

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira de Bejaia

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

2<sup>eme</sup> Année Master

# MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de master 2 en électrotechnique

Options : Energies renouvelables et Electromécaniques

Thème :

**Contrôle d'une génératrice asynchrone  
double alimenté en fonctionnement  
autonome**

Présenté par:

HADDAD Samir  
BOUKHEDAD Abdelghani

Promoteurs:

S.Tamalouzt  
K. Idjdarene

Année universitaire: 2011/2012

# Remerciements

*Tout d'abord nous remercions dieu tout puissant qui nous a gardé en bonne santé afin de faire ce modeste travail et qui nous a permis de vivre ce bonheur.*

*Tous nos vifs remerciements vont vers notre promoteur et enseignant S.Tamalouzt et K.Idjdarene pour ses conseils chaleureux, leurs encadrements, leurs disponibilités et leurs aides précieux pour réaliser ce modeste travail, pour cela on les assure de nos sincère gratitude et nos respect le plus profond.*

*Nous remercions les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner notre modeste travail.*

*Merci à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce projet.*

# *Dédicaces*

*Grâce à notre bonne volonté, notre acharnement, dieu tout puissant nous a donné la force et le courage pour la réalisation de notre mémoire.*

*Je dédié ce travail à ma très chère famille pour toute l'affection qu'ils m'ont donné, leur soutien moral et financier.*

*.Mes sœurs*

*.Mes frères*

*.Mes parents et ma grande mère*

*. Tous mes amis, lyes, lamine , idhir ,sonia*

*samir*

# Dédicaces

*Grâce à notre bonne volonté, notre acharnement, dieu tout puissant nous a donné la force et le courage pour la réalisation de notre mémoire.*

*Je dédié ce travail à ma très chère famille pour toute l'affection qu'ils m'ont donné, leur soutien moral et financier.*

*.Mes sœurs*

*.Mes frères*

*.Mes parents*

*. Tous mes amis, lyes, lamine , idhir ,*

*Abdelghani*



# **Sommaire**

## SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
<b>Chapitre I Généralité sur le système éolien</b>	
I .1. Introduction.....	4
I .2. Définition de l'énergie éolienne.....	4
I .3. Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	5
I .4. Les différents types d'éoliennes .....	5
I .4.1. Les éoliennes à axe vertical (VAWT).....	6
I.4.2 Les éoliennes à axe horizontal .....	9
I .4. 3. Constitution d'une éolienne à axe horizontal (HAWT .....	9
I .4.4.Systèmes de régulation: Trois systèmes de régulation existent... ..	10
I.5.Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique .....	13
I.5.1. Loi de Betz.....	13
I.5.2. Production optimal d'énergie.....	16
I. 6. Les générateurs électriques utilisés.....	17
I.7. Les éoliennes connectées au réseau électrique .....	18
I.7.1. Les éoliennes à vitesse fixe .....	18
I.7. 2. Les éoliennes à vitesse variable .....	20
I.7. 2. 1. Les avantages des éoliennes à vitesse variable connectées au réseau électrique .....	20
I.7. 2. 2. Les structures les plus utilisées dans le mode de fonctionnement connecté au réseau électrique.....	20
I. 8. Machine synchrone .....	22
I. 9. Les éoliennes en fonctionnement isolé et autonome .....	23
I. 9. 1. Machines synchrones.....	24
I. 9. 2. Machines Asynchrones .....	27
I. 10. Les structures des machines asynchrones à double alimentation.....	31
I. 10. 1. Double alimentation par le stator.....	31
I. 10. 2. Double alimentation par le stator et le rotor .....	31
I-11) Conclusion .....	32

## Chapitre II Modélisation de la chaîne éolienne

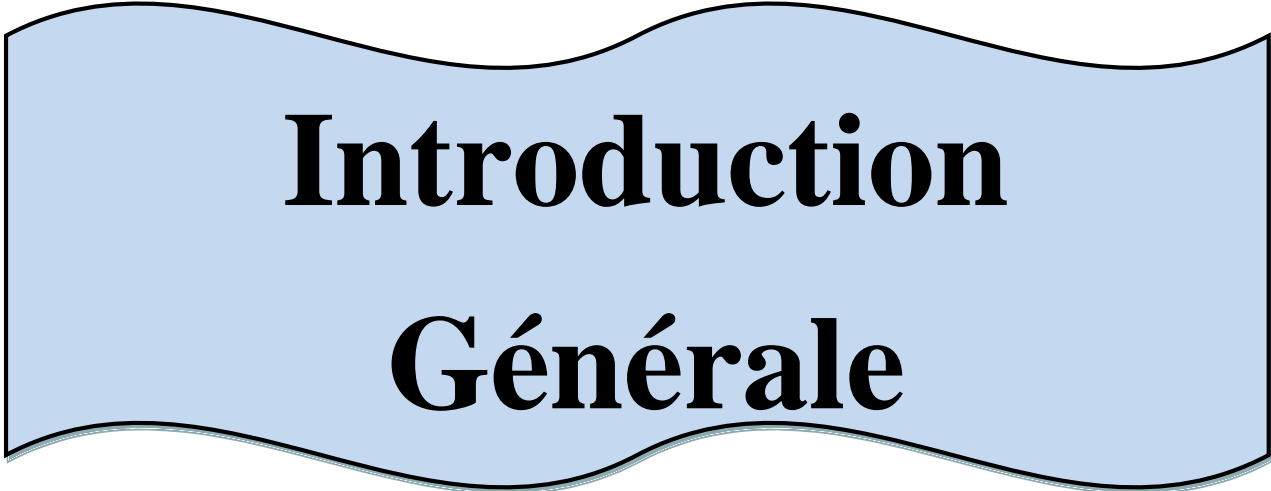
II.1. Introduction.....	33
II.2. Schéma de la structure choisie.....	33
II.3. Modélisation de la partie mécanique. ....	34
II.3.1. Modélisation de la vitesse du vent.....	34
II.3.2. Modélisation de la turbine... ..	34
II.3.3. Modèle du multiplicateur .....	35
II.3.4. Modèle de l'arbre de transmission.....	35
II.4. Modélisation de la partie électrique .....	36
II. 4.1. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA).....	36
II.4.2. Modes de fonctionnement de la MADA.....	41
II.5. Modélisation de l'onduleur.....	44
II.7. Conclusion .....	48

## Chapitre III commande de la chaîne éolienne

III.1.	
Introduction.....	49
III.2. Principe générale sur la DTC.....	49
III.3. Partitionnement algorithmique de la commande.....	50
III.4. Fonctionnement et séquences d'un onduleur de tension.....	50
III.5. Règle du comportement des grandeurs à contrôler (flux, couple).....	52
III.5.1 Principe de contrôle du flux rotorique.....	52
III.5.2 Principe de contrôle du couple de la machine.....	54
III.5.3 Choix du vecteur de tension.....	54
III.6. Estimateurs .....	56
III.6.1. Estimation du flux rotorique.....	56
III.6.2. Estimation du couple électromagnétique.....	57
III.7. Correction de flux rotorique et du couple électromagnétique.....	57
III.7.1. Correcteur de flux.....	57
III.7.2 Le correcteur de couple .....	58
III.8. Elaboration de la table de commande.....	58
III.9. Simulation de la chaîne éolienne proposée.....	59
III.10. Résultats de simulation.....	61

<b>III.10.1. Influence de la variation de la vitesse d'entraînement.....</b>	<b>61</b>
<b>III.10.2. Influence de variation de la charge.....</b>	<b>65</b>
<b>III.10.2.1. Régime hyposynchrone.....</b>	<b>65</b>
<b>III.10.2.2. Régime synchronisme.....</b>	<b>68</b>
<b>III.10.2.3. Régime hypersynchrone.....</b>	<b>70</b>
<b>III. 11. Conclusion.....</b>	<b>71</b>
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>72</b>





**Introduction  
Générale**



# **Chapitre I**



# **Généralité sur le système éolien**

## I.1. Introduction

Bien que connue et exploitée depuis longtemps, l'énergie éolienne fut complètement négligée pendant l'ère industrielle, au profit quasi exclusif, si l'on excepte l'hydroélectricité, des énergies fossiles. L'énergie cinétique du vent peut être convertie directement en énergie mécanique et être utilisable par exemple dans les anciens moulins à vent ou pour actionner des pompes. Mais, de nos jours, on la transforme en énergie électrique par l'emploi d'aérogénérateurs. Le nouvel intérêt porté à l'énergie éolienne depuis la moitié des années 70 résulte de deux préoccupations : d'une part, la protection de l'environnement et l'économie des combustibles fossiles qui en résulte. D'autre part, l'évolution des technologies rend la conversion de cette énergie de plus en plus rentable et donc son utilisation devient économiquement compétitive par rapport aux autres sources traditionnelles de même puissance [Kui 02].

Ce présent chapitre vise à donner une représentation générale sur les systèmes éolienne et sur les différentes chaînes utilisées dans la conversion de l'énergie éolienne soit dans les systèmes connectés au réseau électrique (moyennes et grandes puissances) ou dans les systèmes isolés et autonomes (petites puissances).

## I.2. Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur

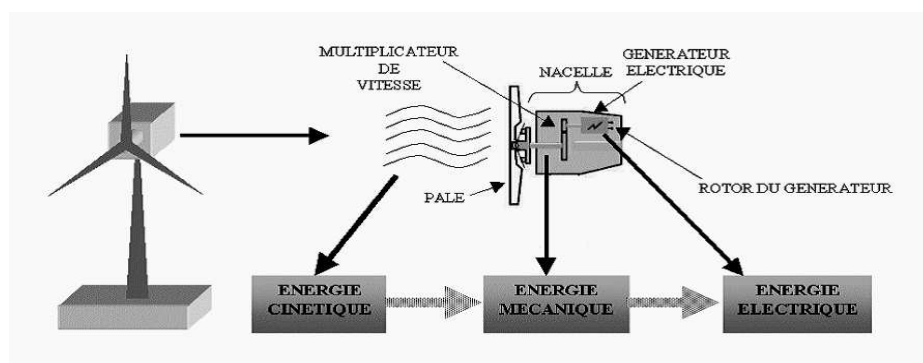


Figure I.1 - Conversion de l'énergie cinétique du vent [Poi 03].

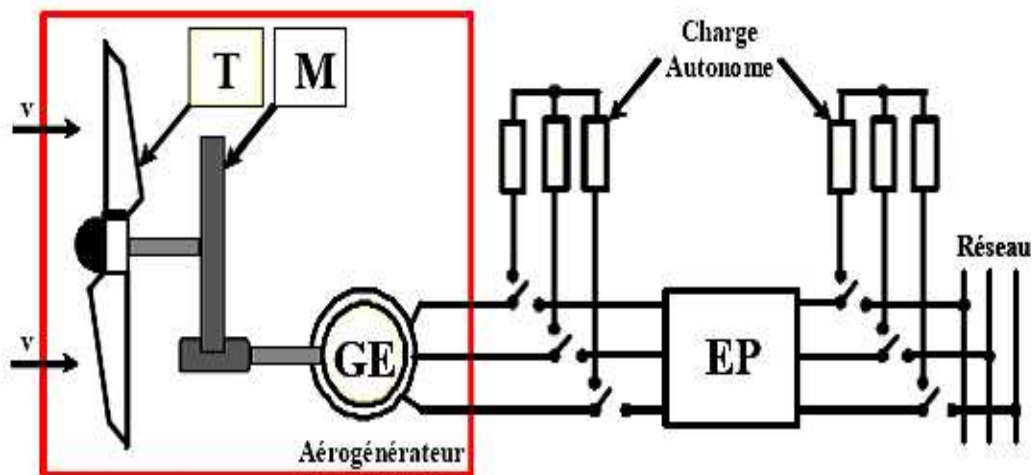
L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffusée, de plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif.

Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [Mar 97].

### I.3. Principe de fonctionnement d'une éolienne [Idj 10], [Mar 97]

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

D'une manière générale, un tel système de conversion est constitué d'une turbine (T), d'un multiplicateur de vitesse (M), d'une génératrice électrique (GE), généralement triphasée, et d'un circuit d'électronique de puissance (EP). Suivant l'utilisation visée, l'éolienne est alors connectée au réseau électrique ou alimente une charge autonome. Un schéma synoptique est présenté sur la **figure (I.2)**.



**Figure I.2** - Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

### I.4. Les différents types d'éoliennes

Selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice, on classe les éoliennes en deux types : celles à axe vertical et à axe horizontal:

### I.4.1. Les éoliennes à axe vertical (VAWT)

Cette technologie d'éoliennes est bien adaptée aux zones de vents perturbés par des habitations et le relief de la végétation. Elles peuvent aisément s'intégrer à l'architecture des bâtiments et sont d'une conception très simple (roue montée sur un axe qui entraîne directement une génératrice). Le principe aérodynamique permet de bons rendements pour des vitesses de vent faible, une autorégulation en vitesse pour les vents forts et un niveau sonore très faible voir inaudible [Idj 10].

Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il a l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et d'avoir une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage à cause des gabarits de leur mat qui subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [Mar 97].



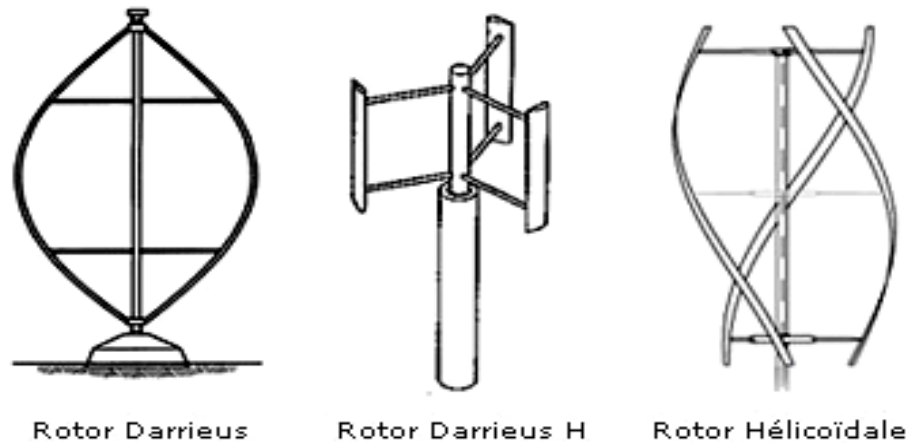
**Figure I.3 - Eolienne à axe vertical [Mul 02].**

Il existe principalement trois technologies VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) : les turbines Darrieus classiques, à pales droites (H-type) et la turbine de type Savonius. Dans tous les cas, les voilures sont à deux ou plusieurs pales [Mir 05].

