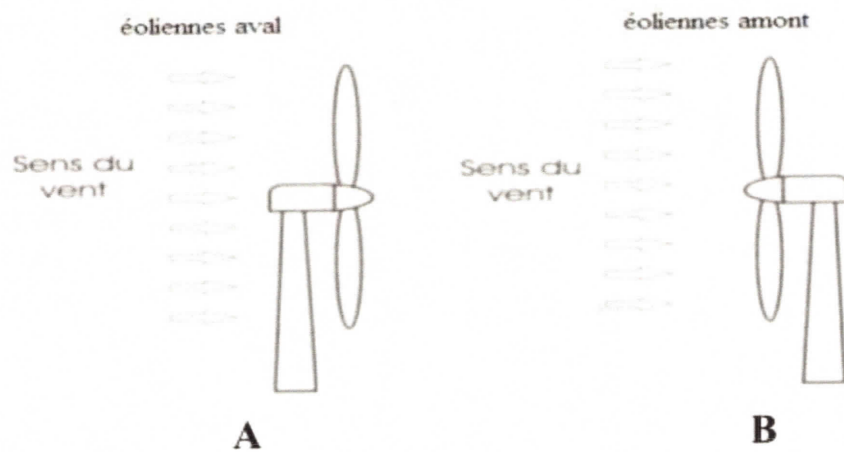


Figure I.4: Capteurs à axe horizontal.

### I.2.3. Les composants d'un système éolien

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux (figure I.6.).

- le mât.
- la nacelle.
- ensemble (rotor-pales).

### I.2.3.1. Le mât

Ou le tour, généralement un tube d'acier d'une hauteur comprise entre 60 et 100 m, il doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol, où à l'intérieur sont disposés les câbles de transport d'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'accès à la nacelle [4].

### I.2.3.2. La nacelle

Elle regroupe tout le système de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique et divers actionneurs de commande.

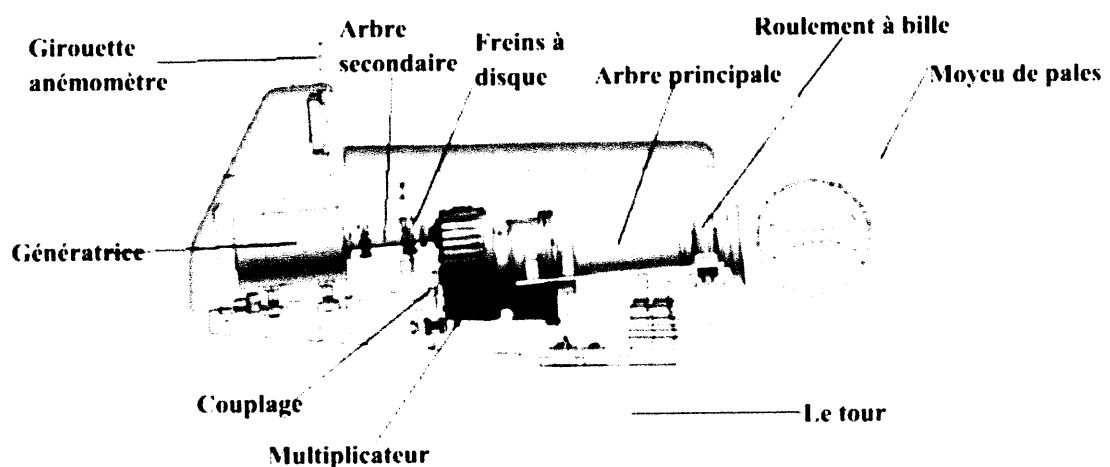


Figure I.5: Les constitutions d'une nacelle.

Les différents composants d'une nacelle [6] :

- **Le multiplicateur de vitesse** : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique (aux environs de 1500tr/min).
- **L'arbre secondaire** : comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor en cas de de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.
- **La génératrice** : c'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
- **Un contrôleur électronique** : chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. (le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble« rotor plus nacelle » face au vent) le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent).



### I.2.3.3. Ensemble (rotor-pales)

Le rotor de l'aérogénérateur est constitué de pales qui sont elles-mêmes montées sur un moyeu. Le rôle essentiel du rotor est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique,

Le diamètre du cercle formé par les pales du rotor détermine la quantité d'énergie pouvant être extraite du vent et par conséquent la puissance générée par le système, pour cela les éoliennes sont divisées en trois catégories par leur puissance nominale :

- Eoliennes de petite puissance: inférieure à 40 kW
- Eoliennes de moyenne puissance: de 40 à quelques centaines de kW.
- Eoliennes de forte puissance: supérieure à 1 MW.

Le tableau ci-dessous propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice [7].

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délébré
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 kW
Moyenne	12 m à 45 m	De 40 kW à 1 MW
Grande	45 m et plus	1 MW et plus

**Tableau I.2:** Classification des turbines éoliennes.

Le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

Plus le nombre de pale est grand plus le couple de démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite. Les turbines uni et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques, elles ont un rendement énergétique moindre, et sont plus bruyantes puisque elles tournent plus vite.

La figure suivant représente les trois éléments principaux d'une éolienne à axe horizontal.

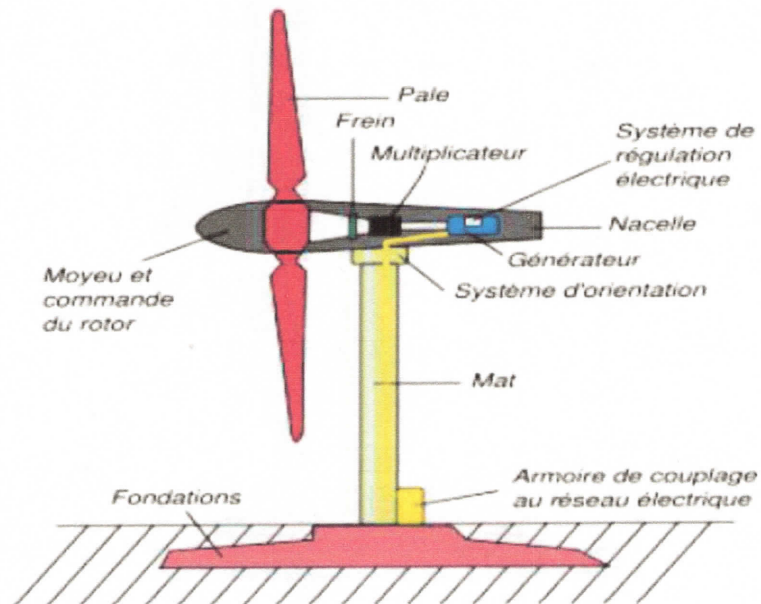


Figure I.6: Schéma générale d'éolienne à axe horizontal.

#### I.2.4. principe de fonctionnement

L'éolienne en générale consistée une partie mobile, le rotor qui tourne par l'effet de vent et transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique, avec l'arbre principal la vitesse de rotation du rotor (de 12 à 15 tours/minute) et doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tours/minute, cette vitesse assuré un bon fonctionnement de la génératrice qui produit l'électricité.

Par les convertisseurs de puissance on peut ajuster la fréquence du courant produit par la génératrice et permettant au rotor tourne en vitesse variable en fonction de vitesse de vent. La tension de l'électricité produite par le génératrice de l'ordre de 600 à 1000 volts, est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à sous du mât, jusqu'à un niveau de 20 ou 30 KV et puis couplée avec le réseau électrique.

Pour le démarrage, une éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimale de 10 à 15 km/h. Et au-delà de 90 km/h, les turbines s'arrêtent de tourner. Tout 'abord, la fréquence d'occurrence des vents d'une vitesse supérieure à 90 km/h est généralement faible.

Si les éoliennes fonctionnaient dans ces conditions, elles subiraient des efforts importants qui entraîneraient une usure prématurée de leurs équipements, les ingénieurs préfèrent, dans ces cas, stopper les machines et attendre le retour de vents plus modérés [6].

### **I.3. Les avantages et les inconvénients des systèmes éoliens**

#### **I.3.1. Les avantages**

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, écologique, fiable, économique, et inépuisable, c'est une énergie qui respecte l'environnement.
- La production d'énergie éolienne ne produit pas d'émission de CO<sub>2</sub>.
- Chaque mégawatheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0.8 à 0.9 tonne les émissions de CO<sub>2</sub> rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique [3].
- L'énergie éolienne ne produit pas des déchets toxiques ou radioactifs comme l'énergie nucléaire.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie.
- La durée de vie des éoliennes modernes de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à des nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles [8].
- Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2 % du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations.
- En fonctionnement, les éoliennes peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plus part des centrales thermiques et des centrales nucléaires.
- L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple.
- Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique déjà existant [9].

#### **I.3.2. Les inconvénients**

- Les bruits mécaniques, Ils ont un impact visuel nuisible, et peuvent être bruyantes lorsqu'il y a beaucoup de vent.
- La puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne.
- Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques.
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux [8].

### I.4. l'énergie cinétique du vent et la production d'énergie mécanique

Afin de déterminer la puissance de ces éoliennes, nous devons déterminer l'énergie cinétique du vent auquel est soumise l'éolienne.

Nous utiliserons donc la formule de l'énergie cinétique :

$$E_c = \frac{1}{2} m \vartheta^2 \quad (I.1)$$

Avec :

$$m = \rho v \quad (I.2)$$

Où :

$E_c$  : Energie cinétique en Joule (J).

$m$  : Masse du volume d'air en Kg.

$\vartheta$  : Vitesse instantanée du vent en m/s.

$\rho$  : Masse volumique en  $\text{kg/m}^3$ .

$v$  : Le volume d'air en  $\text{m}^3$ .

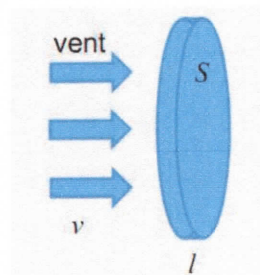


Figure I.7 : Surface de section  $S$  traversée par un vent de vitesse  $\vartheta$  pendant un temps  $t$ .

$$v = Sl \quad (I.3)$$

Et :

$$l = \vartheta t \quad (I.4)$$

D'où :

$$E_c = \frac{1}{2} \rho v \theta^2 = \frac{1}{2} \rho S \theta^3 t \quad (1.5)$$

Puissance du vent :

$$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \rho v \theta^3 \quad (1.6)$$

#### I.4.1. Puissance récupérable

La puissance récupérable est inférieure, car le vent garde malgré tout une vitesse bien qu'il soit ralenti par l'éolienne. La formule telle que, serait valable dans le cas où l'éolienne arrêterait totalement le vent, or ce n'est pas le cas.

Si toute cette énergie était captée, il n'y aurait plus de vent derrière les pales de l'hélice, ce qui n'est jamais le cas. Albert Betz, un scientifique allemand, a montré que le maximum d'énergie récupérable est égal à 16/27 de la puissance théoriquement récupérable, c'est-à-dire environ 59%.

La puissance maximale théorique récupérable est donc:

$$P_{\text{max}} = \frac{16}{27} P_{\text{vent}} = 0,59 P_{\text{vent}} = 0,59 \left( \frac{1}{2} \rho S \theta^3 \right) \quad (1.7)$$

La puissance en sortie de la génératrice :

$$P_{\text{généré}} = \left( \frac{1}{2} \rho S \theta^3 \right) C_p \quad (1.8)$$

Où :  $C_p$  est le coefficient de performance.

#### I.5. Régulation de la puissance d'une éolienne

Il existe pour une puissance nominale d'éolienne  $P_{\text{nom}}$  une vitesse du vent nominale  $V_n$  pour laquelle l'aérogénérateur est bien dimensionné dans ses divers éléments. C'est pour cela que la turbine éolienne doit modifier ses paramètres afin de maintenir la vitesse à sa valeur nominale et d'éviter toute destruction mécanique.

A côté de la vitesse nominale on spécifie aussi la vitesse de démarrage  $V_d$  et La vitesse maximale du vent  $V_{\text{max}}$  pour laquelle la turbine ne convertit plus d'énergie éolienne, pour des

raisons de sécurité de fonctionnement. Ces trois vitesses définissent quatre zones de fonctionnement sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent [12].

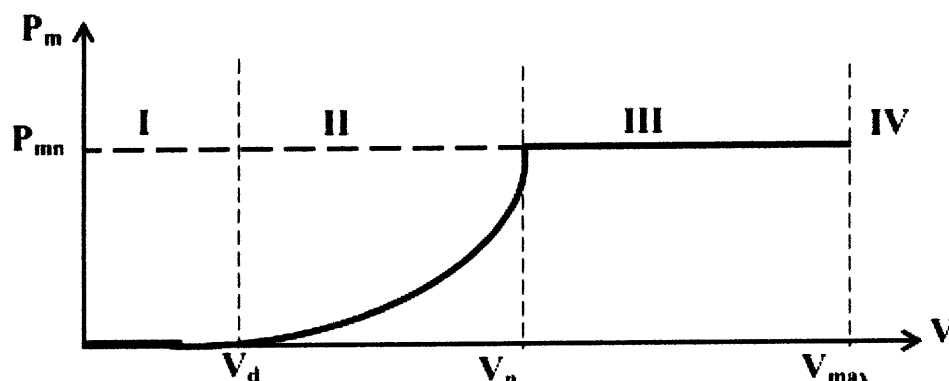


Figure I.8: Puissance en fonction de la vitesse du vent.

- La zone I :  $P_m = 0$  : la turbine ne fonctionne pas.
- La zone II : la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent
- La zone III : la vitesse de rotation est maintenue constante et la puissance  $P_m$  fournie reste égale à  $P_{mn}$ , pour contrôler la puissance aérodynamique capturée et limiter la vitesse du vent dans cette zone on peut utiliser l'une des deux techniques de contrôle "Stall" ou "pitch".
- La zone IV : il faut arrêter le système à cause de la sécurité de fonctionnement.

## I.6. Les différentes technologies d'éoliennes

### I.6.1. Les éoliennes à vitesse fixe

Dans cette technologie, la génératrice est directement couplée au réseau. Sa vitesse est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice.

#### I.6.1.1. Les avantages de la vitesse fixe

- Simplicité de système électrique.
- Utilisation d'une machine standard, robuste et moins cher
- Plus grande fiabilité.
- Pas besoin d'une interface d'électronique de commande.

#### I.6.1.2. Les inconvénients de la vitesse fixe

- Pas de gestion de la puissance extraite.
- Fonctionnement à une plage de vitesse de vent très étroite, donc une production



D'énergie très perturbée.

- Magnétisation de la machine non gérée.

### **I.6.2. Les éoliennes à vitesse variable**

La vitesse variable permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent [5].