#### **A. Eolienne à axe vertical de type Darrieus [Idj 10]**

Le principe est celui d'un rotor à axe vertical qui tourne au centre d'un stator à ailettes. Ce type de solution réduit considérablement le bruit tout en autorisant le fonctionnement à des vents supérieurs à 220 km/h et quelle que soit leur direction. Le principal défaut de ce type d'éolienne est leur démarrage difficile, en effet le poids du rotor pèse sur son socle, générant des

frottements. On distingue plusieurs déclinaisons autour de ce principe, depuis le simple rotor cylindrique ; deux profils disposés de part et d'autre de l'axe ; jusqu'au rotor parabolique où les profils sont recourbés et fixés au sommet et à la base de l'axe vertical.



**Figure I.4** - Différentes déclinaisons des éoliennes à axe vertical de type Darrieus

➤ **Avantage**

- ✓ Génératrice pouvant placée au sol (selon les modèles) ;
- ✓ Moins d'encombrement qu'une éolienne "conventionnelle" ;
- ✓ Intégrable au bâtiment.

➤ **Inconvénients**

- ✓ Démarrage difficile par rapport à l'éolienne de type Savonius ;
- ✓ Faible rendement.

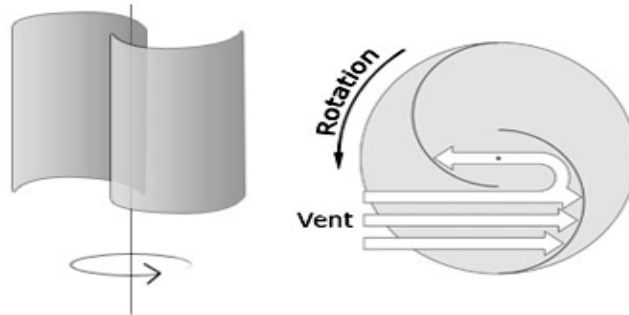
## **B. Eolienne à axe vertical de type Savonius**

Bien qu'elles possèdent un faible rendement par rapport aux éoliennes "classiques" à pâle, l'éolienne Savonius a l'avantage de fonctionner sur toutes les directions de vent, et à des vitesses de démarrage plus basse, autour de 2 m/s. Les éoliennes à axe vertical s'adaptent particulièrement bien aux effets de la turbulence et leur conception induit de bruit. Elles conviennent donc tout à fait bien au milieu urbain. En revanche, ce concept est fortement

pénalisé par son coefficient de puissance ( $C_p$  max  $\sim 0.2$ ) [Abd 07]. Ce type d'éolienne peut s'avérer utile pour capter des vents puissants (haute montagne, front de mer...).

➤ **Principe de fonctionnement d'une éolienne de type Savonius**

Elle est constituée schématiquement d'un minimum de deux demi-cylindres légèrement désaxés.



**Figure I.5** - Le rotor Savonius est composé de deux demi-cylindres désaxés [Abd 07].

➤ **Avantage**

- ✓ Faible encombrement ;
- ✓ Intégrable au bâtiment, esthétique ;
- ✓ Démarre à des faibles vitesses de vent contrairement à l'éolienne de type Darrieus ;
- ✓ Système peu bruyant ;
- ✓ Pas de contraintes sur la direction du vent.

➤ **Inconvénients**

- ✓ Faible rendement ;
- ✓ Masse non négligeable.



**Figure I.6** - Eolienne Savonius sur une toiture [Vri 83].

### I.4.2 Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal, plus largement employées, nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentant un rendement aérodynamique plus élevé. Elles démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. Dans ces types d'éoliennes, l'arbre est parallèle au sol. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie entre 1 et 3. Le rotor tripale est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [Vri 83]. Ce type d'éoliennes a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important.



**Figure I.7 - Eolienne à axe horizontal [Win-a 12].**

#### ➤ **Avantages [Poi 03]**

- ✓ Peu de contraintes mécaniques ;
- ✓ Grande efficacité ;
- ✓ Coût limité.

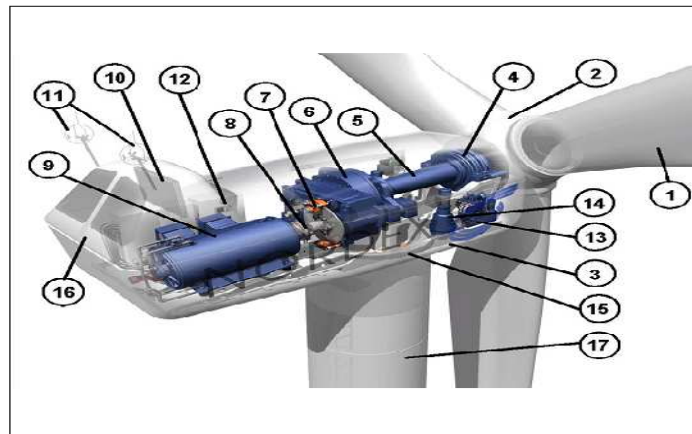
#### ➤ **Inconvénients [Abd 07]**

- ✓ Bruit conséquent ;
- ✓ Vibrations non négligeables ;
- ✓ Grande sensibilité au flux éolien et sa variation.

### I.4.3. Constitution d'une éolienne à axe horizontal (HAWT)

Les différents composants d'une éolienne à axe horizontal sont représentés sur la figure(I.8) [Mul 02].





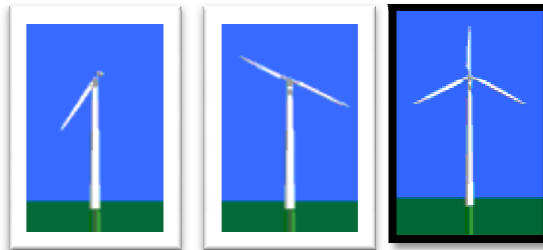
**Figure I.8** - Principales composantes de l'éolienne à axe horizontal.

- 1- Pales en composite fibre de verre. Pas fixe, profil de type stall (décrochage aérodynamique). Freins aérodynamiques d'extrémité pivotants.
  - 2- Moyeu du rotor en fonte.
  - 3- Structure de la turbine en fonte ductile ou en acier soudé galvanisé à chaud.
  - 4- Paliers du rotor à double rangée de billes.
  - 5- Arbre lent du rotor en acier haute résistance (arbre primaire).
  - 6- Multiplicateur de vitesse.
  - 7- Frein à disque sur l'arbre rapide avec témoin d'usure
  - 8- Accouplement avec la génératrice de type flexible (arbre secondaire).
  - 9- Génératrice électrique.
  - 10- Radiateur de refroidissement intégré au système multiplicateur - génératrice.
  - 11- Système de mesure du vent (anémomètre et girouette) transmettant les signaux au système de contrôle de la turbine.
  - 12- Système de contrôle surveille et pilote la turbine.
  - 13- Système hydraulique pour les freins d'extrémité de pale et le système d'orientation.
  - 14- Entraînement d'orientation de la tourelle a deux trains d'engrenages planétaires entraînés par des moteurs alimentés à fréquence variable.
  - 15- Paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque.
  - 16- Capot de la nacelle en structure acier recouverte de composite fibre de verre.
  - 17- Tour en acier tubulaire (plusieurs hauteurs possibles).
- En général, l'éolienne à axe horizontal est constituée de trois éléments principaux : La tour (mat), la nacelle et les pales qui sont supportées par le moyeu [Ham 08].

❖ **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 elle permet aussi l'utilisation des 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.

❖ **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.



**Figure I.9** - Schéma d'éoliennes à axe horizontal mono pales, bipale et tripale [Win.dk 12].

**Le moyeu** : C'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse de vent. Il est pourvu d'un système passif (aérodynamique), actif (vérins hydrauliques) ou mixte (active stall) qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation (prise de vent) [Har 10].



**Figure I.10** - Pitch contrôle

#### I.4.4. Systèmes de régulation: Trois systèmes de régulation existent:

❖ La régulation active par vérins hydrauliques, dite aussi "**pitch control**", consiste à faire varier l'angle de calage des pales pour profiter au maximum du vent instantané et limiter la puissance pour des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale. Ce système permet de limiter la puissance en cas de vent fort.

❖ Dans le cas de la régulation aérodynamique passive, appelée aussi "**stall control**", les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu de l'éolienne. Elles sont conçues spécialement pour subir des décrochages lors de vents forts. Ce type de régulation est utilisé pour la plupart des éoliennes car il a l'avantage de ne pas nécessiter de pièces mobiles et de système de régulation dans le rotor.

❖ La régulation active par décrochage aérodynamique, "**active stall**" : ce type de régulation vise à utiliser les atouts de la régulation passive et de la régulation active afin de contrôler de manière plus précise la production d'électricité. On l'utilise pour les éoliennes de fortes puissances [Idj 10].

➤ Suivant leur orientation en fonction du vent, les HAWT sont dites en « amont » (upwind) ou en « aval » (down-wind). La figure (I.11) montre les deux types mentionnés. Les premières ont le rotor face au vent ; puisque le flux d'air atteint le rotor sans obstacle, le problème de « l'ombre de la tour » (tower shadow) est bien moindre. Néanmoins, un mécanisme d'orientation est essentiel pour maintenir en permanence le rotor face au vent. Les éoliennes à rotor en aval n'ont pas besoin de ce mécanisme d'orientation mais le rotor est placé de l'autre côté de la tour : il peut donc y avoir une charge inégale sur les pales quand elles passent dans l'ombre de la tour. De ces deux types d'éoliennes,

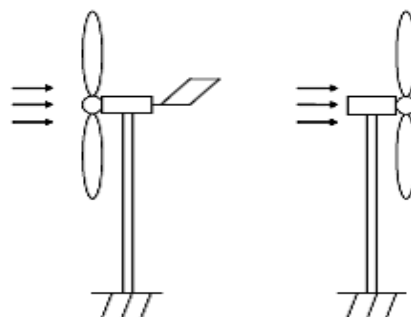
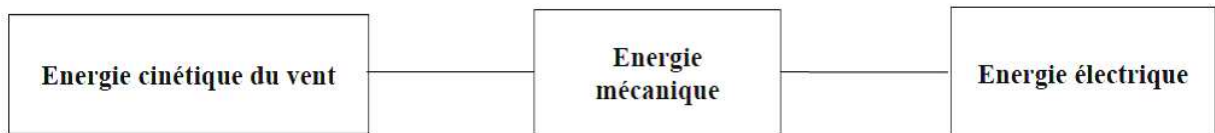


Figure I. 11 - Turbines éoliennes en amont et en aval [Mig 08].

### I.5. Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique

L'énergie cinétique du vent est captée par les pales afin de la transformer en énergie mécanique. La transformation de cette dernière en énergie électrique est assurée par un générateur électrique de type synchrone ou asynchrone.



**Figure I.12** - Principe de conversion de l'énergie dans une éolienne [Tou 00].

#### I.5.1. Loi de Betz [Poi 03]

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (I.13) où, on a représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne  $V_1$  et la vitesse du vent après passage à travers le rotor  $V_2$  soit  $\frac{V_1+V_2}{2}$ , la masse d'air en mouvement de densité  $\rho$  traversant la surface  $S$  des pales en une seconde est:

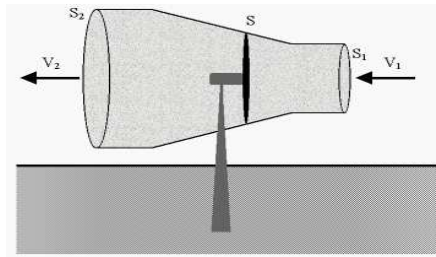
$$m = \frac{\rho S(V_1+V_2)}{2} \quad (\text{I. 1})$$

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

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

Soit en remplaçant  $m$  par son expression dans (1.1):

$$P_m = \frac{\rho S(V_1+V_2)(V_1^2-V_2^2)}{4} \quad (\text{I. 3})$$



**Figure I.13** - Tube de courant autour d'une éolienne.

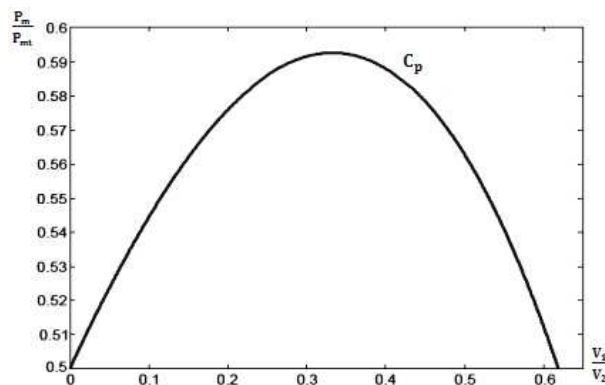
Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface  $S$  sans diminution de vitesse, soit à la vitesse  $v_1$ , la puissance  $P_{mt}$  correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{\rho S v_1^3}{2} \quad (\text{I.4})$$

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

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{v_1}{v_2}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2\right)}{2} \quad (\text{I.5})$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure (I.14)), on s'aperçoit que le ratio  $\frac{P_m}{P_{mt}}$  appelé aussi coefficient de puissance  $C_p$  présente un maxima de  $\frac{16}{27}$  soit 0,59. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.



**Figure I.14** - Coefficient de puissance  $c_p$  (Théorique).

La puissance mécanique qui peut être extraite du vent se détermine au moyen de l'expression suivante [Cou 02], [Rpb 06]:

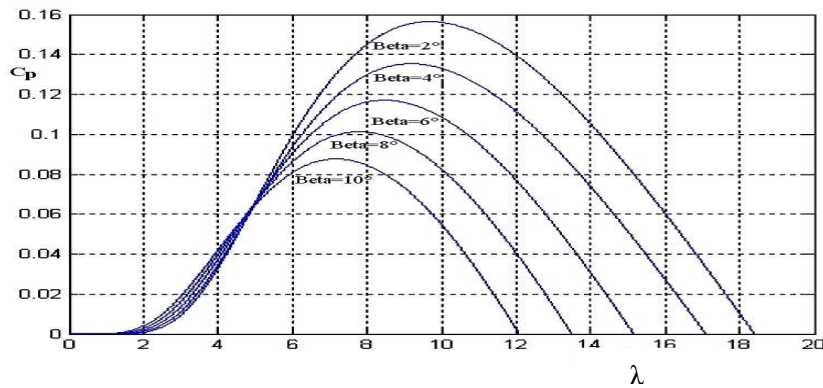
$$P_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 (C_p)(\lambda, \beta) v^3 \quad (\text{I. 6})$$

Où  $\rho$  est la masse volumique de l'air en kilogrammes par mètre cube ( $\text{Kg. m}^{-3}$ ),  $R$  est le rayon de la turbine (ou longueur d'une pale) en mètre (m),  $v$  la vitesse du vent en mètre par seconde ( $\text{m. s}^{-1}$ ) et  $C_p$ , le coefficient de puissance qui, correspondant au rendement aérodynamique de la turbine, a une évolution non linéaire en fonction du ratio de vitesse,  $\lambda$  :

$$\lambda = \frac{R \Omega_t}{v} \quad (\text{I. 7})$$

Où  $\Omega_t$  est la vitesse mécanique de la turbine en radians par seconde ( $\text{rad.s}^{-1}$ ).

La caractéristique du coefficient de puissance varie avec l'angle d'orientation des pales ( $\beta$ ) et le ratio de vitesse ( $\lambda$ ). La relation (I.6) montre qu'une petite variation de la vitesse du vent induit ( $v$ ) une grande variation de la puissance générée ( $P_t$ ).



**Figure I.15** - Influence de l'angle de calage sur le coefficient de couple [Hau 00]

On peut remarquer sur la figure (I.15) que le coefficient de puissance passe par un maximum pour un angle de calage égale à  $2^\circ$  et une valeur particulière du rapport de vitesse que l'on appelle  $\lambda_{opt}$ , pour laquelle on a le coefficient de puissance  $C_p$  maximale, et par voie de conséquence une puissance captée maximale. Il est alors possible d'élaborer des lois de commande qui permettent de capter la puissance maximale quelque soit la vitesse du vent jusqu'à la puissance nominale de la génératrice où la puissance extraite est limitée à cette valeur [Tou 00].

Cependant, pour la modélisation des turbines éoliennes, il est plus aisé d'utiliser le coefficient de couple  $C_m$  afin d'avoir un générateur de couple mécanique et non plus de puissance qui sera couplé à un générateur électrique (utilisation de l'équation mécanique des couples pour la modélisation).

➤ Le couple mécanique produit par la turbine s'exprime de la façon suivante [**Cou 02**] :

$$C_t = \left( \frac{P_t}{\Omega_t} \right) = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 V^2 C_m(\lambda, \beta) \quad (\text{I. 7})$$

On appelle coefficient de couple :

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} \quad (\text{I. 8})$$

Son évolution est non linéaire comme l'illustre à la Figure (I.15) peut être explicité à partir du coefficient de puissance :

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{T_t}{\frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot R_t \cdot V^2} \quad (\text{I. 9})$$

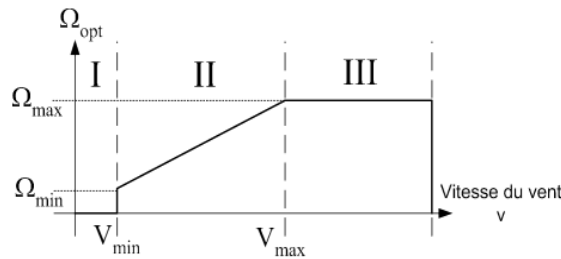
S : Surface balayée par les pales [ $\text{m}^2$ ].

### I.5.2 Production optimal d'énergie

Dans un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal en exploitant les maxima du réseau de courbes de la figure (I.15). Ce qui signifie que pour un régime de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe) on souhaite que la puissance fournie soit maximale ce qui correspond à une valeur de  $\lambda$  donnée appelée  $\lambda_{\text{opt}}$ . La vitesse de rotation optimale  $\Omega_{\text{opt}}$  résultante est alors donnée par :

$$\Omega_{\text{opt}} = \frac{\lambda_{\text{opt}}}{R} v \quad (\text{I. 10})$$

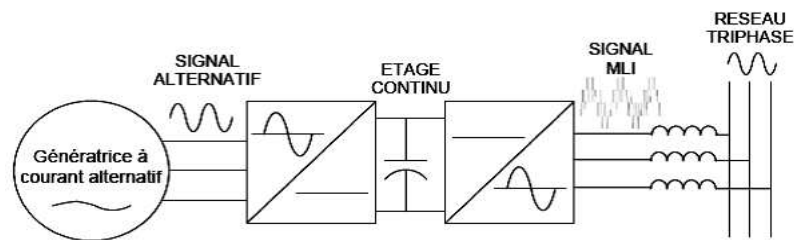
La caractéristique correspondante à cette relation est donnée sur la zone II de la figure (I.17) [**Dio 99**]. La zone I correspond aux vitesses de vent très faibles, insuffisantes pour entraîner la rotation de l'éolienne, et la zone III correspond aux vitesses de vent élevées pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale afin de ne pas subir de dégâts.



**Figure I.16** - Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable

La génératrice fournit alors de l'énergie électrique à fréquence variable d'où il est nécessaire d'ajouter une interface d'électronique de puissance entre celle-ci et le réseau (Figure I.17). Cette interface est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue.

L'onduleur coté réseau est alors découplé de la machine via le bus continu et il n'y a pas de lien direct entre la fréquence du réseau et celle délivrée par la machine. Un tel dispositif doit cependant être conçu et commandé de façon à limiter les perturbations qu'il est susceptible de générer sur le réseau. En effet, la tension délivrée n'est pas sinusoïdale et peut contenir des harmoniques indésirables. De plus, les convertisseurs sont dimensionnés pour faire transiter la totalité de la puissance échangée entre la génératrice et le réseau, ils représentent par conséquent un investissement financier et conduisent à des pertes non négligeables.



**Figure 1.17** - Interface d'électronique de puissance [Poi 03]

## I. 6. Les générateurs électriques utilisés

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration. Les avantages principaux des deux types de fonctionnement sont les suivants [Rod 00].



**a. Avantage de fonctionnement à vitesse fixe**

- ✓ Système électrique plus simple ;
- ✓ Plus grande fiabilité ;
- ✓ Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne ;
- ✓ Pas besoin de système électronique de commande ;
- ✓ Moins cher.

**b. Avantage de fonctionnement à vitesse variable**

- ✓ Augmentation du rendement énergétique ;
  - ✓ Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance ;
  - ✓ Réduction des efforts subis par le train de puissance ;
  - ✓ Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.
- Les deux types de machine électrique les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et asynchrones sous leurs diverses variantes. [Ack 02],[Hei 98].

Ce sont souvent des structures standard à une ou deux paires de pôles. Suivant les puissances et le fonctionnement désirés (connexion au réseau électrique ou fonctionnements isolé et autonome), différentes configurations de connexions au réseau ou à la charge peuvent être adoptées [Idj 10].

**I.7. Les éoliennes connectées au réseau électrique**

On peut recenser deux types d'éoliennes raccordées aux réseaux électriques : les éoliennes à vitesse fixe constituées d'une machine asynchrone à cage d'écureuil et les éoliennes à vitesse variable constituées d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) ou d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP).

Ces dernières (MADA et MSAP) sont principalement installées afin d'augmenter la puissance extraite du vent ainsi que pour leurs capacités de réglage [Dav 07].

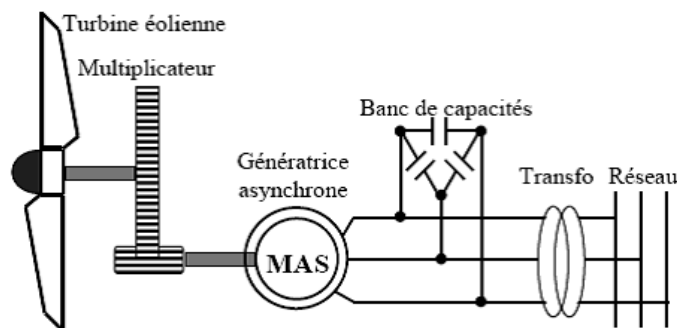
**I.7.1. Les éoliennes à vitesse fixe**

Sont souvent munis d'un système d'orientation de pales (pitch control) , permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau qui impose sa fréquence (50Hz) aux grandeurs statoriques [Poi 03].

Le système d'orientation des pales (pitch control) maintient alors la vitesse de rotation de la machine constante, entraînée au travers un multiplicateur, avec un glissement inférieur ou égal à 1% [Dav 07].

Outre la simplicité de la connexion, cette solution bénéficie des avantages de la machine asynchrone à cage qui est robuste, et qui a l'avantage d'être standardisée et fabriquée en grande quantité dans une très grande échelle de puissances.

Toutefois, la MAS à cage d'écureuil nécessite de l'énergie réactive pour assurer la magnétisation de son rotor. Afin de limiter l'appel d'énergie réactive au réseau, des bancs de capacités lui sont adjointes comme représenté sur la figure (I.18).



**Figure I.18** - Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse fixe [Idj 10]

➤ Les avantages et les inconvénients des éoliennes à vitesse fixe utilisant des MAS à cage d'écureuil : [[Lav 04 ], [Pol 05], [Cla 06].

#### ❖ **Avantage**

- ✓ Machine robuste ;
- ✓ Faible coût ;
- ✓ Pas d'électronique de puissance.

#### ❖ **Inconvénients**

- ✓ Puissance extraite non optimisée -Maintenance boîte de vitesse ;
- ✓ Pas de contrôle de l'énergie réactive ;
- ✓ la Magnétisation de la machine imposée par le réseau.

## I. 7. 2. Les éoliennes à vitesse variable

Sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié. Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales, et limite la plage de vitesses de vent exploitable. Ces deux principaux inconvénients peuvent, en grande partie, être levés grâce à un fonctionnement à vitesse variable qui permet alors de maximiser la puissance extraite du vent [Mulj 98]. Mais dans ce cas, une connexion directe au réseau n'est plus possible à cause du caractère variable de la fréquence des tensions statoriques. Une interface d'électronique de puissance entre la génératrice et le réseau est alors nécessaire [Cha 02].

Cette dernière est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue [Poi 03].

### I. 7. 2. 1. Les avantages des éoliennes à vitesse variable connectées au réseau électrique

[Cam 03], [Pen 96]

- Augmentation du rendement énergétique;
- Réduction des oscillations de couple dans le train de puissance;
- Réduction des efforts subis par le multiplicateur de vitesse et les autres parties mécaniques ;
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

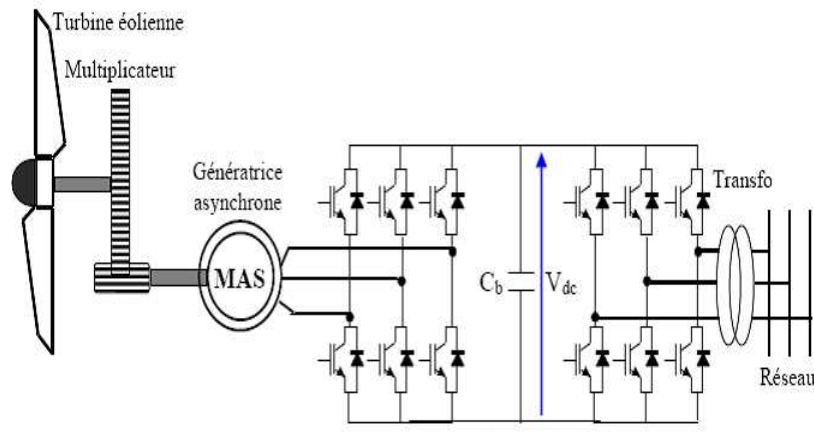
### I. 7. 2. 2. Les structures les plus utilisées dans le mode de fonctionnement connecté au réseau électrique

#### A- Machine asynchrone à cage

Les machines 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 [Mir 05]. Elles, peuvent être utilisées en fonctionnement à vitesse variable en introduisant un variateur de fréquence comme il est montré sur la figure (I.19).

Cette configuration autorise un fonctionnement à vitesse variable, sans limite physique théorique, mais elle est globalement coûteuse. En effet, le dimensionnement du variateur de

fréquence doit être à 100% de la puissance nominale du stator de la machine électrique. Pour ces raisons, cette configuration est rarement exploitée car elle n'est pas concurrentielle avec les autres types de machines et notamment la machine asynchrone à double alimentation.



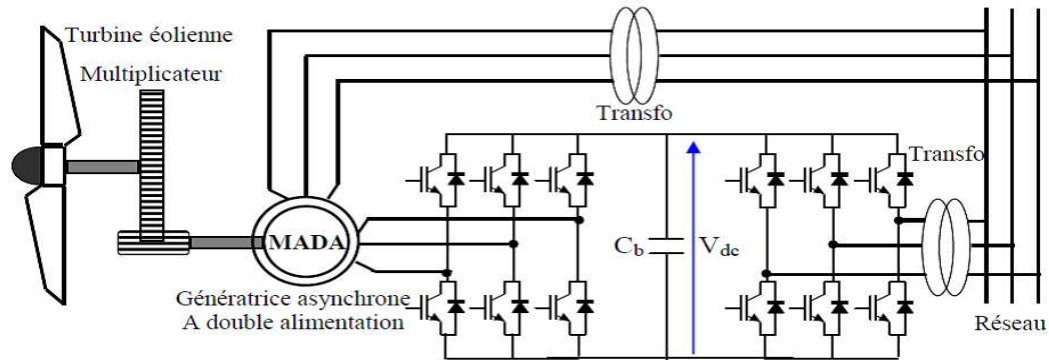
**Figure I. 19** - Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à fréquence variable  
[Idj 10].

## B- Machine asynchrone à double alimentation

Avec les machines synchrones, c'est actuellement l'une des deux solutions concurrentes en éolienne à vitesse variable. A la place du rotor à cage d'écureuil, ces machines asynchrones ont un rotor bobiné accessible par trois bagues munies de contacts glissants, ce qui diminue légèrement leur robustesse. Mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants (Vestas, Gamesa,...) utilisent ce type de machines. Les vitesses de rotation nominales de ces machines sont d'habitude un peu moins élevées par rapport aux machines à cage d'écureuil alors le rapport de multiplicateur de vitesses peut être moins important [Idj 10].

Une des solutions très intéressante et permettant d'obtenir une variation de la vitesse de rotation d'environ 30% autour de la vitesse de synchronisme consiste à coupler le rotor de la génératrice à double alimentation à travers deux onduleurs MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en onduleur ce qui limite le dimensionnement de la chaîne rotor se limite à 25% de la puissance nominale du stator de la machine. Ce qui assure une variation sur 30% de la plage de vitesse. C'est là son principal avantage tandis que son inconvénient majeur est lié aux

interactions avec le réseau, en particulier les surintensités engendrées par des creux de tension du réseau [Mir 05].