Par une interface qui adapte la fréquence des courants du générateur à celle du réseau et permet ainsi de fonctionner à vitesse variable, Les convertisseurs de puissance entre la machine et le réseau permet le découplage de la fréquence du réseau et la vitesse de rotation et ainsi de faire fonctionner l'aérogénérateur à vitesse variable.

#### **I.6.2.1. Les avantages de la vitesse variable**

- Une meilleure exploitation de l'énergie du vent [3].
- Augmentation du rendement énergétique.
- La réduction des oscillations du couple et des efforts mécaniques.
- Il est possible d'augmenter la vitesse de rotation du rotor lors des rafales et stockant L'énergie supplémentaire en forme d'énergie rotative jusqu'à la fin de la rafale.
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

#### **I.6.2.2. Les inconvénients de la vitesse variable**

- L'inconvénient principal du raccordement indirect au réseau est son coût.
- Convertisseur de puissance et la taille de ces convertisseurs, il devient relativement Important pour les éoliennes de grande taille.
- Perte énergétique lors du processus de conversion CA-CC-CA.

### **I.7. Les types des machines utilisées**

Le choix du type d'aérogénérateur dépend de plusieurs critères : le niveau de puissance à fournir au réseau ou à la charge, l'implantation sur terre ferme ou en mer et principalement la conversion au réseau électrique ou non (mode autonome), Le type à courant continu n'est utilisé que sur les éoliennes de très faible puissance (inférieur à 500W) pour charger des batteries et alimenter des installations de type station de mesure.

Les types des machines électriques les plus utilisées dans l'éolienne sont les machines synchrones , asynchrones et asynchrones à double alimentations.

### I.7.1. Machine synchrone

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 le générateur à induction de la même taille [13].

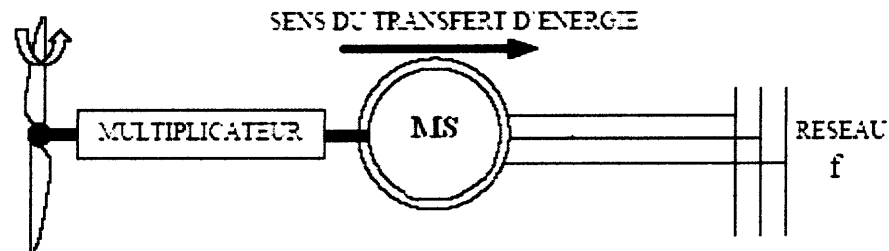


Figure I.9 : Machine synchrone connectée directement au réseau

### I.7.2. la machine asynchrone

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé.

La constitution du stator est la même que pour la machine synchrone et le rotor comporte soit un système d'enroulements triphasés (si le stator est triphasé é lui aussi) ou une cage d'écurueil en court-circuit [13]

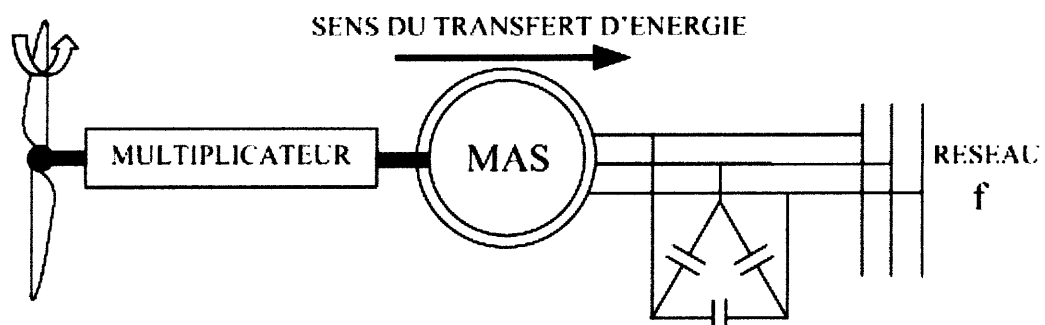


Figure I.10 : machine asynchrone connectée directement au réseau

### I.7.3. Machine asynchrone à double alimentation

Pour cette machine, le rotor est bobiné et comporte des enroulements triphasés couplés en étoile associés à des bagues collectrices qui permettent d'alimenter ses enroulements. Le stator est identique à celui d'une machine asynchrone.

On connecte toujours le stator au réseau mais ici au lieu de court-circuiter les enroulements rotoriques, on les alimente en alternatif à fréquence variable à partir de réseau via un onduleur de taille réduite. La puissance à fournir au rotor est faible devant la puissance produite par le stator [14].

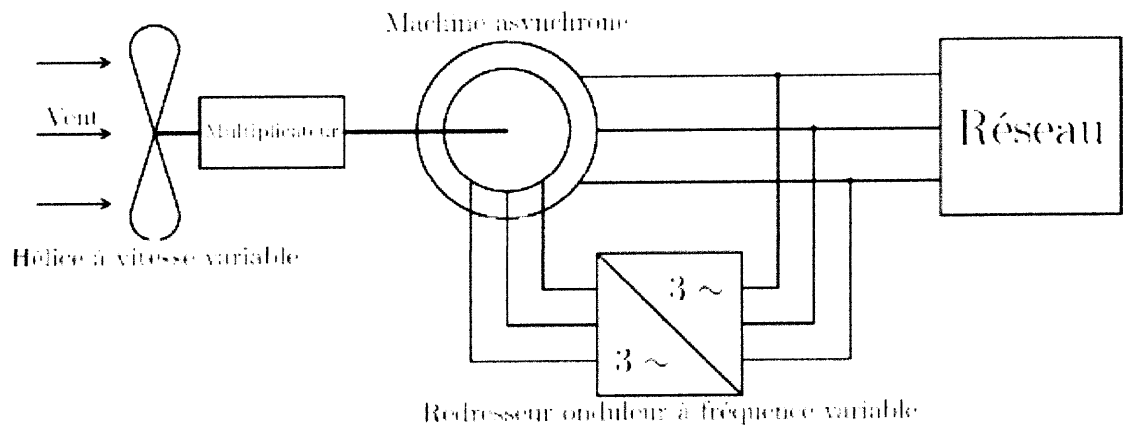


Figure I.11 : schéma de principe de la machine asynchrone à double alimentation

## I.8 Avantages et inconvénients de la MADA

### I.8.1 Avantages de la MADA [15]

- L'accès au rotor offre la possibilité de contrôler les grandeurs électriques du rotor (Courant et tension), ce qui donne une grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse de synchronisme.
- La configuration dont les deux convertisseurs alimentant la machine permettent de fonctionner en régime dégradé (l'un des deux onduleurs tombe en panne).
- En fonctionnement moteur, la solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge.
- La double alimentation permet de réduire les dimensions des convertisseurs statiques, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement.
- Transfert bidirectionnel de la puissance rotorique.

- Le fonctionnement en hypo ou hyper synchronisme offre une large plage de variation de la vitesse.

### **I.8.2 Inconvénients de la MADA [15]**

- Machine plus volumineuse que celle de la machine asynchrone classique, généralement elle est plus longue à cause des balais.
- Utilisation d'un nombre de convertisseurs statiques plus que celle de la machine classique.
- Le coût total de la machine est plus important par rapport aux autres machines électriques.

### **I.9 Conclusion**

Ce chapitre a été présenté une synthèse bibliographie sur les systèmes éoliens, les différents types et composants et leur principe de fonctionnement. Après une étude théorique de la conversion de l'énergie cinétique de vent et la production d'énergie, on présente les types de machines électriques utilisés.

Le chapitre suivant on va s'intéresser seulement à la machine asynchrone à double alimentation (MADA) présentons une description de cette machine avec sa constitution et ses modes de fonctionnement.

# Chapitre II

Modélisation de la MADA et du convertisseur  
rotorique

## II.1 Introduction

La Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA) a suscité un grand intérêt surtout en tant que génératrice dans le domaine des énergies renouvelables. En effet, à travers ce chapitre nous connaissons les raisons d'un tel engouement en commençant par décrire la structure de cette machine, exposer ses différents modes de fonctionnement et les configurations les plus utilisées tout en citant ses avantages et ses inconvénients.

Nous essayons d'aborder par la suite la modélisation de la machine, ceci a pour l'objectif la connaissance du comportement de ce type de machine dans ses différents régimes de fonctionnement.

## II.2 Structure de la MADA

Selon la conception du rotor, plusieurs types de machines asynchrones à double alimentation ont été envisagés. On va décrire les plus utilisés dans l'industrie.

### II.2.1 MADA à rotor bobiné

La machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné est composée, comme toute machine à courant alternatif, d'un stator et d'un rotor. Le stator est identique à celui d'une machine asynchrone classique. Le rotor est constitué d'enroulements triphasés connectés en étoile dont les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants [16]

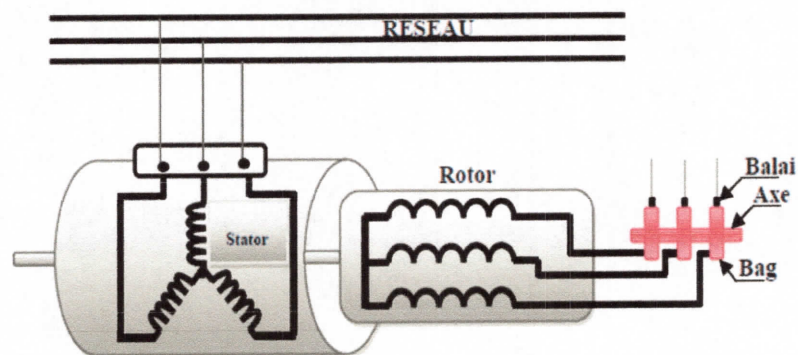


Figure II.1 : Schéma du rotor de la MADA à rotor bobiné [17]



### II.2.2 MADA sans balais

Cette machine est très proche à la précédente, sauf que cette fois ci les deux enroulements statoriques appartiennent à un circuit magnétique commun. Le rotor est commun et à cage d'écureuil.

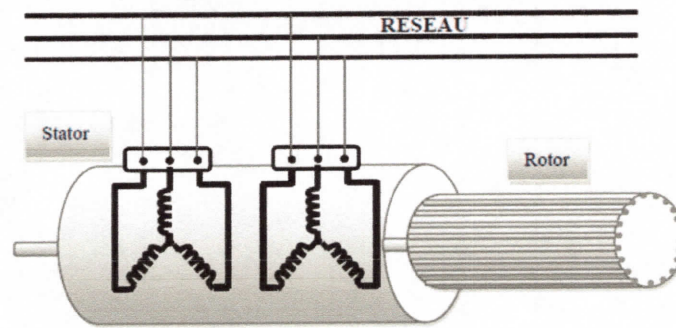


Figure II.2 : Structure de la MADA sans balais [17]

Il existe d'autres types comme la MADA à réductance qui utilise le principe d'un moteur à réductance variable ainsi que la MADA "tandem" qui possède un rotor à cage et deux enroulements statoriques, l'un est fixe tandis que l'autre peut être tournant.

### II.2.3 MADA en cascade

La structure de la MADA en cascade est définie par deux machines asynchrones dont les rotors sont couplés électriquement et mécaniquement. Cette structure permet d'avoir un système à double alimentation côté stator. Les enroulements statoriques sont reliés à deux sources de tension triphasées [17].

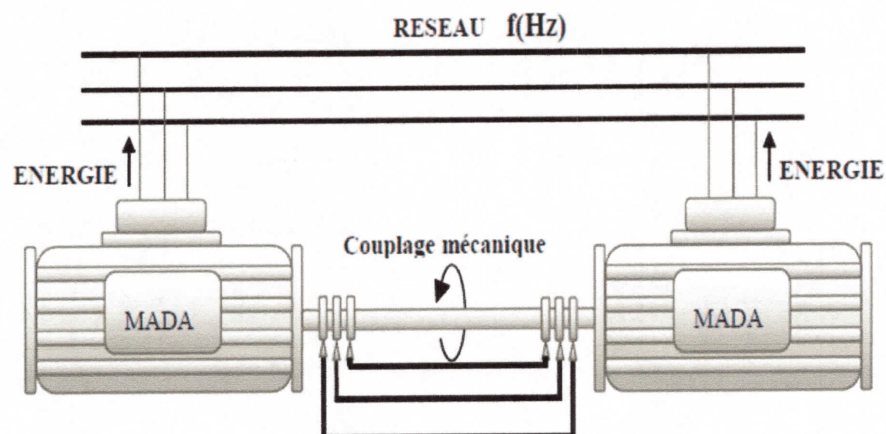


Figure II.3 : Structure en cascade de deux machines asynchrones [17]

### II.3. Les différents modes de fonctionnement de la MADA

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en génératrice. Mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. On présente quatre modes de fonctionnement :

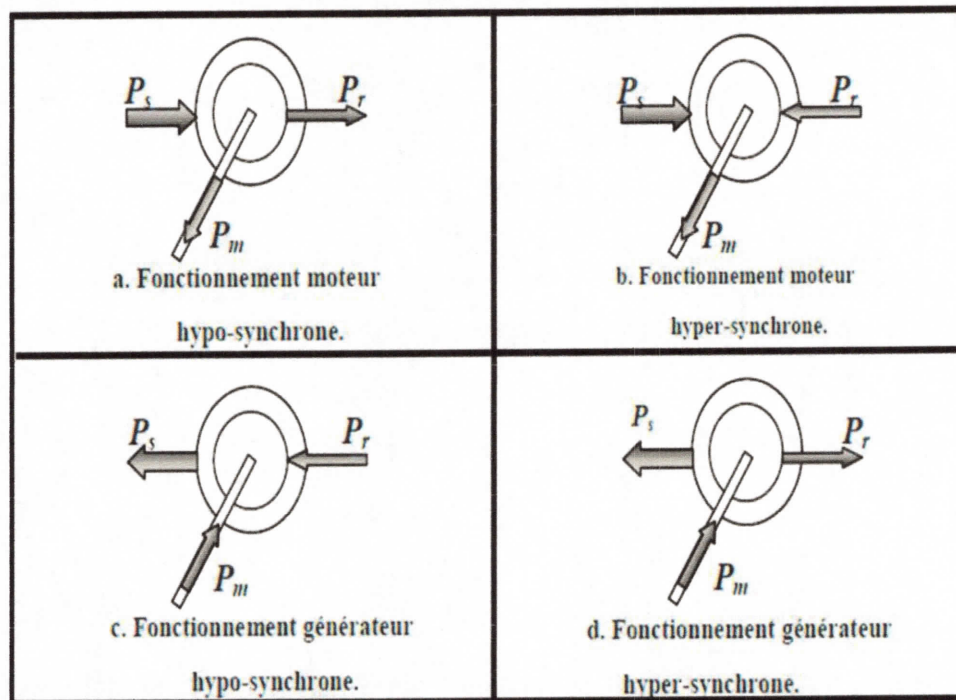


Figure II.4 fonctionnement de la MADA dans les quatre quadrants

#### II.3.1 Moteur hypo-synchrone

Lorsque la puissance est fournie par le réseau la machine fonctionne en moteur. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, la puissance de glissement est renvoyée sur le réseau.