**Figure I.20** - Système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation à fréquence variable

### I. 8. Machine synchrone

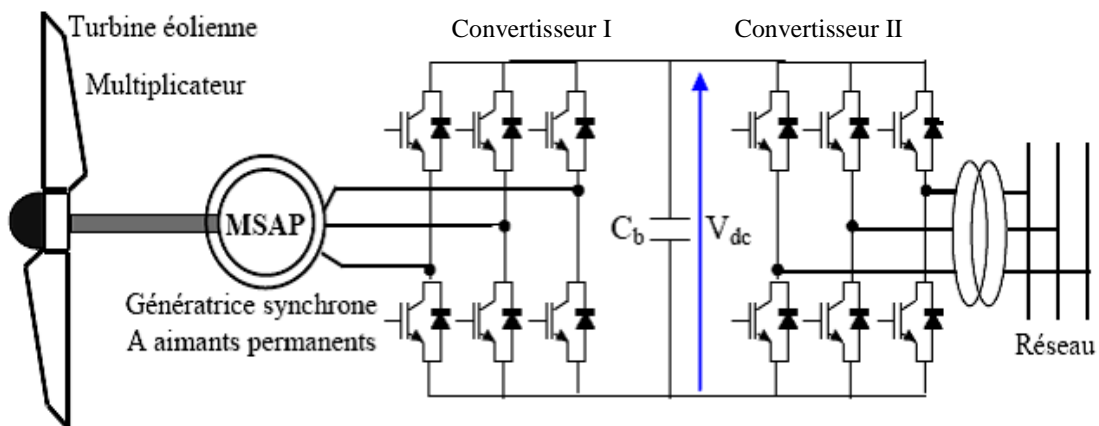
Les machines asynchrones présentent le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur les voilures éoliennes. Par contre, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes. Les systèmes de ce type possèdent aussi leurs défauts. Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier de système des bagues et balais. Le circuit d'excitation de l'inducteur demande la présence du réseau et une fourniture de la puissance réactive [Mir 05].

Par ailleurs, il est difficile de les munir de plusieurs paires de pôles [Hei 98]. Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents et à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation [Mir 05]. La solution la plus intéressante consiste à coupler le stator de la génératrice synchrone à aimants permanents à travers deux onduleurs à MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en mode onduleur (figure (I.21)). Dans ce cas, l'interfaçage avec le

réseau peut être entièrement contrôlé via le convertisseur connecté à ce réseau, tandis que le convertisseur connecté à la génératrice permet de contrôler la puissance générée par celle-ci. De plus, ce type de configuration permet d'assurer un découplage entre le comportement du générateur éolien et le comportement du réseau [Cla 06].

Toutefois, les deux convertisseurs doivent être dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice, ce qui constitue le principal inconvénient de cette configuration.

Enfin, des structures, interposant un hacheur entre le redresseur et l'onduleur sont également utilisées. La présence d'un hacheur permet alors un contrôle indirect de la puissance transistée autorisant ainsi un fonctionnement en commande à poursuite du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking 'MPPT') [Abd 07].



**Figure I.21** - Système éolien basé sur une machine synchrone à aimants permanents à fréquence variable [Idj 10].

### I. 9. Les éoliennes en fonctionnement isolé et autonome

Dans la plupart des régions isolées et ventées, l'énergie éolienne constitue la principale source potentielle d'énergie électrique. La baisse continue des prix des aérogénérateurs et les développements technologiques de l'électronique de puissance, conduisent à une utilisation d'éoliennes autonomes de plus en plus courante dans ces régions isolées.

La conception des petits systèmes éoliens est considérablement différente de celles des éoliennes connectées aux grands réseaux. En effet, le but de l'utilisation de ces petits systèmes n'est pas toujours la recherche de la conversion maximale de puissance éolienne mais la production de la

quantité d'énergie électrique adéquate alliée à un prix d'installation et de maintenance le plus faible [Sey 03], [Sey 03].

Les systèmes éoliens dans les applications isolées et autonomes sont généralement conçus pour répondre à un besoin énergétique allant du simple éclairage à l'électrification complète de villages. Dans cette partie, nous présenterons les différentes solutions de conversion d'énergie éolienne utilisées dans ces applications de petites puissances pour les deux systèmes isolés et autonomes.

### **I. 9. 1. Machines synchrones**

Les machines synchrones sont connues pour offrir des couples massiques importants pour des dimensions géométriques convenables. Elles peuvent ainsi être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes [Sag 03].

Les machines synchrones (MS) peuvent être à excitation bobinée, ou à excitation par aimants (gain de masse mais surcoût important dû au prix élevé des aimants). Pour les deux types d'excitation, les chaînes de conversion peuvent être les mêmes.

Globalement, le coût des machines synchrones est plus élevé que celui des machines asynchrones avec multiplicateur, mais à couple et masse égaux elles possèdent un meilleur rendement qui permet, à terme, un amortissement de sur investissement.

#### **A. Machines à réluctance variable**

La structure de machines à réluctance variable se décline sous une multitude de variantes, Ces machines se composent de stator avec un bobinage polyphasé et un rotor soit en pièce massive soit en empilement de tôles ferromagnétiques.

La plupart des machines à réluctance variable ont un facteur de puissance médiocre. L'excitation avec du courant continu permet d'améliorer ce paramètre. Les machines excitées ont en outre une caractéristique couple-courant linéaire (au moins aux faibles valeurs du courant), ce qui présente un avantage pour certaines applications [Sar 03].

Comme la machine asynchrone, cette structure absorbe de la puissance réactive pour sa magnétisation et dans sa version classique, son facteur de puissance est relativement faible qui limite son domaine d'application à quelques dizaines de kilowatts [Lub 03].

## B. Machines synchrones à rotor bobiné

Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier du système des bagues et balais. Le circuit d'excitation de l'inducteur nécessite [Bel 08]. La présence d'une alimentation pour ce dernier. Par conséquent, les sites isolés ne sont adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie ou d'une source de tension indépendante [Mir 05].

## C. Machines synchrones à aimants permanents

La caractéristique d'auto excitation du MSAP lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui le rend propice à l'application à des systèmes de génération éolienne [Mig 08]. Ces qualités sont contrebalancées par un coût plus élevé que les machines asynchrones.

Toutefois, différentes structures de machines synchrones à aimants permanents alimentant des charges autonomes à travers des dispositifs d'électronique de puissance existent [Idj 10]. Nous allons en donner une présentation laconique ci-dessous.

### C. 1. Structure avec redresseur à diodes

Le débit direct (à travers un simple redresseur en pont à diodes) de la machine synchrone sur une source de tension continue peut surprendre. En fait, c'est grâce à l'inductance d'induit de la machine synchrone de forte valeur que les courants restent proches des formes sinusoïdales et que les rendements de conversion sont corrects. En cas de surcharge de la batterie (trop de tension), un contacteur met en court-circuit l'induit de la génératrice. La turbine est alors arrêtée en rotation [Abd 07].

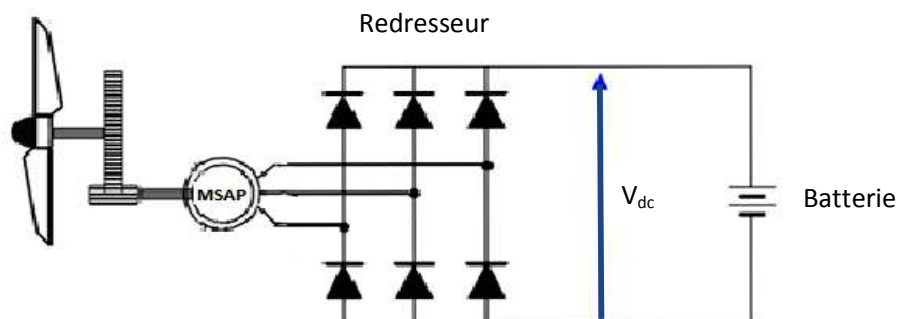
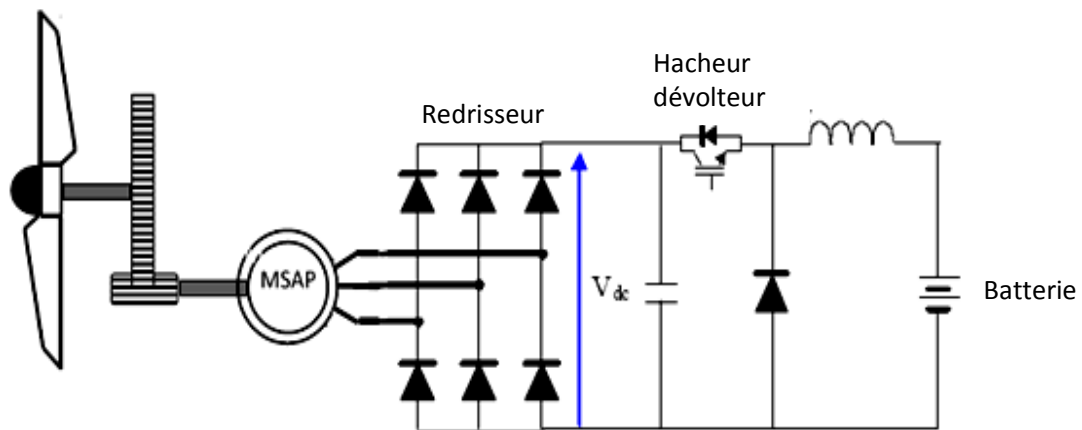


Figure I.22 – Machine synchrone avec redresseur à diodes



### C. 2. Structure avec redresseur à diodes et hacheur dévolteur

Le système de conversion d'énergie dédié à l'éolien doit permettre le fonctionnement à une puissance électrique maximale de façon à optimiser le rendement énergétique quel que soit le régime de vent. L'association d'un pont redresseur à diodes avec une génératrice synchrone à aimants permanents comporte cependant quelques limitations ne permettant pas toujours d'atteindre ce but. Afin de pouvoir y remédier, un hacheur dévolteur, débitant sur une batterie de stockage, est disposé à la suite du pont de diodes (figure (I.23)) [Mir 05], [Sch 03].



**Figure I.23** – Machine synchrone connectée à un redresseur à diodes et hacheur dévolteur

### C. 3. Structure avec redresseur à diodes et hacheur en pont

Toujours dans la même optique d'optimisation du rendement énergétique, une structure en pont à commande différentielle permet de fonctionner avec un rapport cyclique proche de 0,5 en commandant les deux interrupteurs T1 et T2, figure I.24. Cette configuration est avantageuse en termes de sûreté de fonctionnement mais nécessite deux fois plus de composants, d'où un coût conséquent et des pertes plus élevées [Mir 05].

### C. 4. Structure avec redresseur à MLI

Dans le cas du montage de la figure (I.25), il est possible d'effectuer un contrôle dynamique et fiable en vitesse ou en couple de la génératrice synchrone ce qui permet facilement de déplacer le point de fonctionnement sur toute la plage des vitesses de rotation [Lec 04]. Par contre, elle nécessite un montage plus complexe, trois bras complets donc six interrupteurs, et une commande qui requiert généralement un capteur mécanique de position [Idj 10].

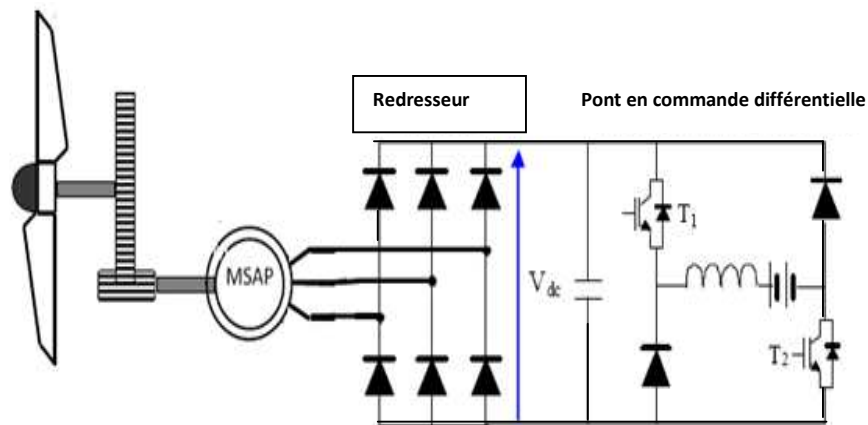


Figure I.24 – Machine synchrone avec convertisseur à diodes et hacheur en pont.

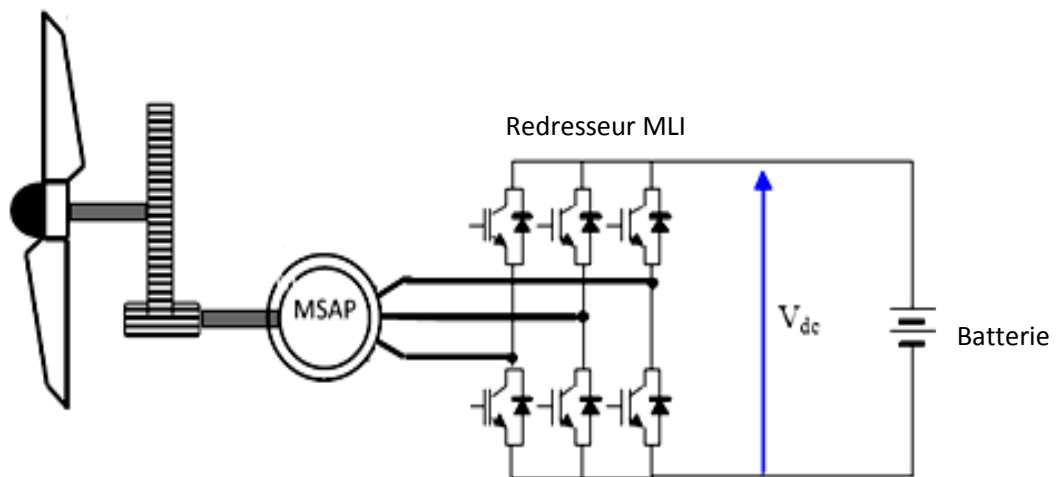


Figure I.25 – Machine synchrone connectée à un redresseur à MLI

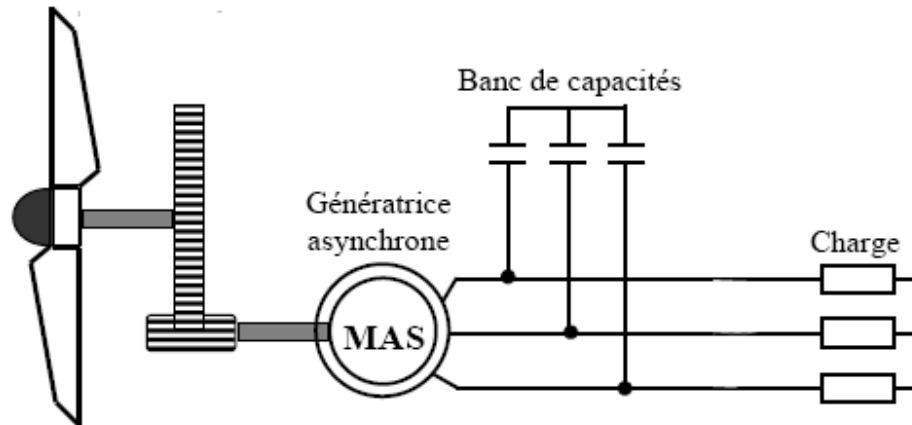
### I. 9. 2. Machines Asynchrones

Le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit. Son inconvénient majeur est la consommation d'un courant réactif de magnétisation au stator.