#### II.3.2 Moteur hyper-synchrone

En ce mode, une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique.

### II.3.3. Générateur hypo-synchrone

En fonctionnement générateur, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique. En mode-hypo synchrone, une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.

### II.3.4. Générateur hyper-synchrone

En mode hyper-synchrone, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près.

## II.4 Hypothèses simplificatrices

Tout type de modélisation ne peut se faire sans effectuer quelques hypothèses simplificatrices, pour notre étude de la génératrice asynchrone à double alimentation on présente les hypothèses simplificatrices suivantes :

- La machine est de construction parfaitement symétrique.
- L'absence de saturation et de pertes dans le circuit magnétique (l'hystérésis et courant de Foucault) [19].
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable [7].
- les effets thermiques sont négligeables (les résistances des enroulements ne varient pas avec la température) et on néglige l'effet de Peau.
- la répartition de la force magnétomotrice dans l'entrefer est supposée sinusoïdale.

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer [20] :

- L'additivité des flux.
- La constance d'inductances propres.
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor en fonction de l'angle de leurs axes magnétiques.

## II.5. Modélisation de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation constituée de deux parties, un stator fixe et un rotor mobile, le stator a trois enroulements couplés en étoile ou en triangle alimenté par un système triphasé de tension, Le rotor de la machine supporte un bobinage triphasé avec un même nombre de paires de pôles que celui du stator couplé.



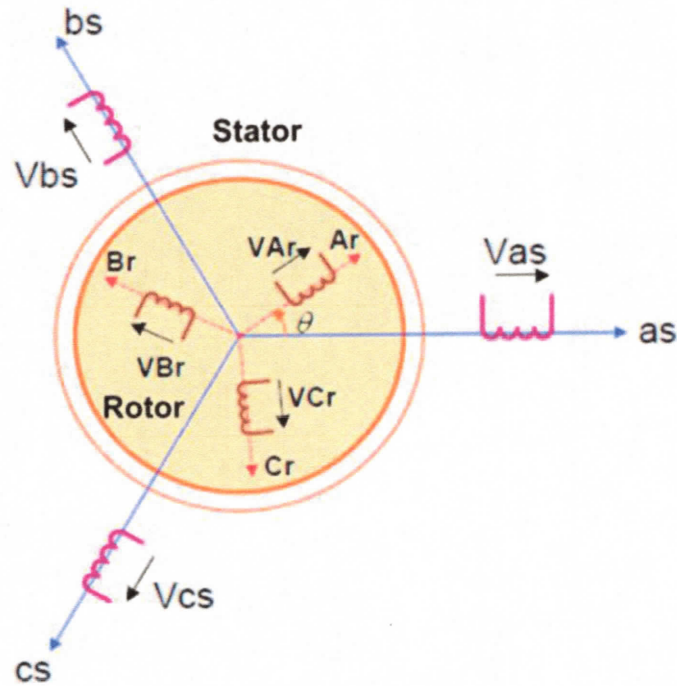


Figure II.5: Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.

## II.5.1. Equations générales de la MADA

### II.5.1.1 Equations électriques

Les équations des tensions statorique et rotorique sous forme matricielle s'écrivent :

a. Pour le stator:

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.1})$$

b. Pour le rotor:

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

### II.5.1.2. Les équations magnétiques

Les équations magnétiques sous forme matricielle sont données par les expressions suivantes :

$$[\phi_s] = [l_s] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \quad (\text{II.3})$$

$$[\phi_r] = [l_r] \cdot [I_r] + [M_{sr}] \cdot [I_s] \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$$[\phi_s] = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix}; [\phi_r] = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

$[\phi_s], [\phi_r]$ : sont respectivement les matrices de flux statorique et rotorique.

$$[I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}; [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

$[I_s], [I_r]$ : sont respectivement les matrices de courant statorique et rotorique.

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

$[L_s]$  : est la matrice des inductances statoriques.

$$[L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

$[L_r]$ : est la matrice des inductances rotoriques.

$$[M_{sr}] = M_0 \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Cette dernière matrice est nommée inductance mutuelle entre le rotor et le stator, avec représentation de l'écart angulaire entre les axes de ces dernières  $\theta$ .

### II.5.1.3. L'équations mécanique

L'équation fondamentale de la mécanique est :

$$C_e - C_r = j \frac{d\Omega_r}{dt} + f \cdot \Omega_r \Rightarrow j \frac{d\Omega_r}{dt} = C_e - C_r - f\Omega_r \quad (\text{II.10})$$

Où:

$j$  : est l'inertie des parties tournantes.

$f$  : coefficient de frottement visqueux.

## II.6. La transformation de PARK

Cette transformée permet de passer des axes réels des enroulements de la machine vers des axes fictifs en quadrature (d,q,o) quelconque en se basant sur la diagonalisation des matrices inductances statorique et rotorique .

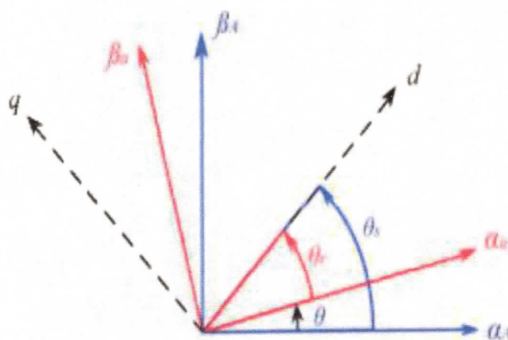


Figure II.6 : Transformation de Park

### II.6.1 Matrice de Park

Les matrices de transformation de Park direct s'écrivent :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

Pour le passage biphasé-triphasé il faut utiliser la matrice inverse :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

### II.6.2 Application de la transformation de Park

En appliquant la transformation de Park, les transformations proposées établissent les relations entre les flux et les courants d'axes d, q et les flux et les courants d'axes réels :

$$[\phi_{sdqo}] = [P(\theta_s)] \cdot [\phi_{sabc}] \quad (\text{II.13})$$

$$[\phi_{rdqo}] = [P(\theta_r)] \cdot [\phi_{rabc}] \quad (\text{II.14})$$

$$[I_{sabc}] = [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [I_{sdqo}] \quad (\text{II.15})$$

$$[I_{rabc}] = [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [I_{rdqo}] \quad (\text{II.16})$$

En développant les expressions des flux, elles deviennent :

Au stator :

$$[\phi_{sdqo}] = [P(\theta_s)][L_{ss}][P(\theta_s)]^{-1}[I_{sdqo}] + [P(\theta_s)][M_{sr}][P(\theta_r)]^{-1}[I_{rdqo}] \quad (\text{II.17})$$

Au rotor :

$$[\phi_{rdqo}] = [P(\theta_r)][M_{rs}][P(\theta_s)]^{-1}[I_{sdqo}] + [P(\theta_r)][L_{rr}][P(\theta_r)]^{-1}[I_{rdqo}] \quad (\text{II.18})$$

Le mode habituel d'alimentation du stator et la structure des enroulements rotoriques conférant la nullité aux sommes des courants statoriques et des courants rotoriques, les composants d'indice 'o' sont alors nulles.

Dans ces conditions de fonctionnement en mode non dégradé, les flux d'axes d et q sont simplement définis par trois paramètres constant  $L_s$ ,  $L_r$  et  $M$  reliés aux courants par la relation :

$$\begin{bmatrix} \phi_{sd} \\ \phi_{sq} \\ \phi_{rd} \\ \phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Avec :

$$L_s = l_s - M_s$$

$$L_r = l_r - M_r$$

$$M = (3/2) \cdot M_r$$

$L_s, L_r$  : respectivement, inductance cyclique statorique et rotorique

$M$  : inductance mutuelle cyclique

Alors les équations de tensions statoriques et rotoriques dans le repère de Park s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & 0 & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s M & 0 \\ 0 & -\omega_r M & R_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r M & 0 & \omega_r L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dI_{sd}}{dt} \\ \frac{dI_{sq}}{dt} \\ \frac{dI_{rd}}{dt} \\ \frac{dI_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Pour le couple sa relation est la suivante :

$$[C_{em}] = [I_{sabc}]^t \frac{d[M_{sr}]}{d\theta_m} [I_{rabc}] \quad (\text{II.21})$$

$$\frac{d[M_{sr}]}{d\theta_m} = \frac{d\theta_e}{d\theta_m} \frac{d[M_{sr}]}{d\theta_e} = P \frac{d[M_{sr}]}{d\theta_e} \quad (\text{II.25})$$

Ce qui nous donne la relation suivante :

$$C_e = P \cdot M (\phi_{sq} \cdot I_{rd} - \phi_{sd} \cdot I_{rq}) \quad (\text{II.23})$$

Où  $P$  est le nombre de paires de pôles

Après qu'on a effectué le changement de variable, l'expression du couple électromagnétique peut s'exprimer sous différentes formes, on trouve celle-ci :

$$C_e = P \frac{M}{L_s} (\phi_{sq} \cdot I_{rd} - \phi_{sd} \cdot I_{rq}) \quad (\text{II.24})$$



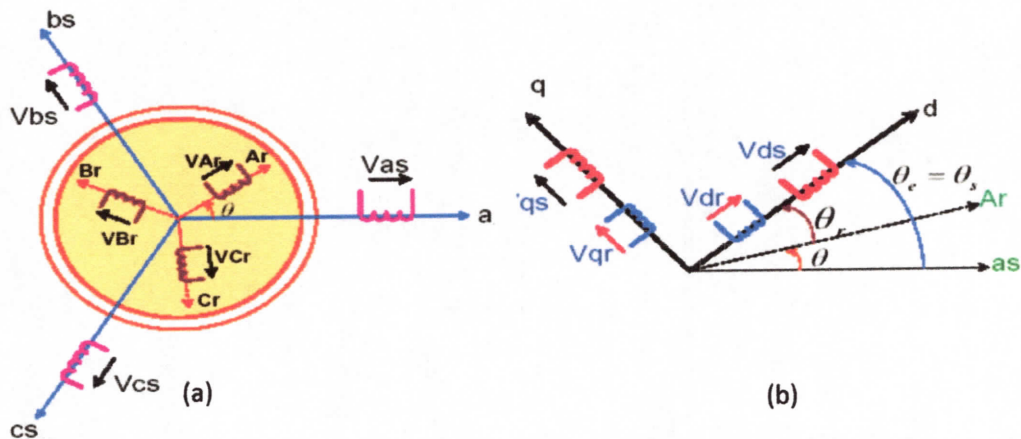


Figure II.7 : Représentation de la MADA dans les deux repères.

a) Représentation de la MADA dans le repère (abc) ;

b) Représentation de la MADA dans (dq).

## II.7 Choix du référentiel

Il existe différentes possibilités concernant le choix de l'orientation du repère d'axes d, q qui dépendent des objectifs de l'application :

- Axes tournant à la vitesse du rotor ( $\theta_r = 0$ ) : étude des grandeurs rotoriques.
- Axes liés au stator ( $\theta_s = 0$ ) : étude des grandeurs statoriques.
- Axes liés au champ tournant : étude de la commande et principalement le but de notre étude donc on a représenté notre MADA dans un repère liés au champ tournant.

### II.7.1 Modèle de la MADA liés au champ tournant

Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de PARK lié au champ tournant comme suit :

- **Equations électriques :**

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} \end{cases} \quad (II.25)$$

• Equations des flux magnétiques :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (II.26)$$

• Equations mécaniques:

$$C_{em} = p \frac{M}{L_r} (\Phi_{dr} I_{qs} - \Phi_{qr} I_{ds}) \quad (II.27)$$

$$j \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - C_f \quad (II.28)$$

Dans un repère diphasé, les puissances actives et réactives d'une machine asynchrone a double alimentation s'écrivent :

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

II.8 Simulation de la MADA

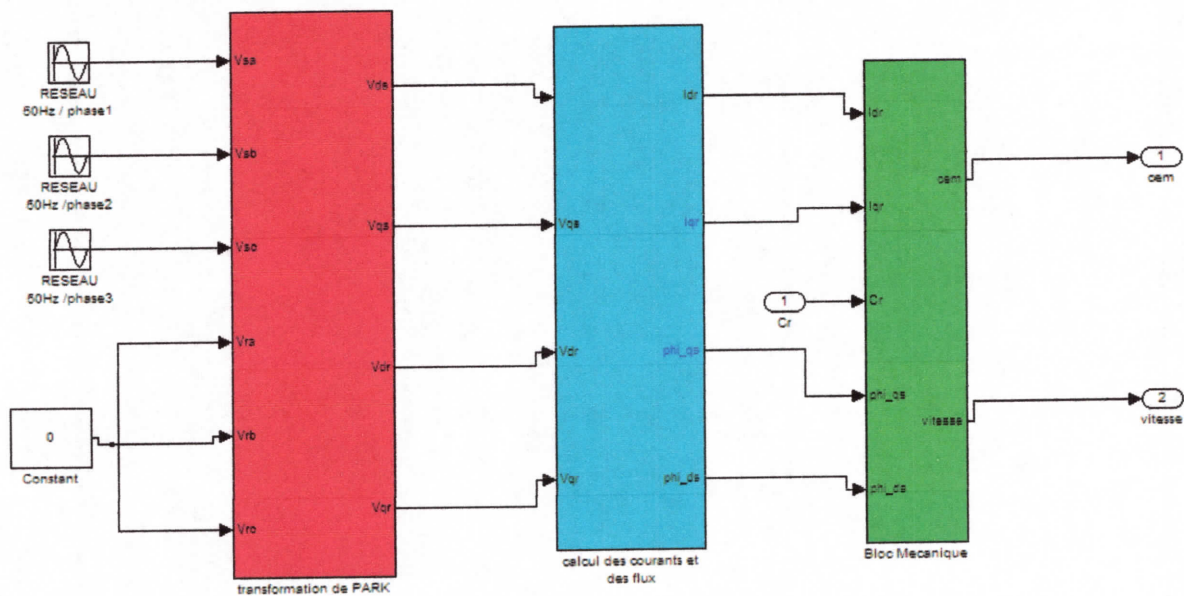


Figure II. 8 : Schéma bloc de la MADA- modélisation

### II.8.1 Résultats de simulation

Les résultats du couple, vitesse et du courant sont représentés sur les figure suivantes , ou le stator de la machine est alimenté par un réseau a fréquence constante et des tensions rotoriques et couple résistant nuls.