#### A. Machines asynchrones à cage d'écureuil

Jusqu'à présent la machine asynchrone à cage d'écureuil correspond au choix prépondérant de par sa simplicité, son bon rendement et une maintenance réduite [Ack 05].

La demande de puissance réactive est compensée par la connexion d'un groupe de condensateurs en parallèle avec le générateur, figure (I.26), ou par la mise en œuvre d'un convertisseur statique de puissance.



**Figure I.26** - Machine asynchrone auto – excitée avec une batterie de condensateurs.

L'utilisation d'un banc de capacités fixes ne permet pas de maîtriser le flux de puissance réactive et par conséquent maintenir l'amplitude et la fréquence de la tension délivrée constantes lors de variations de charge ou de vitesse du vent. Pour surmonter cet inconvénient, tout en gardant un banc de capacités d'auto excitation, plusieurs solutions ont été envisagées :

### A. 1. Capacités de compensation en série

La structure la plus couramment utilisée consiste à connecter, en plus des capacités parallèles, d'autres capacités en série avec la charge [Mur 96], [Shr 95], [Tou 99] ou avec le stator de la machine (dénommée en anglais "short-shunt connexion"), figure I.27.

### A.2. Configuration avec convertisseurs bidirectionnels (convertisseurs à MLI) [Idj 10]

Cette configuration permet le contrôle, par une commande adaptée, de la magnétisation et de la tension à la sortie de la génératrice asynchrone lorsque la vitesse du rotor et la charge électrique sont variables, figure I.28 .

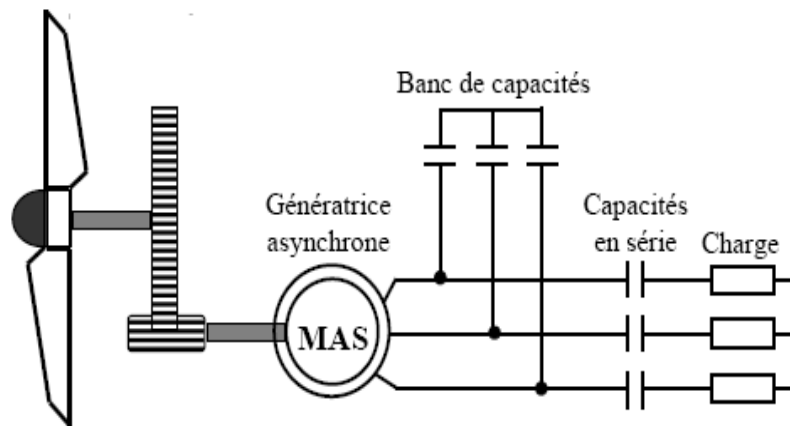


Figure I.27– Machine asynchrone auto – excitée avec compensation série

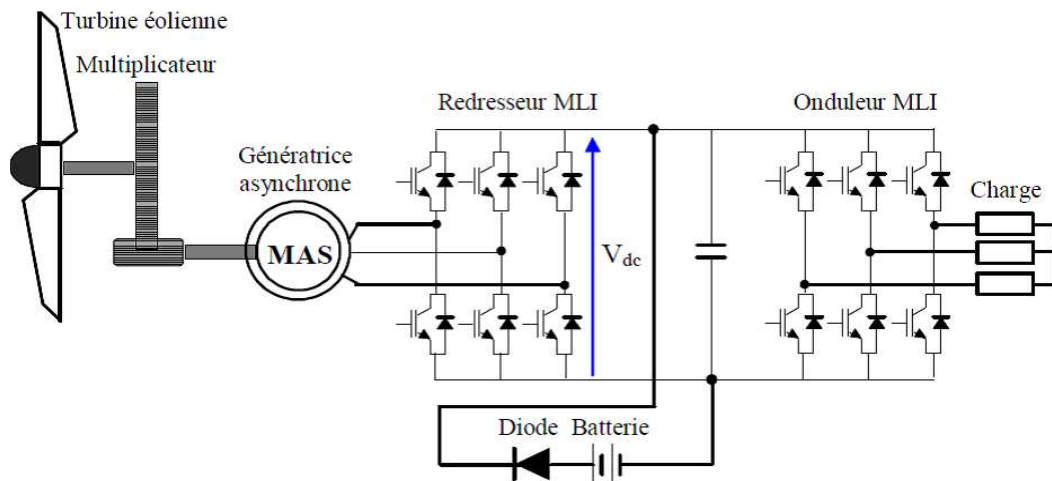
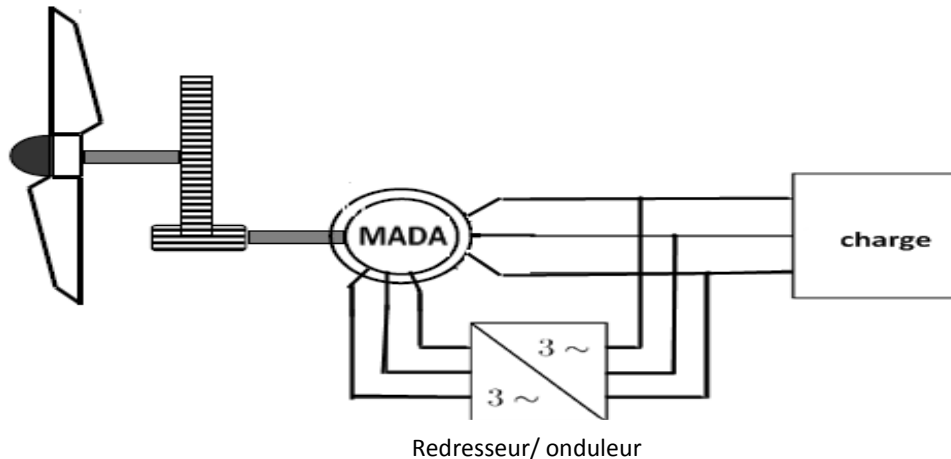


Figure I.28 – Structure à base de deux convertisseurs MLI

### b. Machines à double alimentation

Une des configurations en forte croissance dans le marché des turbines éoliennes est connue sous le nom de générateur asynchrone doublement alimenté (DFIG). La double alimentation fait référence à la tension du stator prélevée au réseau et à la tension du rotor fournie par le convertisseur. Ce système permet un fonctionnement à vitesse variable sur une plage spécifique de fonctionnement. Le convertisseur compense la différence des fréquences mécanique et électrique par l'injection d'un courant à fréquence variable au rotor (Figure (I.29)) [Kho 06].

L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotté des balais lorsque la machine tourne [Kho 06], [Idj 10].



**Figure I.29** - Schéma de principe de la double alimentation

En effet, dans le domaine éolien, la MADA présente bien des avantages : le convertisseur lié à l'armature rotorique est dimensionné au tiers de la puissance nominale du stator, les pertes dans les semi-conducteurs sont faibles, ...etc. Les principaux résultats obtenus avec ce type de configuration de la MADA peuvent être partagés en quatre catégories [Kho 06].

- 1- Modélisation, zones limites de fonctionnement et stabilité de la MADA.
- 2- Qualité de l'énergie fournie, qualité des courants et des tensions, notamment en présence des défauts au niveau du réseau d'alimentation.
- 3- Stratégies de commande de la MADA avec ou sans capteur de vitesse et de position.
- 4- Dimensionnement du convertisseur du rotor.

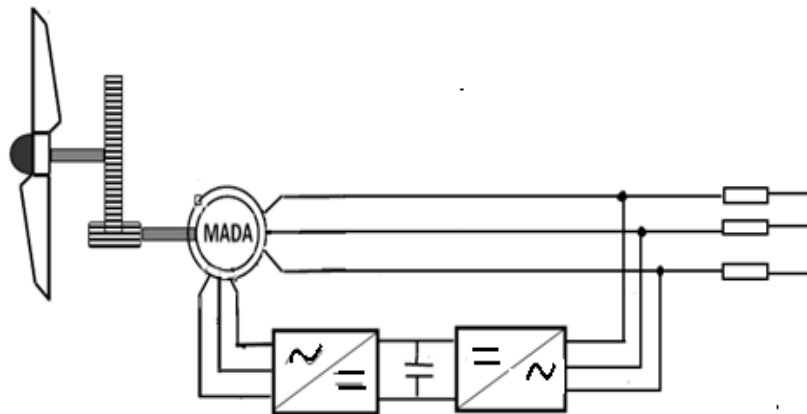
L'avantage des machines à double alimentation concernant la puissance réduite de dimensionnement du convertisseur électronique de puissance, était déjà bien connu avec les cascades hyposynchrones. Dans lesquelles on prélevait de la puissance au rotor pour la réinjecter sur la source d'alimentation. On les utilisait lorsqu'il suffisait d'une plage de réglage de vitesse s'étendant de la vitesse de synchronisme  $\Omega_s$  à une vitesse plus faible  $\Omega_{\min}$  (d'où l'appellation hyposynchrone), mais pas jusqu'à l'arrêt. Dans ce mode de fonctionnement, la puissance de dimensionnement du convertisseur statique est égale au produit du glissement maximal  $g_{\max}$  par la puissance maximale transitant par le stator [Mul 02].

## I. 10. Les structures des machines asynchrones à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasés classiques (asynchrone à cage ou synchrone), constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements.

### I. 10. 1. Double alimentation par le stator

Pour réaliser une double alimentation par le stator, la machine asynchrone est munie de deux bobinages statoriques distincts (figure (I.30)).

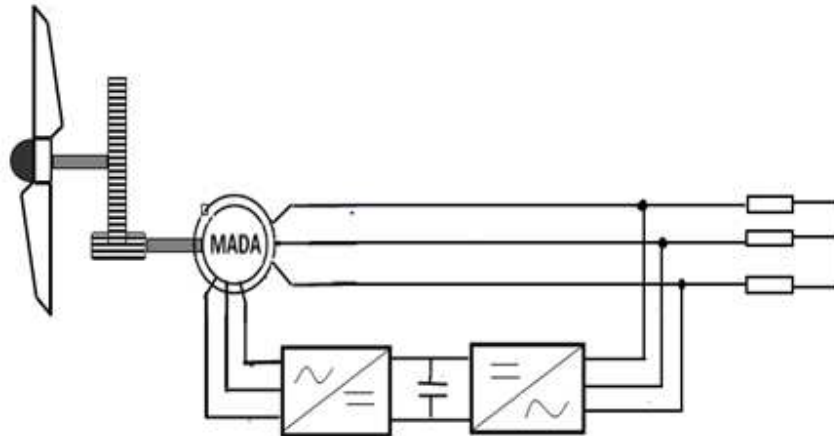


**Figure I.30** - Machine asynchrone à double bobinage statorique [Cha 90]

Le convertisseur de puissance connecté à l'enroulement d'excitation permet de contrôler le flux statorique de la machine; le glissement peut être ainsi contrôlé et donc la vitesse de la génératrice. En augmentant le flux, les pertes au rotor augmentent, le glissement aussi. En diminuant le flux, les pertes diminuent et le glissement également. Un second convertisseur est nécessaire pour créer le bus continu.

### I. 10. 2. Double alimentation par le stator et le rotor [Cha 90]

La structure de conversion est constituée d'une génératrice asynchrone à rotor bobiné entraînée par une turbine éolienne.



**Figure I.31** - Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor

### I. 11. Conclusion

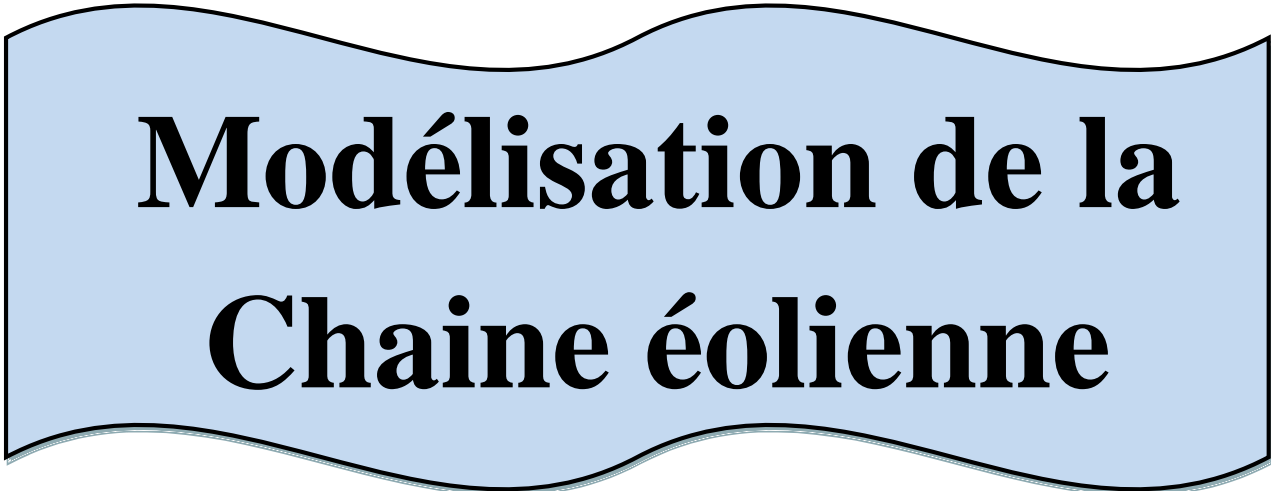
Une description de l'énergie éolienne a été présentée dans ce chapitre. Quelques notions principales au sujet de la technologie éolienne ont été données. On a commencé par les différents capteurs, le rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, puis les générateurs électriques utilisés dans le cas de connexion au réseau et en fonctionnement autonome.

A la fin de cette recherche, on s'est intéressé particulièrement à la structure de la machine asynchrone à double alimentation qui fera l'objet de notre travail.

La structure retenue pour notre étude comporte une turbine éolienne entraînant une génératrice asynchrone à double alimentation via un multiplicateur mécanique. Le stator de la machine est directement relié à une charge, le rotor lui aussi est connecté à cette charge via un convertisseur d'électronique de puissance. La modélisation du système proposé sera exposée au chapitre suivant.