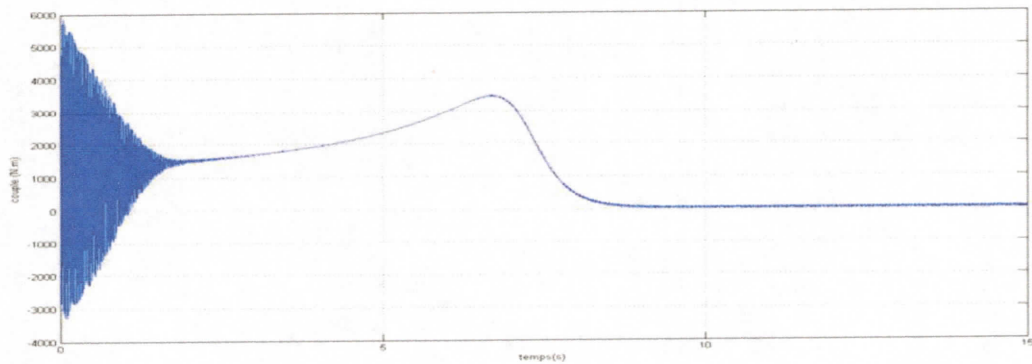


Figure II. 9 couple électromagnétique

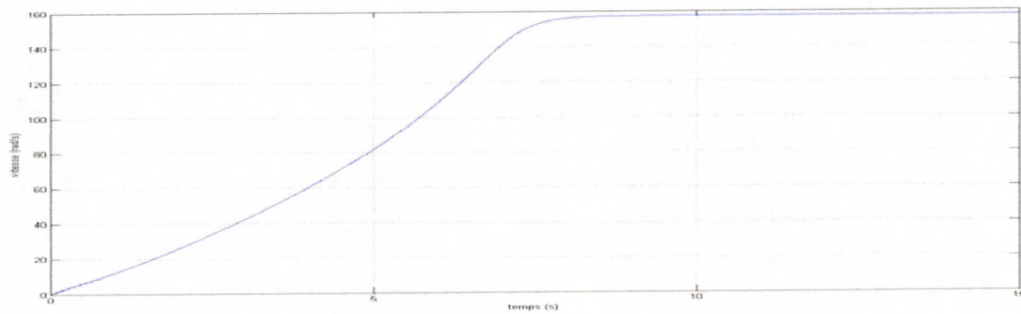


Figure II. 10 vitesse de rotation de l'arbre de la machine

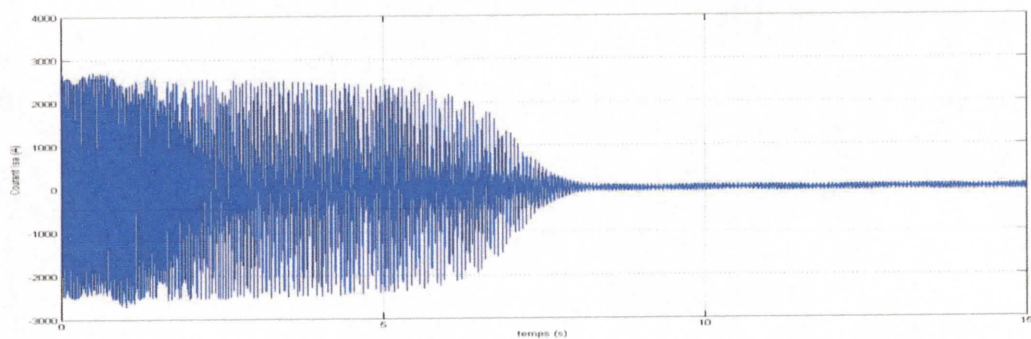


Figure II. 11 courant  $I_a$



## II.9 Les convertisseurs utilisés

Il existe plusieurs topologies de convertisseurs. La première famille assure une conversion alternatif-continu suivie d'une conversion continu-alternatif (AC/DC/AC). C'est celle qui est actuellement la plus répandue dans l'industrie. La seconde famille assure une conversion directe alternatif-alternatif (AC/AC). Cette conversion directe peut être assurée, soit par des cycloconvertisseurs, soit par des convertisseurs matriciels.

### II.9.1 convertisseur AC/DC/AC avec stockage

La conversion indirecte se divise en deux conversions successives, d'abord elle effectue le redressement de la grandeur alternative d'entrée en une grandeur continue au quasi continue qui est ensuite convertie en une grandeur alternative de sortie avec l'amplitude et la fréquence variable.

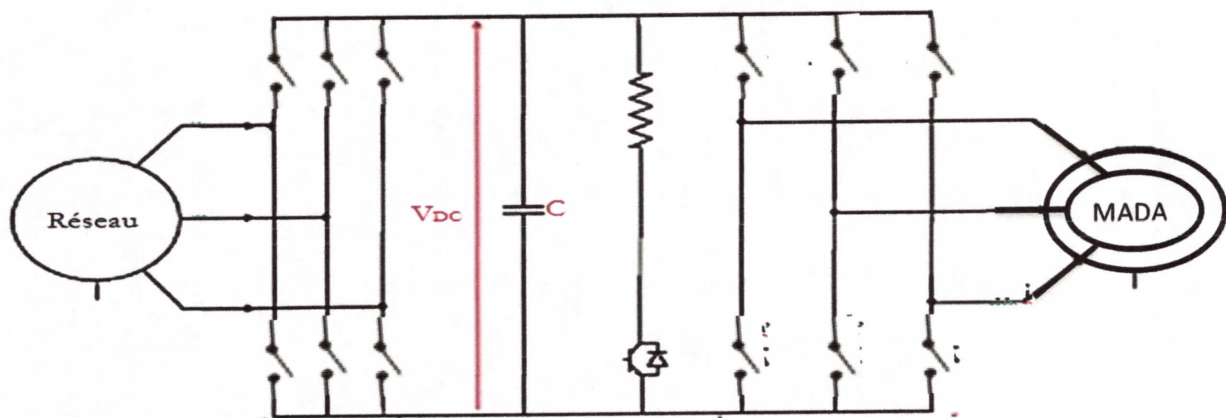


Figure II.12 : convertisseur indirect

### II.9.2 Convertisseurs AC /AC sans stockage

la conversion s'effectue en une seule étape car on convertie une grandeur alternative d'entrée en une grandeur alternative de sortie. L'élément de stockage d'énergie n'est pas nécessaire,

on peut trouver :

- Convertisseur matriciel.
- Cyclo convertisseurs à commutations forcées

### II.9.2.1 Convertisseur matriciel

Le convertisseur matriciel est connecté directement au réseau, qui est une source de tension, et sa sortie ( $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ) est connectée à une source de courant comme un moteur électrique qui est de nature inductive. Il y a ainsi le respect de l'alternance des sources.

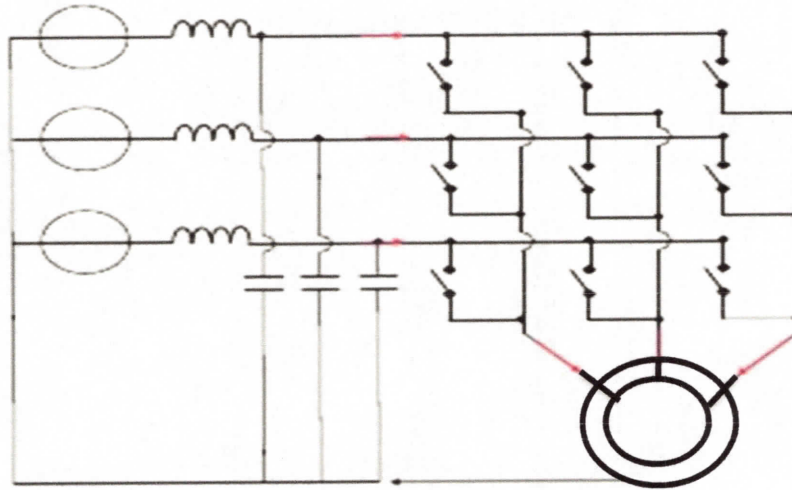


Figure II.13 : Schéma d'un convertisseur matriciel

### II.9.2.2 Cyclo convertisseurs

Un Cycloconvertisseur est un changeur de fréquence fonctionnant en commutation naturelle. Les tensions alternatives de sortie sont obtenues en prélevant des portions convenables des tensions d'entrée. A valeur et fréquence des tensions d'entrée données, le Cycloconvertisseur permet de faire varier de manière continue la valeur et la fréquence des tensions de sortie.

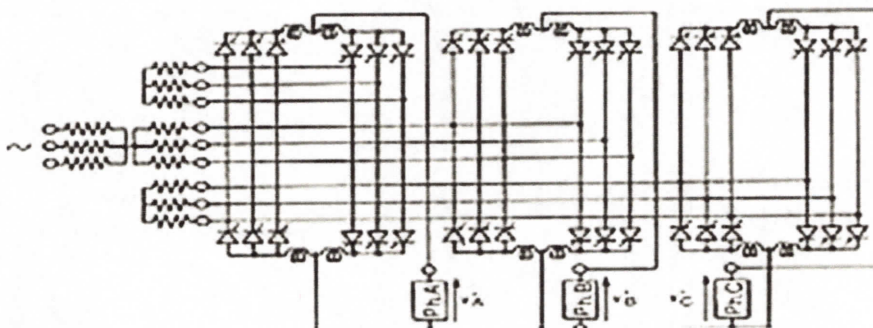


Figure II.14 : Schéma d'un cyclo convertisseurs

## II.10. Modélisation de l'onduleur

L'alimentation de la MADA nécessite l'utilisation d'un convertisseur statique pour l'entraîner à vitesse variable. Les onduleurs sont des convertisseurs statiques qui transforment une puissance électrique d'une forme continue en une puissance en forme alternative. La tension de sortie d'un onduleur a une forme d'onde périodique qui n'est pas sinusoïdale, mais qui peut être très proche de la forme d'onde souhaitée avec une fréquence désirée. [21]

Le rotor de la MADA est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux équipé avec des dispositifs semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. Les six interrupteurs électroniques représentés, et que nous supposons parfaits, peuvent être des transistors (Bipolaires, MOSFET, IGBT) associés à des diodes en tête bêche, ou encore des thyristors équipés de circuit d'extinction en plus du dispositif d'amorçage.

On peut remplacer chaque groupe transistor-diode par des interrupteurs ( $k=1,2,3,4,5,6$ ) on obtient le schéma simplifié comme indique la figure (II.15).

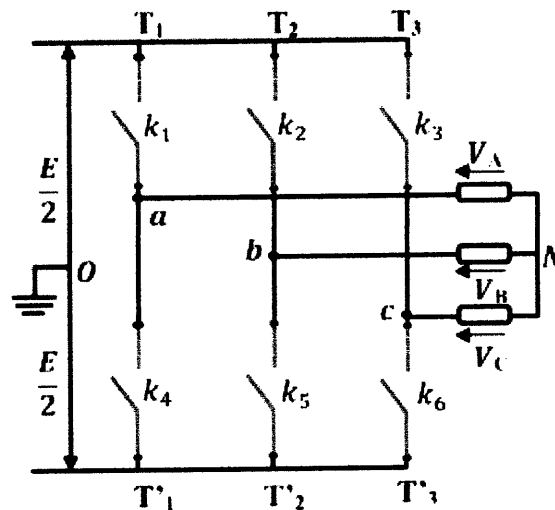


Figure II.15 : Schéma de l'onduleur simplifié par des interrupteurs

Afin d'éviter de court-circuiter la source de tension continue, les commandes des interrupteurs d'un même bras doivent être complémentaires. Pour simplifier l'étude nous supposons que le couplage est du type étoile sans neutre (bien que le branchement d'une charge en triangle soit envisageable). Ainsi les harmoniques de rang trois et multiples de trois sont

éliminées, et le système triphasé obtenu à la sortie de l'onduleur est un système triphasé équilibré en tension ne contenant que les harmoniques impairs différents de trois.

Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue, il faut découper la tension d'entrée et l'appliquer à la charge tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre sens. L'onduleur alimenté par une source de tension parfaite impose à sa sortie, grâce au jeu d'ouverture et de fermeture des interrupteurs, une tension alternative formée d'une succession de créneaux rectangulaires, la période de fonctionnement étant fixée par la commande des interrupteurs.

Les équations de tension simples appliquées aux trois phases sont :

$$\begin{cases} V_A = V_{AO} + V_{ON} \\ V_B = V_{BO} + V_{ON} \\ V_C = V_{CO} + V_{ON} \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Par addition on a :  $V_A + V_B + V_C = V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3.V_{ON}$

Sachant que le système des tensions statoriques est symétrique :

Donc :  $V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3.V_{ON} = 0$

D'où :

$$V_{ON} = -\frac{1}{3}(V_A + V_B + V_C) \quad (\text{II.31})$$

on remplace (II.19) dans (II.18), on aura le système suivant :

$$\begin{cases} V_A = \frac{2}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_B = -\frac{1}{3}V_{AO} + \frac{2}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_C = -\frac{1}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} + \frac{2}{3}V_{CO} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

On peut écrire le système (II.20) sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

Avec :



$$\begin{cases} V_{AO} = \frac{E}{2} S_1 \\ V_{BO} = \frac{E}{2} S_2 \\ V_{CO} = \frac{E}{2} S_3 \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

$$\text{telque : } \begin{cases} S_1 = 1 & \text{si } k1 & \text{fermé} & \text{si non } S_1 = -1 \\ S_2 = 1 & \text{si } k2 & \text{fermé} & \text{si non } S_2 = -1 \\ S_3 = 1 & \text{si } k3 & \text{fermé} & \text{si non } S_3 = -1 \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

On remplace (II.22) dans (II.21) on aura le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{E}{2} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$



Selon les états des interrupteurs, fermé ou bien ouvert, il y a huit vecteurs tensions possible à la sortie de l'onduleur ( $V_0 - V_7$ ).

## II.11 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté une description de la machine asynchrone double alimentation, sa constitution et les différents modes de fonctionnement. En suite la modélisation de la machine en fonctionnement génératrice, on a introduit les hypothèses de travail et la transformation de Park qui permet de donner un modèle de la machine basé sur un circuit électrique équivalent, après nous avons établi une simulation numérique de la machine par MATLAB/Simulink.

En fin, une modélisation d'un onduleur de tension a été établie.



# Chapitre III

Commande directe de puissance

### III.1. Introduction

La commande direct des puissances (DPC) est basée sur les principes de la commande direct du couple (DTC) des machines à induction qui consiste à commander le couple de la machine directement par le choix approprié du vecteur tension en utilisons le flux statorique et les informations du couple. Le flux statorique est généralement calculé en intégrant la tension statorique.

Dans le cas de la (DPC), Les états de commutation de l'onduleur vont être sélectionnés à partir d'une table de commutation optimale basée sur les erreurs instantanées entre les valeurs de référence et les valeurs estimées des puissances actives et réactives et aussi la position angulaire du vecteur flux.[21]

### III.2. Comportement dynamique de la MADA dans le référentiel rotorique

Pour étudier le comportement dynamique de la MADA, on utilise les équations électrique et magnétique qui sont définit dans le chapitre précédent. Pour un référentiel rotorique, les équations des flux statoriques et rotoriques sont données comme suit :

$$\begin{cases} \varphi_s^r = L_s I_s^r + L_m I_r^r \\ \varphi_r^r = L_r I_r^r + M I_s^r \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Dans un référentiel rotorique, les équations des courants statoriques et rotoriques peuvent être exprimés comme suit :

$$I_s^r = \frac{\varphi_s^r}{\sigma L_s} - \frac{L_m \varphi_r^r}{\sigma L_s L_r} \quad (\text{III.2})$$

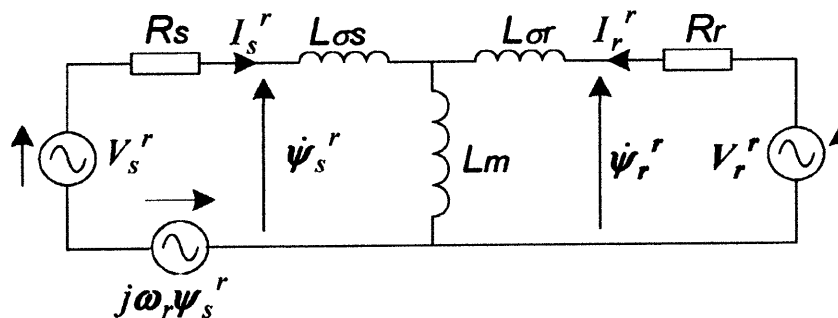


Figure III.1. Circuit équivalent de la MADA dans le référentiel rotorique ( $\alpha_r, \beta_r$ )

Le vecteur tension statorique peut être aussi exprimé comme suit :

$$V_s^r = R_s I_s^r + \frac{d\varphi_s^r}{dt} + j\omega_r \varphi_s^r \quad (\text{III.3})$$

Basé sur la figure III.1 est l'équation précédente, la puissance active statorique est donnée par :

$$P_s = \frac{3}{2} V_s^R I_s^r = \frac{3}{2} (R_s I_s^r + \frac{d\varphi_s^r}{dt} + j\omega_r \varphi_s^r) I_s^r \quad (\text{III.4})$$

En négligent la résistance statorique, l'équation précédente devienne :

$$P_s = \frac{3}{2} (\frac{d\varphi_s^r}{dt} + j\omega_r \varphi_s^r) I_s^r \quad (\text{III.5})$$

De la même façon pour la puissance réactive on obtient :

$$Q_s = -\frac{3}{2} (\frac{d\varphi_s^r}{dt} + j\omega_r \varphi_s^r) I_s^r \quad (\text{III.6})$$

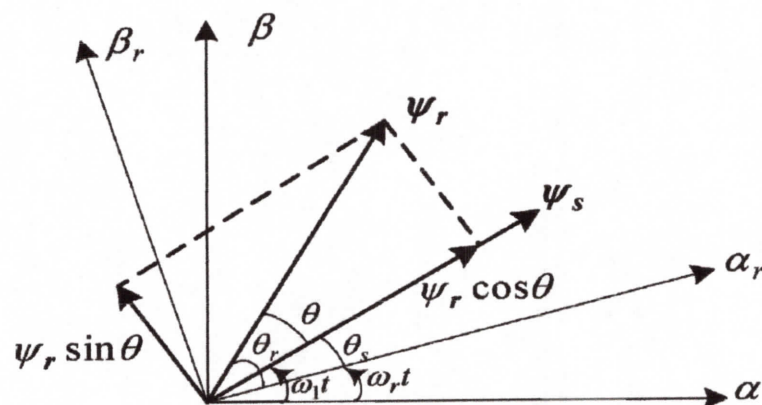


Figure III.2. Relations entre les vecteurs flux statorique et rotorique dans le référentiel rotorique et statorique

Les relations entre les flux statoriques et rotoriques dans le référentiel statorique  $(\alpha, \beta)$  et le référentiel rotorique  $(\alpha_r, \beta_r)$  sont montrés sur la figure III.2, peuvent être exprimés dans le référentiel statorique comme suit :

$$\varphi_s^r = |\varphi_s^r| e^{j\theta_s} \quad (\text{III.7})$$

$$\varphi_r^r = |\varphi_r^r| e^{j\theta_r} \quad (\text{III.8})$$

La transformation du flux statorique dans les deux référentiels est donnée par :

$$\varphi_s^r = \varphi_s^s e^{-j\omega_r t} \quad (\text{III.9})$$

Dans le référentiel statorique, les flux statorique et rotoriques peuvent être exprimés par :

$$\varphi_s^s = \int (V_s^s - R_s I_s^s) dt \quad (\text{III.10})$$

$$\varphi_r^r = \int (V_r^r - R_r I_r^r) dt \quad (\text{III.11})$$

Supposons que le stator de la MADA est alimenté par un réseau de fréquence et tension constantes, et en négligeant la résistance statorique et la vitesse du rotor ne change pas pendant la période d'échantillonnage considérée et d'après III.9 :

$$|\varphi_s^r| = |\varphi_s^s e^{-j\omega_r t}| = |\int V_s^s dt| = \text{constat} \quad (\text{III.12})$$

$$\frac{d|\varphi_s^r|}{dt} = 0 \quad (\text{III.13})$$

D'après la figure III.2, on a :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s - \omega_r \quad (\text{III.14})$$

On prend considération l'équation (III.14) et (III.4) La dérivée de III.7 sera égale a :

$$\frac{d|\varphi_s^r|}{dt} = |\varphi_r^r| j \frac{d\theta_s}{dt} e^{j\theta_s} = j(\omega_s - \omega_r) \varphi_s^r \quad (\text{III.15})$$

En remplaçant l'expression du courant statorique III.2 et l'expression précédente III.15 dans l'équation III.5 et III.2, et après un calcul mathématique, les expressions des puissances actives et réactives statoriques seront égale a:

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_s |\varphi_s^r| |\varphi_r^r| \sin \theta \\ Q_s = \frac{3}{2} \frac{W_s}{\sigma L_s} W_s |\varphi_s^r| \left( \frac{L_m}{L_r} |\varphi_r^r| \cos \theta - |\varphi_s^r| \right) \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

D'où  $\theta = \theta_r - \theta_s$  est l'angle entre les vecteurs des flux statoriques et rotoriques, D'après (III.5) l'accroissement des puissances statoriques peut être exprimé par :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} P_s = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_s |\varphi_s^r| \frac{d}{dt} (|\varphi_r^r| \sin \theta) \\ \frac{d}{dt} Q_s = \frac{3}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_s |\varphi_s^r| \frac{d}{dt} (|\varphi_r^r| \cos \theta) \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

D'après (III.17), on peut voir qu'on peut varier les puissances actives et réactives par la variation de  $|\varphi_r^r| \sin \theta$  Et de  $|\varphi_r^r| \cos \theta$ , respectivement.  $|\varphi_r^r| \sin \theta$  Et de  $|\varphi_r^r| \cos \theta$  représentent les composantes du flux rotorique  $\varphi_r^r$  à la perpendiculaire et dans la même direction du flux statorique.

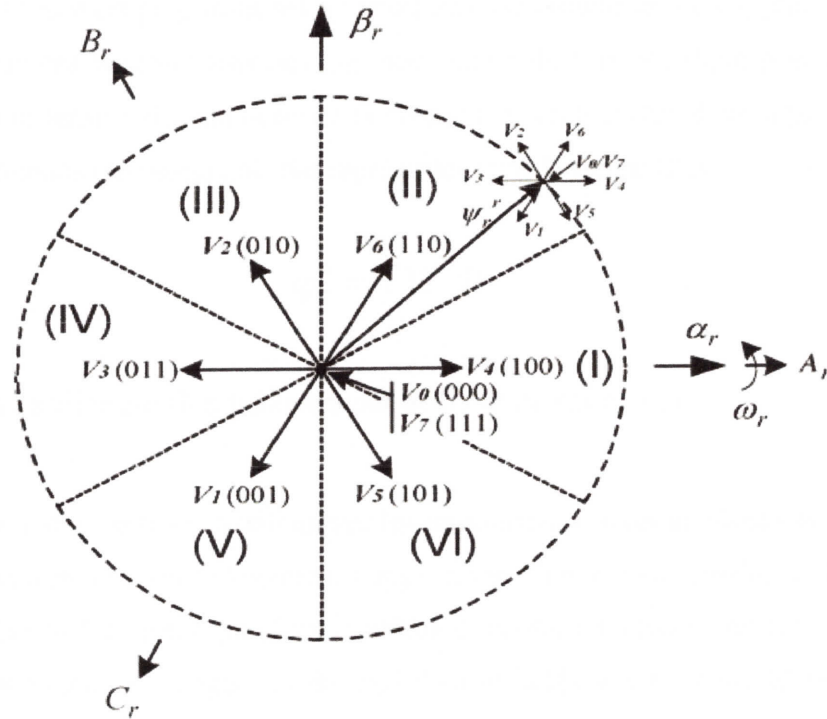


Figure III.3 : Vecteurs tensions et la commande du flux rotorique

### III.3. Contrôle du flux rotorique par les vecteurs tensions

Pour un convertisseur a deux niveau chaque sortie des trois phases  $V_a, V_b$  et  $V_c$  peut avoir deux niveau  $\frac{E}{2}$  et  $-\frac{E}{2}$ . La sortie des trois phases peut être représentée par vecteur tension, et suivant le niveau de la tension de sortie de chaque sortie du convertisseur (onduleur), il y a huit (8) vecteurs tensions. La figure III.3 montre ces vecteur qui sont notés de V0 (000) jusqu'à V7(111) d'où les numéros en binaire entre les parenthèses représentent les séquences des phases (a,b,c). Il y a deux vecteurs tension qui sont nul (V0 et V7) et les six vecteurs qui reste sont actif (V1-V6).

D'après la figure III.1 et comme le flux statorique, le flux rotorique de la MADA dans le référentiel rotorique  $(\alpha_r, \beta_r)$  peut être exprimé par :

$$\frac{d\phi_r^r}{dt} = V_r^r - R_r I_r^r \tag{III.18}$$

En négligent l'effet de la résistance rotorique, la variation du flux rotorique est déterminée par variation des tensions rotorique. Le mouvement du flux rotorique suit la direction des tensions

**III.4.2. commande directe des puissances actives et réactives**

Pour assurer une bonne dynamique de la commande des puissances actives et réactives, les états des puissances actives et réactives et la position du flux statorique sont utilisés pour la détermination du vecteur tension appliqué. Deux comparateur a hystérésis a trois niveau seront utilisés pour générer les états  $S_p$  et  $S_q$  des puissances actives et réactives respectivement (figure III.4). [21]

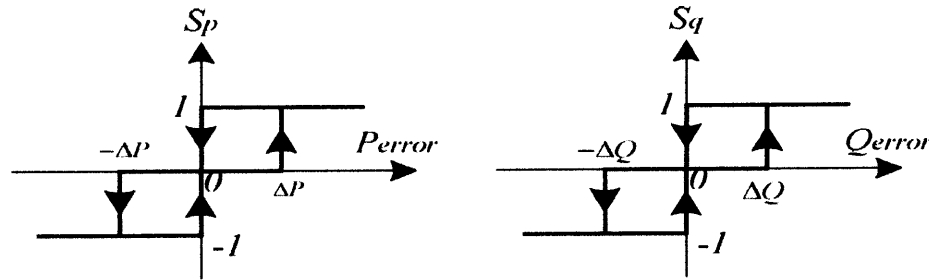


Figure III.4 : comparateurs à hystérésis des puissances actives et réactives

Due a la présence de la résistance rotorique, l'influence du vecteur tension zéro devient plus compliqué surtout lorsque la vitesse rotorique approche à la vitesse de synchronisme. Alors, le vecteur tension zéro ne sera pas appliqué que lorsque les états des puissances actives et réactives égale à zéro.

		I	II	III	IV	V	VI
$S_q=1$	$S_p=1$	101	100	110	010	011	001
	$S_p=0$	100	110	010	011	001	101
	$S_p=-1$	110	010	011	001	101	100
$S_q=0$	$S_p=1$	001	101	100	110	010	011
	$S_p=0$	111/ 000	111/ 000	111/ 000	111/ 000	111/ 000	111/ 000
	$S_p=-1$	010	011	001	101	100	110
$S_q=-1$	$S_p=1$	001	101	100	110	010	011
	$S_p=0$	011	001	101	100	110	010
	$S_p=-1$	010	011	001	101	100	110