## **Chapitre II**



# **Modélisation de la Chaîne éolienne**



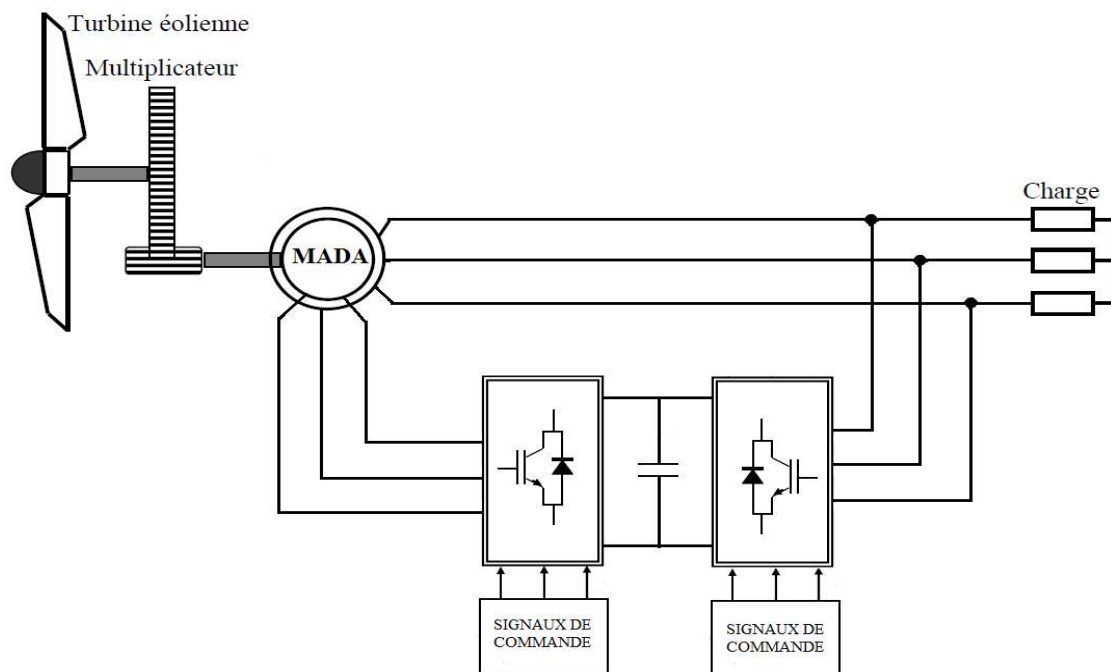
## II.1. Introduction

Avant d'étudier la chaîne éolienne, nous devons d'abord modéliser les différentes parties de cette chaîne. La modélisation permet d'une part de restituer une image de ce que l'on peut observer expérimentalement et d'autre part de prévoir des comportements plus variés que ceux de l'observation expérimentale.

Alors, ce chapitre sera consacré à la modélisation de la chaîne de conversion, élément par élément, qui nous servira par la suite à la mise en œuvre de tous ces derniers sous l'environnement MATLAB /simulink.

## II.2. Schéma de la structure choisie

La figure ci-dessous, représente un système éolien en fonctionnement autonome basé sur la machine asynchrone double alimentée, alimentant des charges passive (figure (II.1)). Le choix de cette structure est justifié par le fait qu'il est possible d'appliquer à cette topologie des lois de commande similaires à celles largement utilisées. Ce système permet de générer une puissance électrique d'une meilleure qualité.



**Figure II.1** – Schéma représentatif de système proposé

### II.3. Modélisation de la partie mécanique

#### II.3.1. Modélisation de la vitesse du vent

Le vent est la raison d'être des aérogénérateurs. L'énergie cinétique contenue dans le vent est transformée en partie en énergie mécanique par la turbine, puis en énergie électrique par le générateur. Il est donc une importante variable à modéliser car la précision des simulations dépendra de la qualité de son modèle. Une des méthodes les plus utilisées pour modéliser le vent est la caractéristique spectrale de Van Der Hoven. D'où, la grandeur de la vitesse du vent peut être décomposée en deux composantes:

- La composante turbulente du vent est un processus aléatoire stationnaire (ne varie pas avec la vitesse moyenne du vent)
- La composante lente; c'est la moyenne de la vitesse du vent varient régulièrement sur de plus longues périodes dans un site donné.

De nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés [Cam 03], sur des sites réels ont montré que la turbulence augmente avec la moyenne de la vitesse du vent [Rog 04]. L'un des principes retenu consiste de générer une série temporelle de la vitesse du vent à partir d'un bruit blanc gaussien en entrée, Pour ce faire, la vitesse du vent va être décomposée en deux composantes qui correspondent respectivement à la composante lente  $v_0$  (vitesse moyenne=cst) et la composante de turbulence  $V_t(t)$ (bruit blanc gaussien) :  $V(t) = V_0 + V_t(t)$  [Lei 92].

#### II.3.2. Modélisation de la turbine

Le dispositif, qui sera étudié, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur  $R_t$  entraînés par le vent et qui à leur tour entraînent la génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain  $G$ , qui permet d'augmenter la vitesse de rotation et diminuer le couple.

Par définition, l'énergie cinétique du vent est donnée par la formule suivante :

$$E_{cv} = \frac{1}{2} m V^2 \quad (\text{II. 1})$$

Où:

$$m = \rho S_t l \Rightarrow E_{cv} = \frac{1}{2} \rho S_t l V^2 \quad (\text{II. 2})$$

Et comme la puissance s'écrit :

$$P_v = \frac{d}{dt} E_{cv} \quad (\text{II. 3})$$

Donc

$$\begin{cases} P_v = \frac{1}{2} \rho \frac{S_t dl}{dt} V^2 \\ \frac{dl}{dt} = V \end{cases} \Rightarrow P_v = \frac{1}{2} \rho S_t V^3 \quad (\text{II. 4})$$

La puissance éolienne disponible sur l'arbre de la turbine extraite de la puissance du vent est donnée par :

$$P_t = C_p(\lambda) \frac{\rho S_t V^2}{2} \quad (\text{II. 5})$$

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple fournie est donné par :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = C_p(\lambda) \frac{\rho S_t V^3}{2} \frac{1}{\Omega_t} \quad (\text{II. 6})$$

### II.3.3. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine à la vitesse de la génératrice, son modèle peut être décrit par les équations suivantes :

$$\Omega = G \cdot \Omega_t \quad (\text{II. 7})$$

$$C_{\text{arbre}} = \frac{C_t}{G} \quad (\text{II. 8})$$

### II.3.4. Modèle de l'arbre de transmission

Les masses des différentes parties de la turbine sont représentées par l'inertie  $J_t$ . L'inertie totale  $J$  est constituée de la turbine ramenée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice elle-même  $J_g$  et en considérant que le multiplicateur de vitesse est idéal, l'inertie totale  $J$  est donnée par l'expression suivante :

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g \quad (\text{II. 9})$$

Le principe fondamental de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total au rotor :

$$C_{\text{mec}} = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II. 10})$$

Avec :

$$C_{\text{mec}} = C_{\text{arbre}} - C_{\text{em}} - C_{\text{visq}} \quad (\text{II. 11})$$

Le couple résistant du aux frottements ( $C_{visq}$ ) est modélisé par un coefficient  $f$ , tel que :

$$C_{visq} = f. \Omega \quad (\text{II. 12})$$

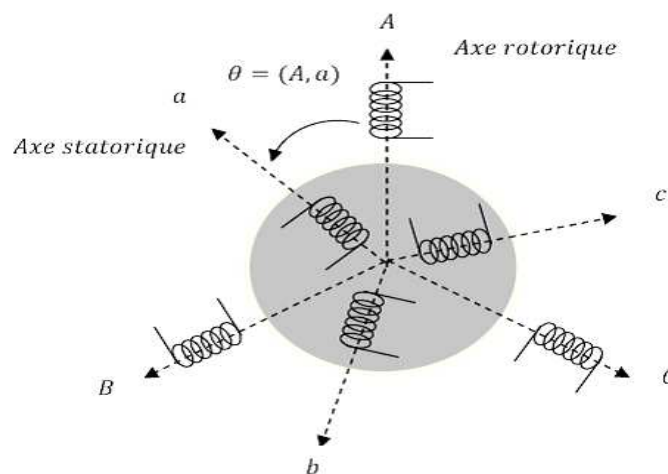
## II.4. Modélisation de la partie électrique

### II. 4.1. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA)

L'étude du fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation, en moteur comme en générateur, nécessite de disposer d'un modèle mathématique. Afin d'établir la modélisation de la MADA, nous allons déterminer le modèle d'une machine asynchrone à rotor bobiné. Ce modèle sera établi de la même manière que le modèle de la machine asynchrone à cage avec comme différence l'existence de tensions rotorique non nulles [Car 95],[ Tap 05], [Lin 05], [Joi 03], [Boy 06],[ Phi 06].

La modélisation analytique classique de la machine asynchrone à double alimentation se fait sous les hypothèses simplificatrices résumées ci-dessous :

- L'entrefer est supposé à épaisseur constante ;
- La machine n'est pas saturé ;
- L'effet des encoches est négligé ;
- L'induction dans l'entrefer est supposée à répartition sinusoïdale ;
- La distribution spatiale des forces magnétomotrices d'entrefer est supposée sinusoïdale ;
- Les pertes ferromagnétiques sont négligées (pas de courants de FOUCAULT ni d'hystérésis) ;
- L'influence de l'effet de peau est négligée ;



**Figure II.2** – Représentation schématique d'une machine asynchrone double alimentée.

En tenant compte du schéma équivalent de la machine asynchrone à double alimentation, (figure (II.2)) ainsi des hypothèses simplificatrices citées précédemment, on peut écrire les équations générales de la machine asynchrone à rotor bobiné qui s'écrivent, dans un repère triphasé, de la manière suivants, **[Poi 03], [Jan 03]** :

$$[V_{sabc}] = [R_s] \cdot [i_{sabc}] + \frac{d[\Phi_{sabc}]}{dt} \quad (\text{II. 13})$$

$$[V_{rabc}] = [R_r] \cdot [i_{rabc}] + \frac{d[\Phi_{rabc}]}{dt} \quad (\text{II. 14})$$

Avec respectivement:

$[V_s]$  et  $[V_r]$  les tensions statoriques et rotoriques de la machine.

$[I_s]$  et  $[I_r]$  les courants statoriques et rotoriques de la machine.

$[\Phi_s]$  et  $[\Phi_r]$  les flux statoriques et rotoriques de la machine.

$[R_s]$  et  $[R_r]$  les résistances des enroulements statoriques et rotoriques de la machine.

Avec :

Respectivement les vecteurs des tensions statorique et rotorique.

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad [V_{rabc}] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}$$

Respectivement les vecteurs des courants statorique et rotorique.

$$[i_{sabc}] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad [i_{rabc}] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}$$

Respectivement les vecteurs des flux statorique et rotorique.

$$[\Phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad [\Phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix}$$

Respectivement les vecteurs des résistances statorique et rotorique.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

A ces équations électriques, il faut rajouter celle de couple électromagnétique qui s'écrit :

$$C_{em} = \frac{1}{2} [i_{sabc}, i_{rabc}]^t \cdot \left( \frac{d}{d\theta} [\Phi_{sabc}, \Phi_{rabc}] \right) \quad (II. 15)$$

Sachant que les différents flux de la machine s'expriment en fonction des inductances de la manière suivante :

$$[\Phi_{sabc}] = [L_s] \cdot [i_{sabc}] + [M_{sr}(\theta)] \cdot [i_{rabc}] \quad (II. 16)$$

$$[\Phi_{rabc}] = [L_r] \cdot [i_{rabc}] + [M_{sr}(\theta)] \cdot [i_{sabc}] \quad (II. 17)$$

Où seules les inductances mutuelles entre stator et rotor sont fonction de la position rotorique  $\theta$ , l'expression du couple se réécrit sous la forme suivante :

$$C_{em} = [i_{sabc}]^t \cdot \left( \frac{d}{d\theta} [M_{sr}] \right) \cdot [i_{rabc}] \quad (II. 18)$$

Pour des raisons de simplicité, il est classique d'exprimer les différentes équations triphasées de la machine asynchrone à double alimentation dans un repère diphasé tournant «dqo». Dans ce cas on utilise la transformation de Park. Cette dernière, normée, assure l'invariance de la puissance instantanée entre les repères triphasés et « dqo ».

En choisissant un repère dqo diphasé, l'axe d peut être repéré par :

$\theta_s$  : L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase « a » du stator;

$\theta_r$  : L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase « a » du rotor.

A chaque instant, ces deux angles sont liés par la relation suivante :

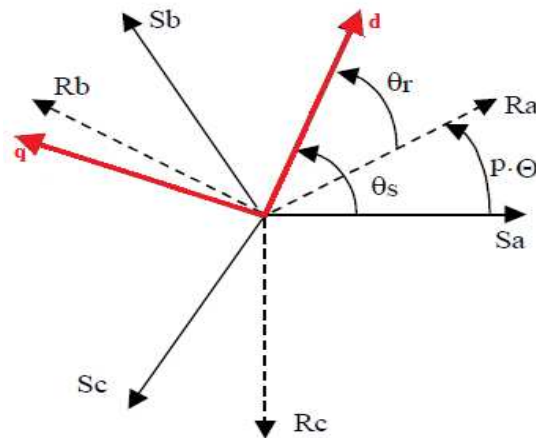
$$\theta = p \cdot \Theta = \theta_s - \theta_r \quad (II. 19)$$

Où  $\Theta$  est la position mécanique de l'axe rotorique par rapport à l'axe statorique,

$p$  : nombre de paires de pôles ;

$\theta$ : étant l'angle électrique entre l'axe rotorique et l'axe statorique.

Les différents axes sont illustrés sur la figure II.3.



**Figure II.3** – Les différents systèmes d’axes utilisés.

En appliquant alors la transformation de Park aux équations statoriques avec un angle de rotation  $\theta_s$ , on aboutit aux expressions suivantes dans le repère dq:

$$V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} - \frac{d\theta_s}{dt} \cdot \Phi_{sq} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} \quad (\text{II. 20})$$

$$V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\theta_s}{dt} \cdot \Phi_{sd} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} \quad (\text{II. 21})$$

$$V_{so} = R_s \cdot i_{so} + \frac{d\Phi_{so}}{dt} \quad (\text{II. 22})$$

De même, en l’appliquant aux équations rotoriques avec un angle de  $\theta_r$ , on obtient les équations rotoriques dans le repère dq:

$$V_{rd} = R_r \cdot i_{rd} - \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \Phi_{rq} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} \quad (\text{II. 23})$$

$$V_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \Phi_{rd} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} \quad (\text{II. 24})$$

$$V_{ro} = R_r \cdot i_{ro} + \frac{d\Phi_{ro}}{dt} \quad (\text{II. 25})$$

En supposant le système parfaitement équilibré, les équations (II.22) et (II.25) qui correspondent aux composantes homopolaires, sont identiquement nulles.