Table III.3 : table de commutation optimale



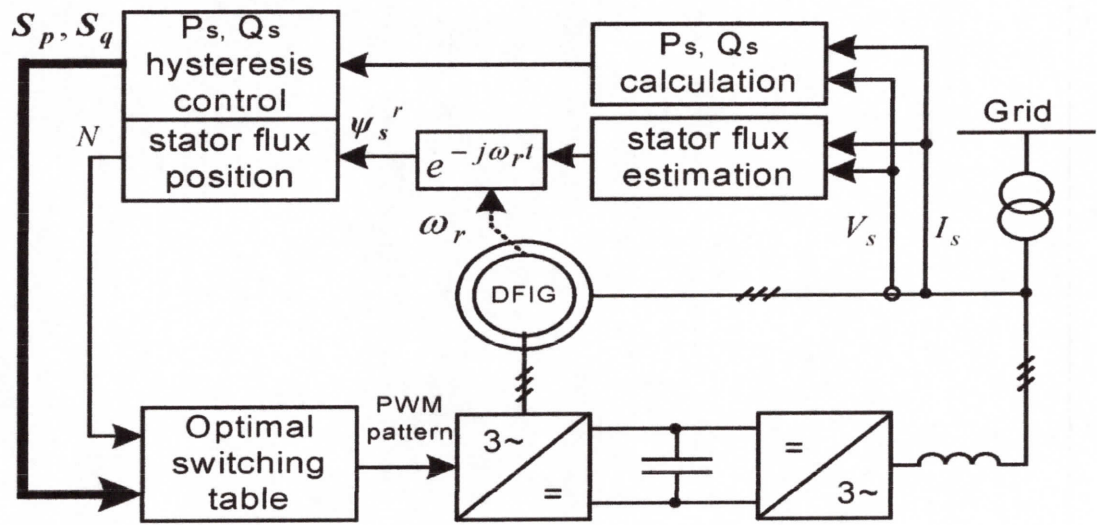


Figure III.5 : Schéma général de la DPC pour la une MADA

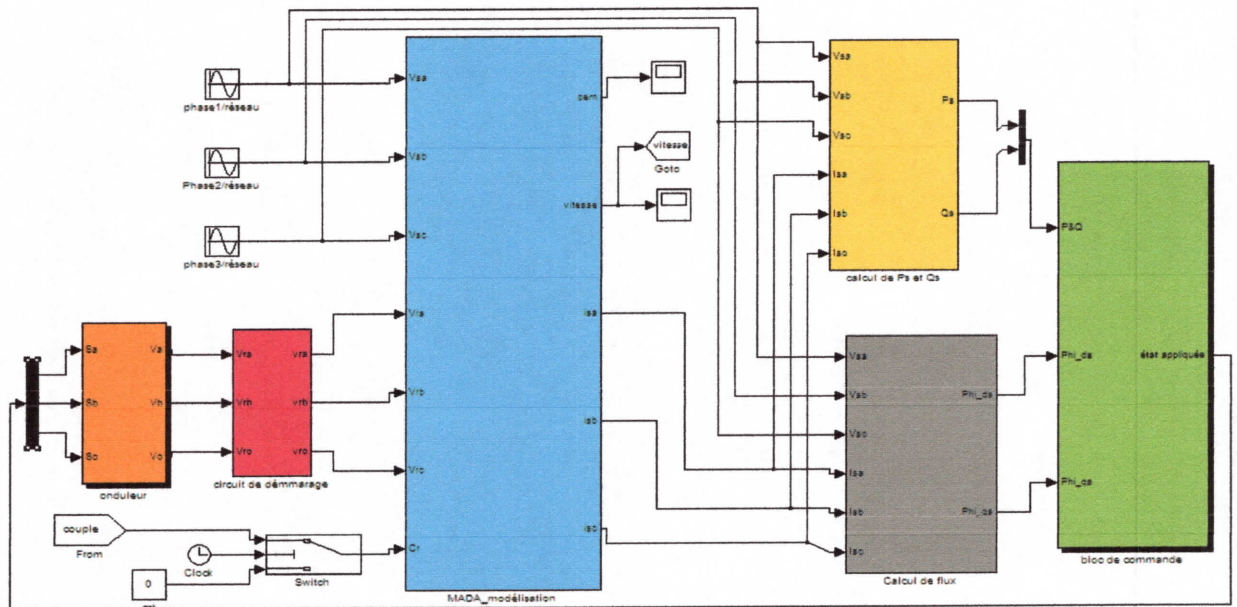


Figure III.6 : Schéma de simulation de la commande DPC



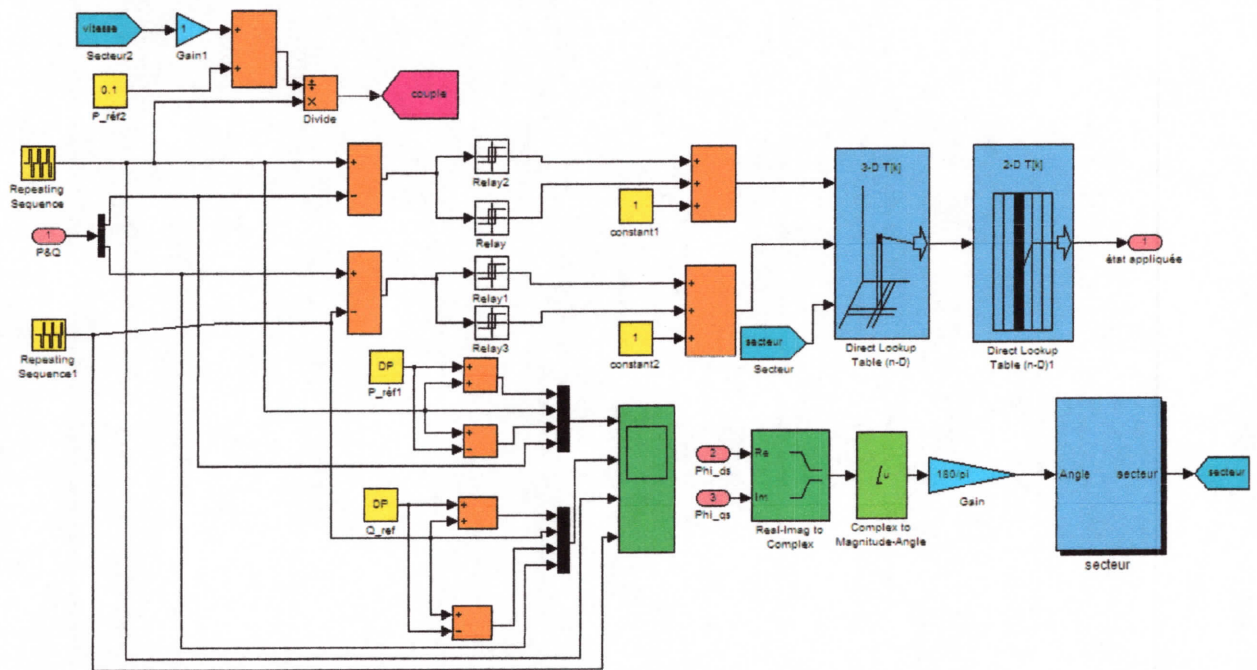


Figure III.7 : schéma de bloc de la commande

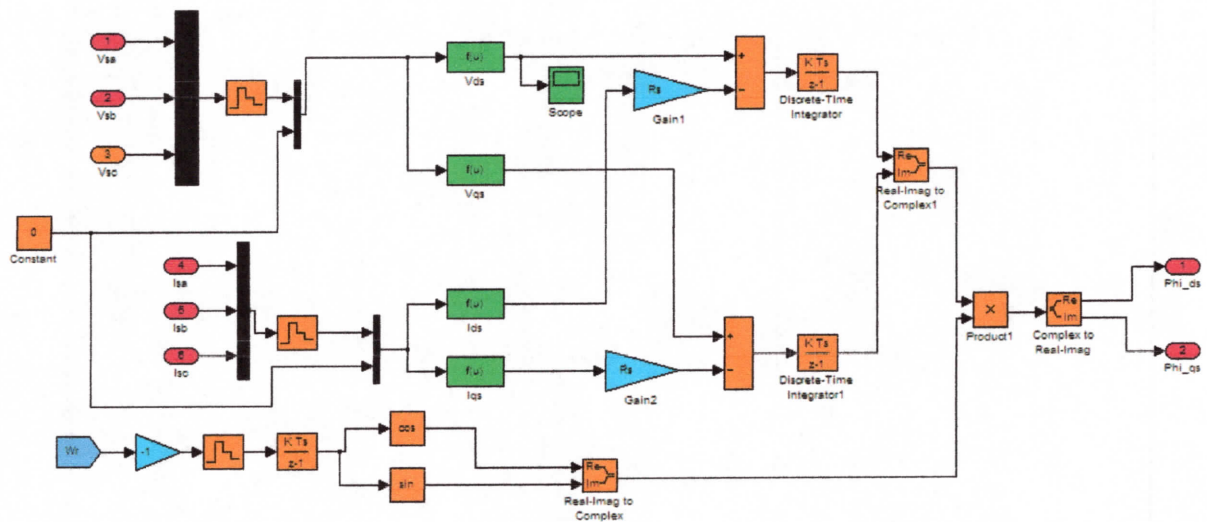


Figure III.8 : schéma bloc de calcul de flux

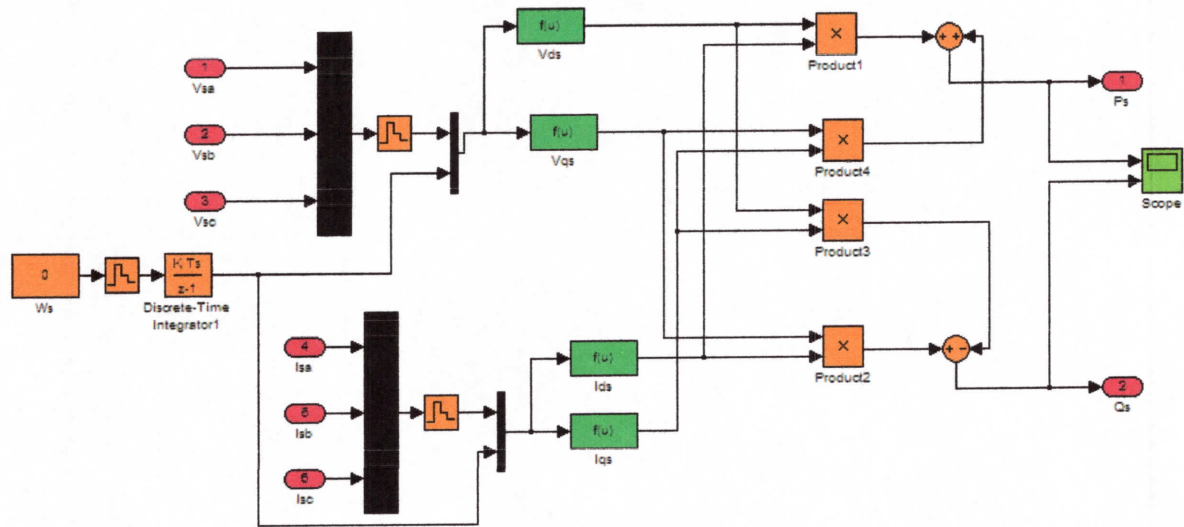


Figure III.9 : bloc de calcul des puissances

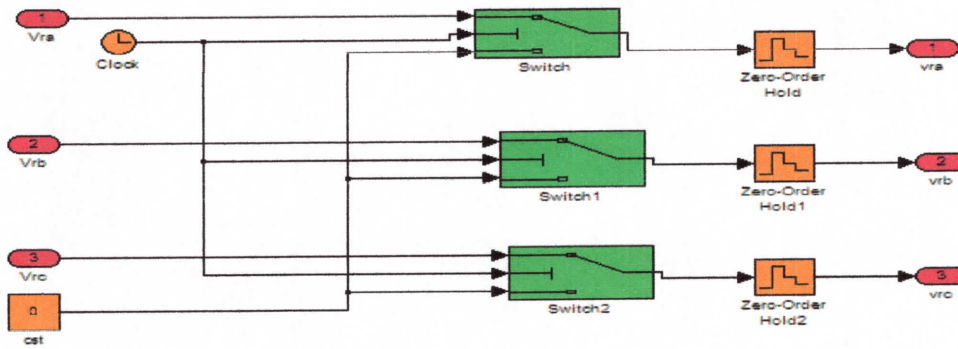


Figure III.10 : schéma bloc de démarrage

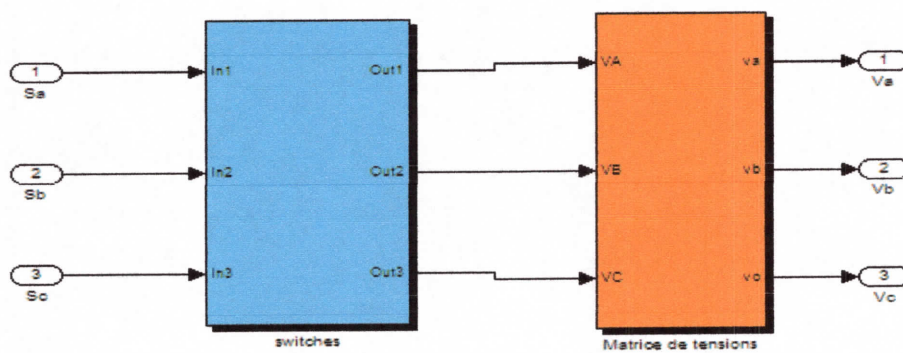


Figure III.11 : schéma bloc de l'onduleur

### III.4.3. simulation des résultats

la simulation de la stratégie de commande DPC est faite sous l'environnement de MATLAB/Simulink, les paramètres de la machine sont donnée dans l'annexe. On laisse la machine tourne jusqu'à régime permanent ( $t \cong 0.8s$ ), après on applique la commande ( $t=2s$ ), on peut voir que les valeurs réels des puissances suivent leurs valeur de référence.

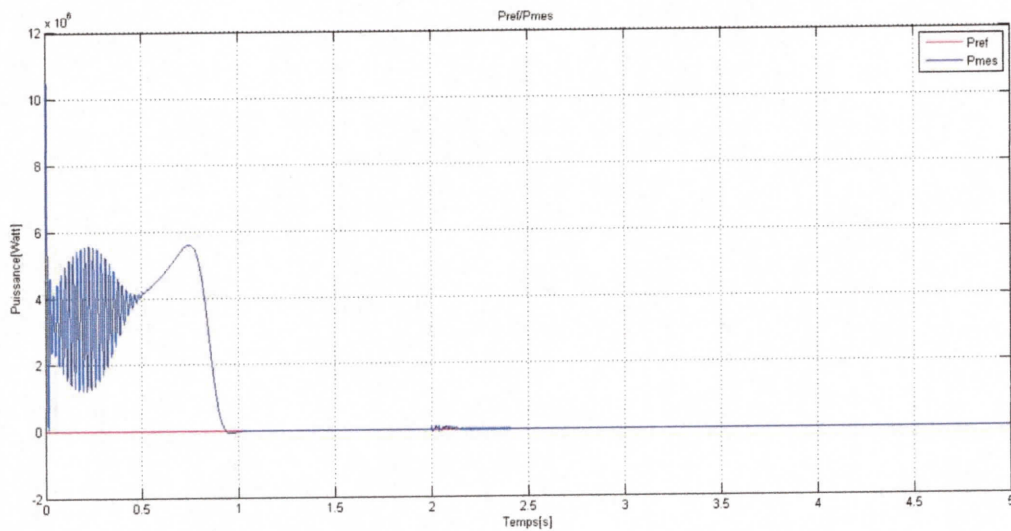


Figure III.12 puissance active statorique (Ps)

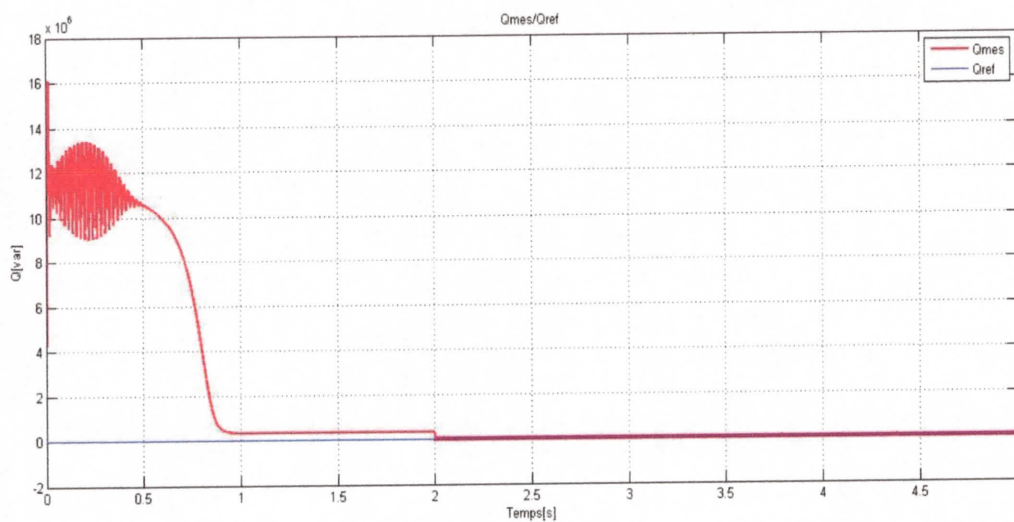


Figure III.13 : puissances actives et réactives (Qs)

Dans ce qui va suivre, on veut voir l'influence du changement de la puissance active sur la puissance réactive et le contraire.

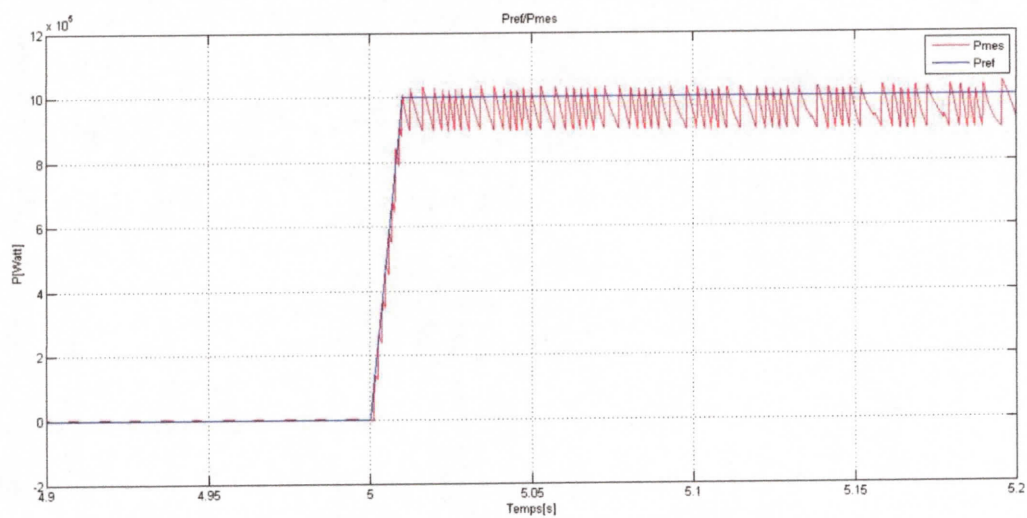


Figure III.14 puissance active statorique ( $P_s$ )

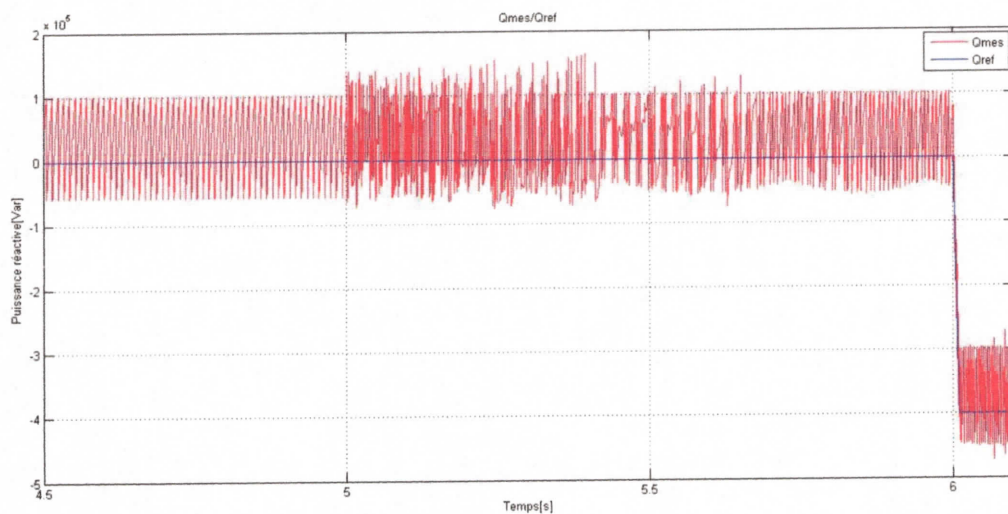
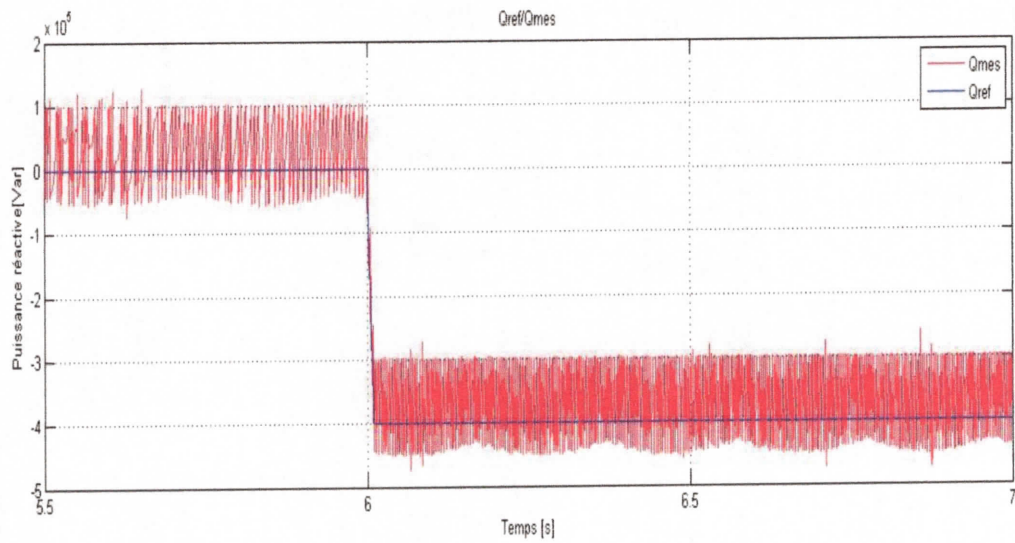
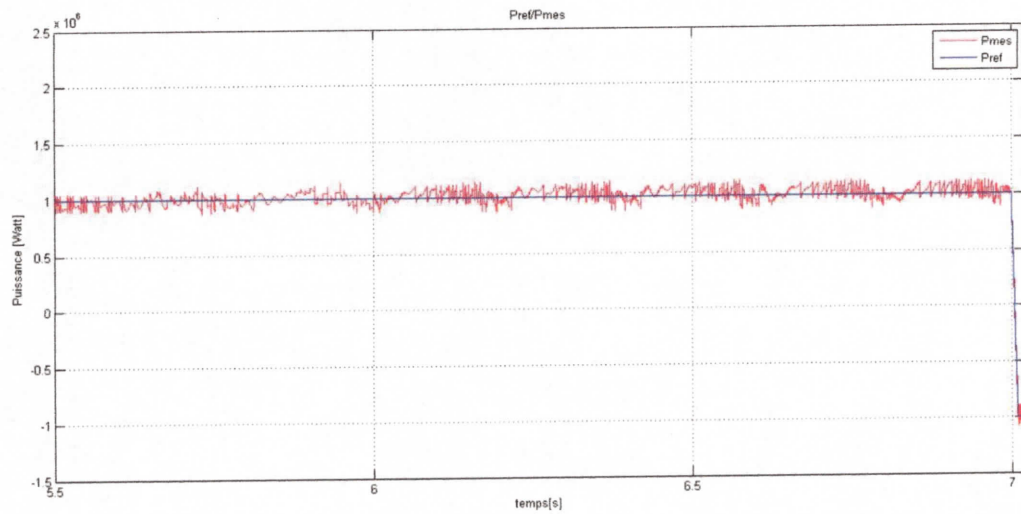


Figure III.15 puissance réactive statorique ( $P_s$ )

À l'instant ( $t=5$ s) on a changé la valeur de référence de la puissance active et on a laissé constante la valeur de référence de la puissance réactive.



**Figure III.16** puissance réactive statorique (Ps)**Figure III.17** puissance active statorique (Ps)

Dans la simulation suivante, on fait changer la valeur de la résistance statorique pour quel soit différente de la valeur réelle dans la machine pour voir l'influence de cette perturbation sur le système de commande des puissances actives et réactives.

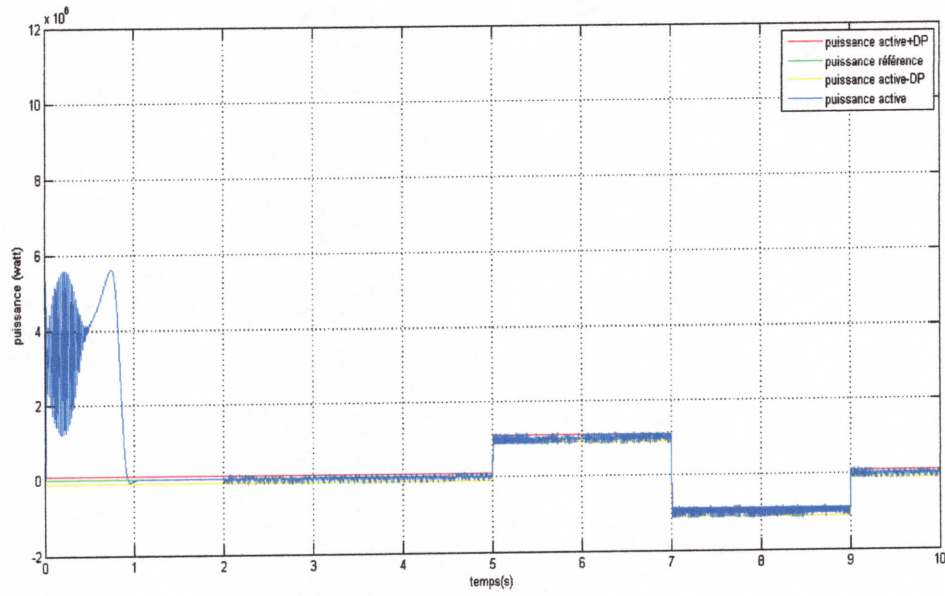


Figure III.18 puissance active statorique  $P_s$  ( $R_s=0.018\Omega$ )

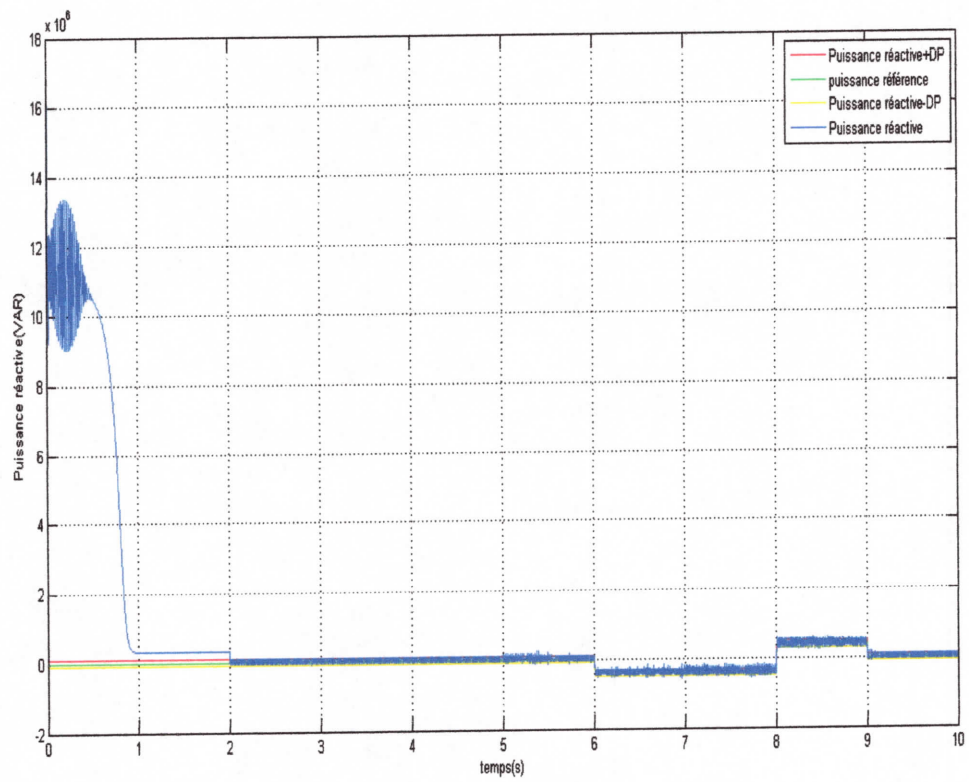


Figure III.19 puissance réactive statorique  $Q_s$  ( $R_s=0.018\Omega$ )

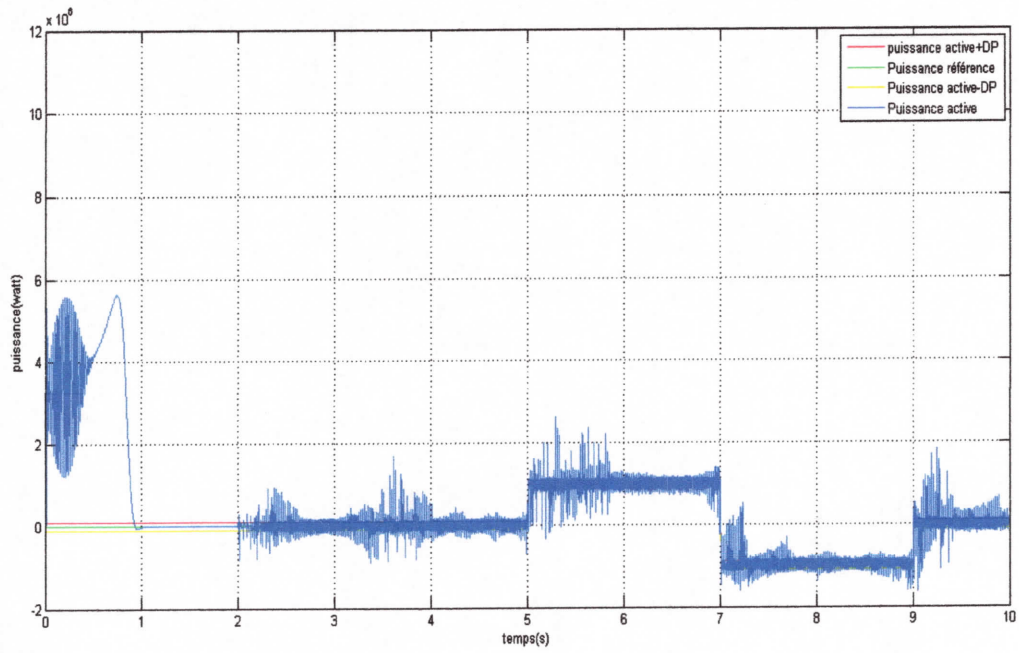


Figure III.20 puissance active statorique  $P_s$  ( $R_s=0.024\Omega$ )