Suite à l’hypothèse de linéarité des matériaux, les flux statoriques et rotoriques s’expriment dans le repère de PARK, en fonction des courants, par la relation matricielle suivante [Les 81] :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

Avec :

$L_s = l_s + M$  : Inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r + M$  : Inductance cyclique rotorique.

$l_s$  : Inductance de fuite statorique.

$l_r$  : Inductance de fuite rotorique.

$M$  : Mutuelle inductance.

Plusieurs solutions sont possibles pour orienter le repère «dq» par rapport au repère triphasé.

Lors d'une alimentation sinusoïdale, il est possible d'écrire, en régime permanent :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s : \text{Pulsation des grandeurs statoriques}$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r : \text{Pulsation des grandeurs rotoriques}$$

Par la suite, l'expression (II.19) peut se transformer, en régime permanent, sous la forme suivante:

$$\omega_s - \omega_r = p \cdot \Omega = \omega \quad (\text{II.27})$$

Avec :

$\Omega$  : est la vitesse mécanique.

$\omega$  : La pulsation mécanique.

Ainsi, en partant des équations (II.20), (II.21), (II.23), (II.24), et en utilisant la relation (II.26) qui lie les flux aux courants, on obtient l'équation matricielle suivante qui englobe les différentes équations électriques de la machine exprimées dans le repère dq:



$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s \cdot L_s & 0 & -\omega_s \cdot M \\ \omega_s \cdot L_s & R_s & \omega_s \cdot M & 0 \\ 0 & -\omega_r \cdot M & R_r & -\omega_r \cdot L_r \\ \omega_r & 0 & \omega_r \cdot L_r & R - r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{rd}}{dt} \\ \frac{di_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 28})$$

$$R_s i_{sd} + L_s \frac{di_{sd}}{dt} = V_{sd} + \omega_s L_s i_{sq} + \omega_s M i_{rq} - M \frac{di_{rd}}{dt} \quad (\text{II. 29})$$

$$R_s i_{sq} + L_s \frac{di_{sq}}{dt} = V_{sq} - \omega_s L_s i_{sd} - \omega_s M i_{rd} - M \frac{di_{rq}}{dt} \quad (\text{II. 30})$$

$$R_r i_{rd} + L_r \frac{di_{rd}}{dt} = V_{rd} + \omega_r L_r i_{rq} + \omega_r M i_{sq} - M \frac{di_{sd}}{dt} \quad (\text{II. 31})$$

$$R_r i_{rq} + L_r \frac{di_{rq}}{dt} = V_{rq} - \omega_r L_r i_{rd} - \omega_r M i_{sd} - M \frac{di_{sq}}{dt} \quad (\text{II. 32})$$

Il nous reste maintenant à décrire l'équation mécanique de la machine sous la forme:

$$C_{em} = C_r + f \Omega + J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II. 33})$$

- $C_{em}$  le couple électromagnétique ;
- $C_r$  le couple résistant ;
- $f$  le coefficient de frottement visqueux de la MADA ;
- $\Omega$  la vitesse de rotation de l'axe de la MADA ;
- $J$  l'inertie des parties tournantes.

La transformation de Park, appliquée à l'expression du couple électromagnétique, permet alors de réécrire ce dernier sous la forme suivante:

$$C_{em} = p \cdot M (i_{rd} \cdot i_{sq} - i_{rq} \cdot i_{sd}) \quad (\text{II. 34})$$

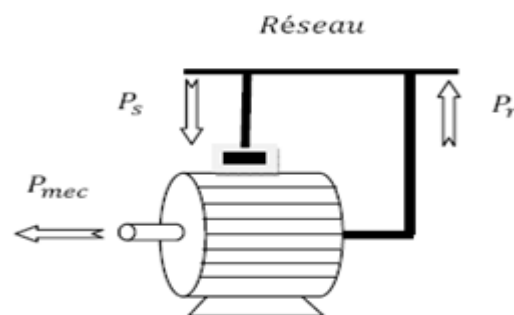
A partir des équations développées, Il est donc possible décrire le schéma bloc de la machine asynchrone à double alimentation qui sera le bloc à réguler par la suite.

#### II.4.2. 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. Effectivement,

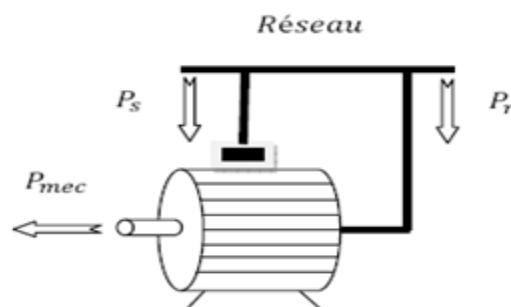
une machine à cage doit tourner au dessous de sa vitesse de synchronisme pour être moteur et au dessus pour être générateur. Pour la MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de générer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper-synchronisme ou en hypo-synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement:

**a- Cas du fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone :** La figure (II.4) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement en mode moteur en dessous de la vitesse de synchronisme.



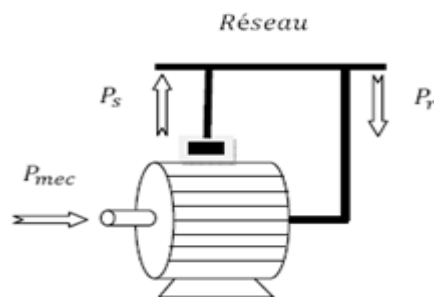
**Figure II.4** - Fonctionnement de la MADA en mode moteur (hypo-synchronisme).

**b- Cas du fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone :** La figure (II.5) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a alors un fonctionnement en mode moteur en dessus de la vitesse de synchronisme.



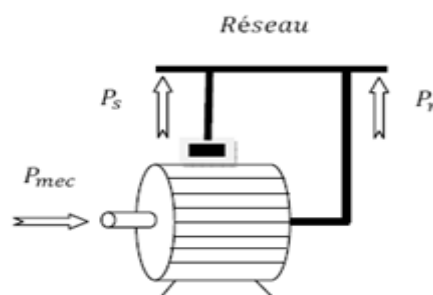
**Figure II.5** - Fonctionnement de la MADA en mode moteur (hyper-synchronisme).

**c- Cas du fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone :** La figure (II.6) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est réabsorbée par le rotor. Nous avons dans ce cas un fonctionnement en mode générateur en dessous de la vitesse de synchronisme.



**Figure II.6** - Fonctionnement de la MADA en mode générateur (hypo-synchronisme).

**d- Cas du fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone :** La figure (II.7) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a ainsi un fonctionnement générateur au dessus de la vitesse de synchronisme [Boy 06].



**Figure II.7** - Fonctionnement de la MADA en mode générateur (hyper-synchronisme).

- Dans notre cas la machine fonctionne en mode génératrice, la puissance mécanique disponible sur l'arbre de la génératrice est fournie par une turbine éolienne. Les puissances active et réactive statoriques et rotoriques sont données par :

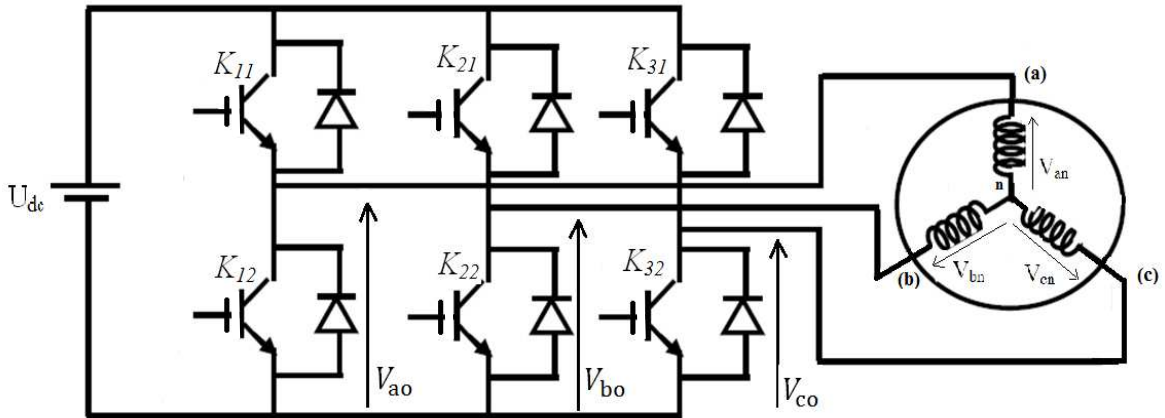
$$\begin{cases} P_s = V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq} \\ Q_s = V_{sq} i_{sd} - V_{sd} i_{sq} \\ P_r = V_{rd} i_{rd} + V_{rq} i_{rq} \\ Q_r = V_{rq} i_{rd} - V_{rd} i_{rq} \end{cases} \quad (\text{II. 35})$$

Et les puissances échangées entre la machine et le réseau sont exprimées par :

$$\begin{cases} P_g = P_s + P_r \\ Q_g = Q_s + Q_r \end{cases} \quad (II.36)$$

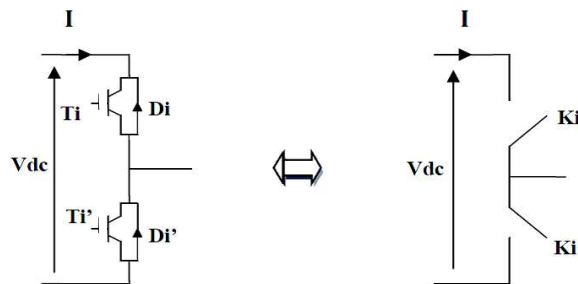
**II.5. Modélisation de l'onduleur [Tak 87], [Hab 91]**

Les onduleurs de tension sont des convertisseurs statiques permettent de générer une source de tension alternative à partir d'une source de tension continue, dont nous pouvons contrôler l'amplitude et la fréquence. Le réglage de la vitesse (ou de la position) du rotor d'une machine se réalise logiquement par action simultanée sur la fréquence et l'amplitude de tension. Le schéma de l'onduleur est représenté par la figure (II.8) :



**Figure II.8** Schéma de l'onduleur de tension

L'onduleur de tension est constitué de trois bras de commutation à transistors ou à thyristors. Chaque bras est composé de deux cellules comportant chacune une diode et un transistor ou un thyristor. Tous ces éléments sont considérés comme des interrupteurs idéaux. En mode commandable, le bras est un commutateur à deux positions qui permet d'obtenir à la sortie deux niveaux de tension, un bras de l'onduleur est représenté par la figure (II.9).



**Figure II.9** : Schéma d'un bras de l'onduleur

Pour simplifier l'étude de l'onduleur, on supposera que [TAM 06] :

- La commutation des interrupteur est instantanée ;
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable, c'est-à-dire :

$$K_{ci} (c \in [1,2,3], i \in [1,2]) \text{ supposés idéales ;}$$

- La charge est équilibrée couplée en étoile ;
- La commande des interrupteur d'une cellule est complémentaire, donc on peut attribuer à chaque bras de l'onduleur une variable logique ( $S_i = a, b, c$ ) définit par :

$$S_i = 1 \Rightarrow \text{L'interrupteur supérieur de bras } i \text{ est amorcé (fermé).}$$

$$S_i = 0 \Rightarrow \text{L'interrupteur supérieur de bras } i \text{ est bloqué (ouvert).}$$

On définit alors les tensions imposée à chaque bras de l'onduleur par :

$$V_{io} = S_i \cdot U_{dc} \quad \text{avec } i = a, b, c$$

Le calcul des tensions composées nous donne :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an} - V_{bn} = (S_a - S_b)U_{dc} & \text{(II. 37)} \\ U_{bc} = V_{bn} - V_{cn} = (S_b - S_c)U_{dc} & \text{(II. 38)} \\ U_{ca} = V_{cn} - V_{an} = (S_c - S_a)U_{dc} & \text{(II. 39)} \end{cases}$$

$$(II. 37) - (II. 39) \Rightarrow 2V_{an} - (V_{bn} + V_{cn}) = (2S_a - S_b - S_c)U_{dc} \quad \text{(II. 40)}$$

Etant donné que les tensions simples des phases de la charge ont une somme nulle, alors

$$V_{an} = -(V_{bn} + V_{cn}) \quad \text{(II. 41)}$$

On remplace (II.41) dans (II.40), on obtient :

$$V_{an} = \frac{U_{dc}}{3} (2S_a - S_b - S_c) \quad \text{(II. 42)}$$

En faisant les mêmes démarches que celles faites pour la première phase, la matrice de conversion de l'onduleur s'écrit sous la forme suivante :

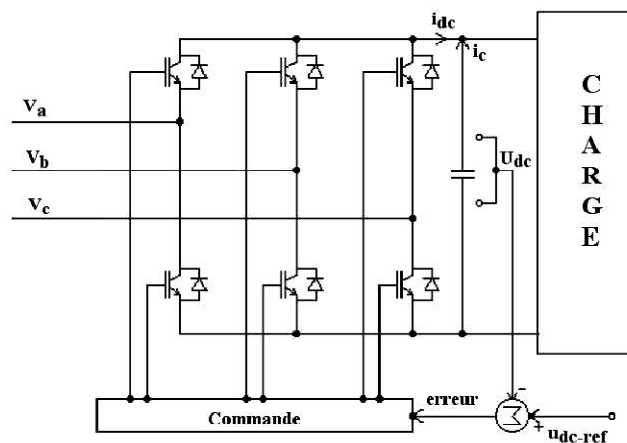
$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad \text{(II. 43)}$$

En s'appuyant sur la notion de vecteur tournant, on peut considérer que l'onduleur délivre un vecteur tension  $V_r$  avec :

$$V_r = \sqrt{\frac{2}{3}} U_{dc} [S_a + S_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + S_c e^{-j\frac{2\pi}{3}}] \quad (\text{II. 44})$$

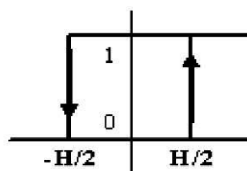
## II.6. Modèle du redresseur MLI

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture [Cam 03].



**Figure II.10** - Topologies de base d'un redresseur de tension

Le redresseur de tension fonctionne en gardant la tension du bus continu à une valeur de référence désirée, en utilisant une commande en boucle fermée. La méthode de la bande d'hystérésis permet la commutation des interrupteurs du redresseur, lorsque l'erreur entre le signal et sa consigne excède une amplitude fixée. Cette amplitude est communément appelée fourchette ou bande d'hystérésis. Cette technique ne demande qu'un comparateur à hystérésis par phase [Mal 01], [Mal 00]. Le comparateur à hystérésis fonctionne selon le principe expliqué en figure (II.11), l'interrupteur s'ouvre si l'erreur devient inférieure à  $-H/2$ , et il se ferme si cette dernière est supérieure à  $+H/2$ , où  $H$  représente la fourchette (ou largeur) d'hystérésis. Si l'erreur est maintenant comprise entre  $-H/2$  et  $+H/2$  (c'est-à-dire, qu'elle varie à l'intérieur de la fourchette d'hystérésis) [Dje 07].