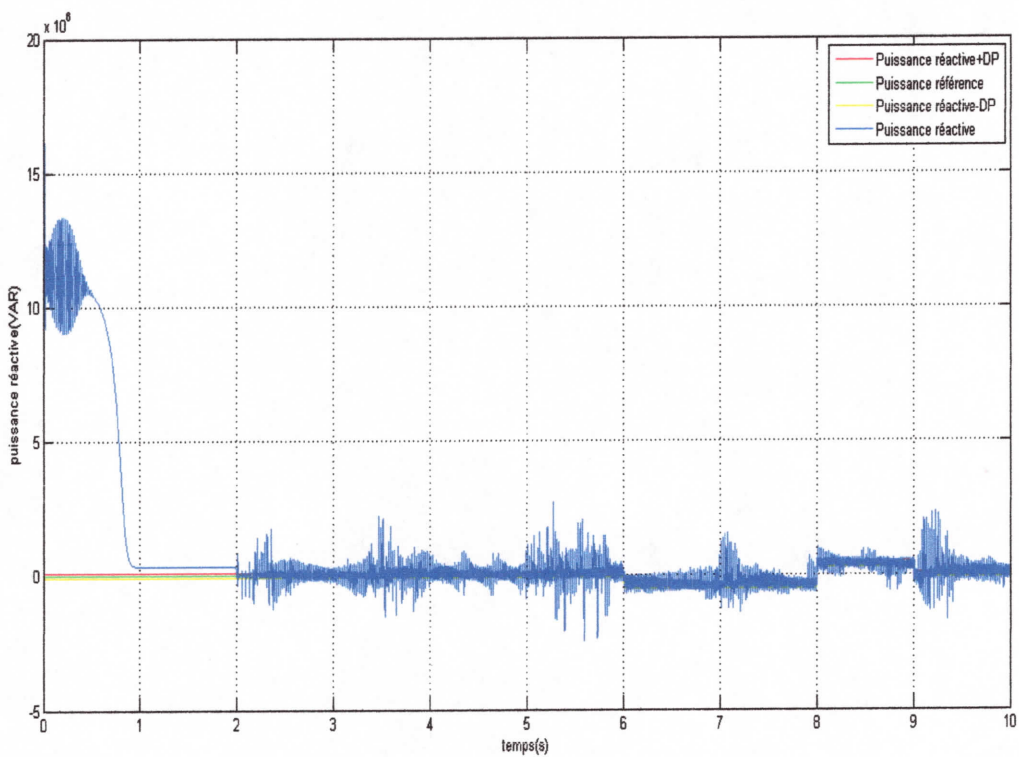


Figure III.21 puissance réactive statorique  $Q_s$  ( $R_s=0.024\Omega$ )

## II.5. conclusion

Dans ce chapitre on a proposé une stratégie d'une commande direct des puissances active et réactive. La méthode est basée sur une sélection des vecteurs tension selon la position du flux statorique est l'erreur entre les valeurs calculées et les valeurs de référence des puissance active et réactive. Aussi, la difficulté de l'estimation du flux rotorique est résolue. Pour la DPC, on a besoin comme paramètres que de la résistance statorique qui a un influence négligeable sur le système.

Une table de commutation optimale qui utilise les résultats d'erreur des puissances actives et réactives utilisent des comparateurs a hystérésis.

La simulation de la commande directe de puissance est faite par MATLAB/SIMULINK qui confirme une efficacité et robustesse.





## *Conclusion générale*

## Conclusion générale

Dans ce travail nous avons présenté la machine asynchrone double alimentée comme étant une solution prometteuse dans les applications de génération de l'énergie électrique à vitesse variable, notamment l'énergie éolienne.

Ce type de machine peut fonctionner dans un mode peu particulier dans les deux quadrants (en moteur ou en génératrice), de plus cette dernière (MADA) offre une large gamme opérationnelle en vitesse (hypo synchronisme ou hyper synchronisme).

Dans le premier chapitre, on a présenté des généralités sur l'énergie éolienne, avantages et inconvénients de son utilisation, les différents types d'éoliennes utilisées, et enfin de quelques critères de sa classification, et les machines le plus utilisées.

Le deuxième chapitre de ce mémoire est consacré à une étude générale de la machine asynchrone à double alimentation et ses différents modes de fonctionnement. Nous avons développé la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en utilisant la transformation de PARK. Et enfin Les résultats de simulation de ce modèle sur Matlab/Simulink.

Dans le troisième chapitre, la commande vectorielle élaborée est en puissance active et réactive statoriques puisque le terme de puissance est très utilisé dans le domaine la production d'énergie par éolien. Dans cette partie, on a présenté l'étude théorique de la commande directe de puissance (DPC), où on a exprimé les grandeurs statoriques de la machine asynchrone à double alimentation en fonction des grandeurs rotoriques ayant pour but le pilotage de la MADA par le rotor. Le bon suivi des valeurs de référence pour les deux puissances actives et réactives statoriques par les puissances réelles débitées par le stator de la machine a montré l'efficacité de la commande appliquée à priori la stratégie par un onduleur à deux niveaux alimenté par une source continue.

# Annexe

### **Paramètre de la MADA**

Résistance statorique ( $R_s$ )= 0.012  $\Omega$

Résistance rotorique ( $R_r$ )= 0.021  $\Omega$

Inductance cyclique statorique ( $L_s$ )= 0.0137 H

Inductance cyclique rotorique ( $L_r$ )= 0.0136 H

Inductance cyclique mutuelle ( $L_m$ )= 0.0135 H

Nombre de paires de pole ( $P$ )=2

Coefficient de frottement visqueux ( $f_r$ )= 0.024 N.sec/rad

Inertie de l'arbre ( $J$ )= 100 kg.m<sup>2</sup>

Fréquence du réseau =50 Hz

### **Paramètres de la commande DPC**

Puissance active de reference ( $P_{ref}$ ) =1e6 Watt

Puissance reactive reference ( $Q_{ref}$ ) = 1e4 Var

Bande des comparateurs à hystérésis ( $DP$ ) = 0.1\* $P_{ref}$

Tension d'alimentation d'onduleur ( $E$ ) = 220 $\sqrt{2}$  volt

Constant de temps de la commande = 1e-4 seconde

### **Paramètres de simulation**

Type : variable-step

Solver : ode 45 (dormand-prince)

Max step size : auto

Relative tolerance : 1e<sup>-3</sup>

### Liste des symboles

$E_c$  : Energie cinétique en Joule (J)

$m$  : Masse du volume d'air en Kg

$v$  : Vitesse instantanée du vent en m/s

$\rho$  : Masse volumique en kg/m<sup>3</sup>

$v$  : Le volume d'air en m<sup>3</sup>

$P_{vent}$  : puissance de vent

$C_p$  : est le coefficient de performance

$P_m$  : puissance extraite du vent

$P_{mt}$  : la puissance totale théoriquement disponible du vent

$V_s, V_r$  : tension simple respectivement statorique et rotorique

$V_{ds}, V_{qs}$  : tension statorique exprimées dans le repère de Park respectivement sur les axes d et q

$V_{dr}, V_{qr}$  : tension rotorique exprimées dans le repère de Park respectivement sur les axes d et q

$I_{ds}, I_{qs}$  : courant statorique exprimées dans le repère de Park respectivement sur les axes d et q

$I_{dr}, I_{qr}$  : courant rotorique exprimées dans le repère de Park respectivement sur les axes d et q

$R_s$  : Résistance de chaque enroulement du stator

$R_r$  : Résistance de chaque enroulement du rotor

$L_s$  : Inductance cyclique statorique

$L_r$  : Inductance cyclique rotorique

$M_s$  : Inductance mutuelle entre les enroulements statoriques

$M_r$  : Inductance mutuelle entre les enroulements rotorique

$M_{sr}$  : Inductance mutuelle entre les enroulements statoriques et rotoriques

$C_{em}$  : Couple électromagnétique

$C_r$  : Couple résistant

$f$  : Coefficient de frottement

$J$  : Inertie de la machine

$\phi_s, \phi_r$  : Respectivement flux statorique et rotorique

$\phi_{sd}, \phi_{sq}, \phi_{rd}, \phi_{rq}$  : Respectivement flux statorique et flux rotorique sur les axes d et q  
 $P_s, Q_s$ : Puissance statorique et reactive.

### Liste des figures

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

Figure I.2: Différents type des éoliennes à axe vertical type "Darrieus et Savonius".

Figure I.3: Éolienne à axe horizontal.

Figure I.4: Capteurs à axe horizontal.

Figure I.5: Les constitutions d'une nacelle.

Figure I.6: Schéma générale d'éolienne à axe horizontal.

Figure I.7 : Surface de section S traversée par un vent de vitesse  $\vartheta$  pendant un temps t.

Figure I.8: Puissance en fonction de la vitesse du vent.

Figure I.9 : Machine synchrone connectée directement au réseau

Figure I.10 : machine asynchrone connectée directement au réseau

Figure I.11 : schéma de principe de la machine asynchrone à double alimentation

Figure II.1 : Schéma du rotor de la MADA à rotor bobiné

Figure II.2 : Structure de la MADA sans balais

Figure II.3 : Structure en cascade de deux machines asynchrones

Figure II.4 : fonctionnement de la MADA dans les quatres quadrants

Figure II.5: Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.

Figure II.6 : Transformation de Park

Figure II.7 : Représentation de la MADA dans les deux repères.

Figure II. 8 : Schéma bloc de la MADA- modélisation

Figure II. 9 : couple électromagnétique



Figure II. 10 : vitesse de rotation de l'arbre de la machine

Figure II.11 : courant  $I_{sa}$

Figure II.12 : convertisseur indirect

Figure II.13 : Schéma d'un convertisseur matriciel

Figure II.14 : Schéma d'un cyclo convertisseurs

Figure II.15 : Schéma de l'onduleur simplifié par des interrupteurs

Figure III.1. Circuit équivalent de la MADA dans le référentiel rotorique ( $\alpha_r, \beta_r$ )

Figure III.2. Relations entre les vecteurs flux statorique et rotorique dans le référentiel rotorique et statorique

Figure III.3 : Vecteurs tensions et la commande du flux rotorique

Figure III.4 : comparateurs à hystérésis des puissances actives et réactives

Figure III.5 : Schéma général de la DPC pour la une MADA

Figure III.6 : Schéma de simulation de la commande DPC

Figure III.7 : schéma de bloc de la commande

Figure III.8 : schéma bloc de calcul de flux

Figure III.9 : bloc de calcul des puissances

Figure III.10 : schéma bloc de démarrage

Figure III.11 : schéma bloc de l'onduleur

Figure III.12 puissance active statorique ( $P_s$ )

Figure III.13 : puissances actives et réactives ( $Q_s$ )

Figure III.14 puissance active statorique ( $P_s$ )

Figure III.15 puissance réactive statorique ( $P_s$ )

Figure III.16 puissance réactive statorique ( $P_s$ )

Figure III.17 puissance active statorique ( $P_s$ )

Figure III.18 puissance active statorique  $P_s$  ( $R_s=0.018\Omega$ )

Figure III.19 puissance réactive statorique  $Q_s$  ( $R_s=0.018\Omega$ )

Figure III.20 puissance active statorique  $P_s$  ( $R_s=0.024\Omega$ )

Figure III.21 puissance réactive statorique  $Q_s$  ( $R_s=0.024\Omega$ )

## Liste des tableaux

Tableau I.2: Classification des turbines éoliennes.

Table III.1 : l'influence des vecteurs tension sur les puissances actives et réactives

Table III.2 : table de commutation optimale

# Bibliographie



## Bibliographie

- [1] : O. Gergaud, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau, » Thèse de Doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, Décembre 2002.
- [2] : Mme Lilia Abdelhamid, « Contribution à l'Etude des Performances des Générateurs Electromagnétiques Utilisés dans les Systèmes Eoliens », Thèse de Magister Université de Batna 2008.
- [3]: S. EL-Aimani, « Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension », Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Centrale de Lille (ECL), 2005.
- [4] : SAKI ALI, BELAIDI MOURAD « Étude d'un Générateur Asynchrone dans La Production d'Energie Electrique par Eolienne », PFE d'Ingénieur d'Etat Ecole Nationale Polytechnique 2006.
- [5] : KHETTACHE LAID, « Étude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Machine Electrique Double Alimentée » Thèse de Magister Université de Batna 2007.
- [6] : REDJEM Radia, « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne » Thèse de Magister Université Mentouri De Constantine 2009.
- [7] : Naouel HAMDI, « Modélisation et commande des génératrices éoliennes mémoires » Thèse de Magister Université Mentouri De Constantine 2008.
- [8] : KENDOULI Fairouz, « Centrale éolienne et qualité de l'énergie électrique », Thèse de Doctorat Université Mentouri de Constantine 2012.
- [9] : H. Camblong, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable », Thèse de doctorat Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux 18 décembre 2003.
- [10] : Frédéric Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », Thèse de doctorat de l'université de Nantes, soutenue le 19/12/2003.

- [11] : MOUSSA SIDDO Abdelaziz, SOUMANA NOUHOU Ibrahim, « Etude du générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne » PFE d'ingénieur d'état Ecole Nationale Polytechnique 2007.
- [12] : TOUAL Belkacem, « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable » Thèse de magister Université de Batna, Soutenu le 17/10/2010.
- [13] DOUADI TAREK, " Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Génératrice Asynchrone ", mémoire d'Ingénieur d'État en Électrotechnique de l'Université de BATNA.
- [14] Boyette Armand, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne", Thèse de doctorat, université de Henri Poincaré, Nancy, France, 2006.
- [15] Global Wind Energy Council, « Global Wind 2008 Report. », disponible sur le site: <http://www.gwec.net.01/2010>.
- [15] B. Hopfenspeger et D.J. Atkinson, « Doubly-fed a.c. machines: classification and comparison », European Conference on Power. Electronics And Applications (EPE), Gras, 2001.
- [16] A. BOYETTE, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne ». Thèse doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I 2006.
- [17] Paul-Etienne VIDAL, « Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation ». Thèse doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse 2004.
- [18] SAID DRID, « Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'une machine à induction double alimentée à flux orienté avec optimisation de la structure d'alimentation : Théorie et Expérimentation ». Thèse doctorat, l'Université de Batna, Algérie 2005.
- [19] : Dr A. Meroufel, « Contrôle de la machine asynchrone » Université Djillali Liabès Sidi

[20] : Rachid ABDESSEMED, « Modélisation et simulation de machines électriques » Ellipses édition 2011. Bel-Abbès 2008/2009.

[21] : Lie Xu, Senior Member, IEEE, and Phillip Cartwright : « Direct Active and Reactive Power Control of DFIG for Wind Energy Generation »