**Figure II.11** - Principes de fonctionnement de Modulateur MLI à bande d'hystérésis

On peut faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation en modélisant le redresseur par un ensemble d'interrupteurs idéaux, ces interrupteurs étant complémentaires [Bel 10]. Puis les tensions de phase d'entrée et le courant de sortie peuvent être écrits en fonction de  $S_j$ ,  $V_{dc}$  et les courants d'entrée  $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ ,  $i_{sc}$ .

$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0 \quad (\text{II. 45})$$

Les tensions d'entrée entre phases du redresseur peuvent être décrites par:

$$U_{sab} = (S_a - S_b) \times V_{dc} \quad (\text{II. 46})$$

$$U_{sbc} = (S_b - S_c) \times V_{dc} \quad (\text{II. 47})$$

$$U_{sca} = (S_c - S_a) \times V_{dc} \quad (\text{II. 48})$$

Les équations de tension pour le système triphasé équilibré sans raccordement du neutre peuvent être écrites ainsi:

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{sa} \\ U_{sb} \\ U_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 49})$$

Avec :

$$\begin{cases} U_{sa} = \frac{2S_a - S_b - S_c}{3} V_{dc} \\ U_{sb} = \frac{2S_b - S_a - S_c}{3} V_{dc} \\ U_{sc} = \frac{2S_c - S_a - S_b}{3} V_{dc} \end{cases} \quad (\text{II. 50})$$

Finalement, on déduit l'équation de couplage des côtés alternatif et continu:

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = (S_a i_{sa} + S_b i_{sb} + S_c i_{sc}) I_{ch} \quad (\text{II. 51})$$

## II. 7. Conclusion

Ce chapitre est consacré à la modélisation de la chaîne de conversion électrique qui est basée sur une machine asynchrone à double alimentation.


En premier lieu, on a présenté le modèle de la partie mécanique (turbine, multiplicateur), puis la modélisation de la machine (MADA), et enfin les convertisseurs statique (onduleur, redresseur).

Le chapitre suivant sera consacré à la commande de la chaîne de conversion éolienne par la technique du contrôle direct du couple (DTC).





## **Chapitre III**



# **Commande de la Chaine éolienne**

### III.1. Introduction

La technique de commande directe du couple (Direct Torque Control ou DTC) introduite en 1985 par TAKAHASHI, utilise une approche séduisante de part son efficacité et sa simplicité de mise en œuvre. Plusieurs travaux ont permis une modélisation rigoureuse de cette approche. En effet, la commande DTC à partir de références externes, tels le couple et le flux, ne recherche pas, comme dans les commandes classiques (vectorielles ou scalaires) les tensions à appliquer à la machine, mais recherche ‘le meilleur’ état de commutation de l’onduleur pour satisfaire les exigences de l’utilisateur. Cette technique permet de calculer les grandeurs de contrôle que sont le flux et le couple électromagnétique. Dans la structure DTC, la machine asynchrone à double alimentation commandée par l’onduleur de tension est un système dynamique hybride, dont la partie continue est la machine et la partie discrète, l’onduleur de tension [Hab 91], [Tak 86], [Tak 87].

Dans ce chapitre, nous proposons une commande par DTC de la MADA, on développera le principe générale du contrôle directe de couple ainsi que les caractéristiques principales de cette commande, dans l’objectif de déterminer les règles de comportement des grandeurs à contrôler et la structure de contrôle, pour passer à l’élaboration de la table et l’algorithme de commande ainsi que la présentation des résultats de simulation du système sur Matlab/Simulink.

### III.2. Principe générale sur la DTC

Les méthodes de commande directe du couple DTC consistent à commander directement la fermeture ou l’ouverture des interrupteurs de l’onduleur à partir des valeurs calculées du flux rotorique et du couple électromagnétique. La commande des interrupteurs a pour but de donner au vecteur représentant le flux rotorique la direction déterminée par les valeurs de consigne.

Pour connaître l’état électromagnétique de la machine et afin de déterminer la commande des interrupteurs de l’onduleur, il faut disposer d’un modèle approprié de la machine.

A partir des mesures de la tension continue à l’entrée de l’onduleur et des courants rotoriques, le modèle donne à chaque instant [Bon 98]:

- Le flux rotorique réel de la machine ;
- Le couple réel qu’elle développe ;
- Sa vitesse de rotation.

La mesure de la vitesse de l’arbre n’est pas nécessaire, ce qui est un grand avantage de cette méthode.

Le flux et le couple ainsi calculés sont comparés à leurs valeurs de référence pour déterminer les instants de commande des interrupteurs. D'ordinaire on cherche à maintenir le flux constant.

### III.3. Partitionnement algorithmique de la commande

En vue de cette première description de la commande, un partitionnement algorithmique a pu s'opérer naturellement. En effet, on retrouve bien le groupement par blocs et sous blocs algorithmiques, soit [KEB 02].

- ❖ Bloc de Traitement : composé des sous –blocs algorithmique de la transformée de Park (conversion de modèle triphasés en modèles biphasés).
- ❖ Bloc d'Estimations : composée des sous –blocs algorithmiques de calcul de flux et de couple ainsi que l'estimation de position sectorielle du flux.
- ❖ Bloc de Régulation : composé des sous-blocs algorithmiques des deux comparateurs à hystérisais.
- ❖ Bloc de Modulation : composé d'un seul sous –bloc algorithmique de table logique de commutation.

En contre partie, la fréquence de commutation est variable et difficile à maîtriser du fait de l'utilisation des contrôleurs à hystérisais, ce point constitue l'un des inconvénients majeurs de la DTC, du fait de :

- ❖ L'absence de maîtrise totale de contenu harmonique réinjecté coté réseau.
- ❖ La difficulté à maîtrisé les pertes (pertes par commutation dans l'onduleur, pertes fer dans la machine), entraîne une évolution excessive du niveau thermique.
- ❖ La possibilité de provoquer des résonances mécanique indésirable.

### III.4. Fonctionnement et séquences d'un onduleur de tension

Un onduleur de tension triphasé permet d'attendre sept positions distinctes dans le plan de phase correspondant aux huit séquences de la tension de sortie, on cherche donc à contrôler le flux et le couple via le choix de vecteur de tension qui se fera par une possibilité pour le vecteur  $V_r$ . Deux vecteurs ( $V_0$  et  $V_7$ ) correspondent au vecteur nul.

En utilisant les variables booléennes de l'état des interrupteurs, le vecteur tension peut s'écrire :

$$V_r = \sqrt{\frac{2}{3}} U_{dc} \left[ S_a + S_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + S_c e^{j\frac{4\pi}{3}} \right] \quad (\text{III. 1})$$

Etant donné difficile de mesurer les tensions aux bornes triphasés d'un onduleur de tension, les tensions d'alimentation sont estimés en fonction de la tension du bus continu et des

états de commutation des interrupteurs. Donc, les tensions de phase de la machine sont déterminés par l'équation (II.21) [Car 00].

Exprimons maintenant les tensions dans le système (d,q) en fonction des tensions réelles :

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (III. 2)$$

Le tableau ci-dessous, **Tableau III.1**, rassemble les vecteurs tensions atteignables en fonction de l'état des interrupteurs.

N	S <sub>a</sub>	S <sub>b</sub>	S <sub>c</sub>	V <sub>a</sub>	V <sub>b</sub>	V <sub>c</sub>	V <sub>r</sub>	V <sub>d</sub>	V <sub>q</sub>
0	0	0	0	0	0	0	V <sub>0</sub>	0	0
1	1	0	0	$\frac{2U_{dc}}{3}$	$-\frac{U_{dc}}{3}$	$-\frac{U_{dc}}{3}$	V <sub>1</sub>	$\sqrt{\frac{2}{3}} U_{dc}$	0
2	1	1	0	$\frac{2U_{dc}}{3}$	$\frac{U_{dc}}{3}$	$-\frac{2U_{dc}}{3}$	V <sub>2</sub>	$\frac{U_{dc}}{\sqrt{6}}$	$\frac{U_{dc}}{\sqrt{2}}$
3	0	1	0	$-\frac{U_{dc}}{3}$	$\frac{2U_{dc}}{3}$	$-\frac{U_{dc}}{3}$	V <sub>3</sub>	$-\frac{U_{dc}}{\sqrt{6}}$	$\frac{U_{dc}}{\sqrt{2}}$
5	0	0	1	$-\frac{U_{dc}}{3}$	$-\frac{U_{dc}}{3}$	$\frac{2U_{dc}}{3}$	V <sub>5</sub>	$-\frac{U_{dc}}{\sqrt{6}}$	$-\frac{U_{dc}}{\sqrt{2}}$
6	1	0	1	$\frac{U_{dc}}{3}$	$-\frac{2U_{dc}}{3}$	$\frac{U_{dc}}{3}$	V <sub>6</sub>	$\frac{U_{dc}}{\sqrt{6}}$	$-\frac{U_{dc}}{\sqrt{2}}$
7	1	1	1	0	0	0	V <sub>7</sub>	0	0

**Tableau III.1** – Calcul des vecteurs de tension

Nous pouvons maintenant définir le vecteur de tension équivalent dont le module et l'argument sont données par les formules suivantes :

$$V_n = \sqrt{V_{rd}^2(n) + V_{rq}^2(n)} \quad (III. 3)$$

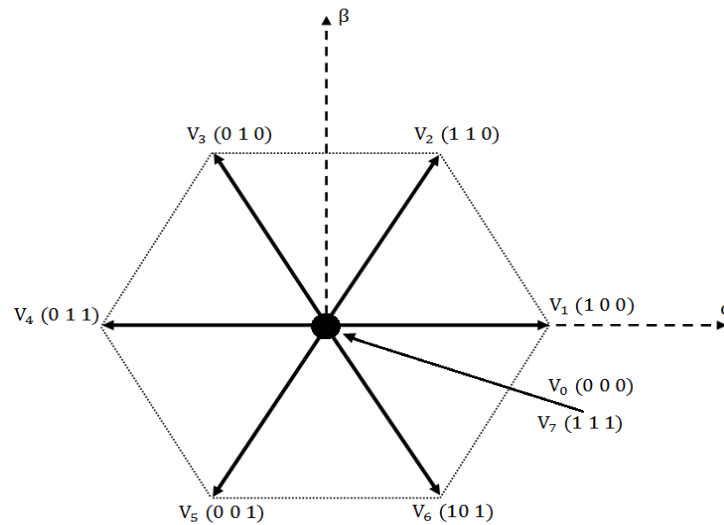
$$\arg(V_n) = \tan^{-1} \frac{V_{rq}(n)}{V_{rd}(n)} \quad (III. 4)$$

A partir de ces deux équations, on détermine la position et le module de chaque vecteur, les calculs du module et de l'argument sont donnés dans le tableau ci-dessous, **Tableau III.2** :

V <sub>n</sub>	V <sub>0</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>7</sub>
Module	0	$dc\sqrt{2/3}$	$dc\sqrt{2/3}$	$dc\sqrt{2/3}$	$dc\sqrt{2/3}$	$dc\sqrt{2/3}$	$dc\sqrt{2/3}$	0
Argument	0	0	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{2\pi}{3}$	$\pi$	$\frac{4\pi}{3}$	$\frac{5\pi}{3}$	0

**Tableau III.2** – Module et argument de chaque vecteur tension

La représentation vectorielle de chaque vecteur est donnée par la figure ci-dessous, Figure III.1.



**Figure III.1** – Représentation vectorielle des tensions de l'onduleur

### III.5. Règle du comportement des grandeurs à contrôler (flux, couple)

#### III.5.1 Principe de contrôle du flux rotorique

A partir du modèle de la machine asynchrone dans un repère lié au rotor et de l'expression de la tension rotorique déduite de la loi de Faraday est donnée par la relation suivante :

$$V_r = R_r i_r + \frac{d\Phi_r}{dt} \Rightarrow \Phi_r(t) = \int_0^t (V_r - R_r i_r) dt + \Phi_r(0) \quad (\text{III. 5})$$

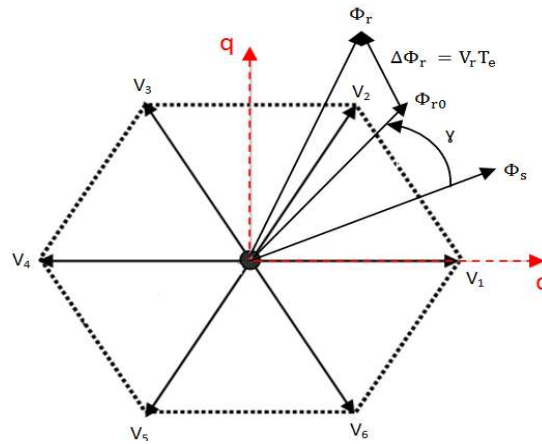
Entre deux commutations de l'onduleur, le vecteur tension sélectionné est toujours le même, d'où :

$$\Phi_r(t) = \Phi_r(0) + V_r T_e - \int_0^t (R_r i_r) dt \quad (\text{III. 6})$$

Pour simplifier notre étude, on considère que la chute de tension  $R_r i_r$  comme négligeable devant la tension  $v_r$  appliquée, soit :

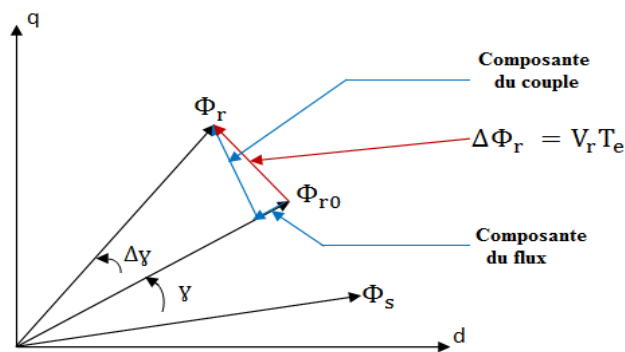
$$\Phi_r(t) = \Phi_r(0) + V_r T_e \Rightarrow \Delta\Phi_r = V_r T_e \quad (\text{III. 7})$$

On constate alors sur un intervalle  $[0, T_e]$ , l'évolution du vecteur  $\Phi_r$  en direction et en amplitude dépend directement du vecteur  $V_r$  sélectionné pendant  $T_e$ .



**Figure III.3** – Principe du contrôle du flux rotorique

Du point de vue réglage du flux, la manière la plus efficace de l'augmenter (respectivement, diminuer) est celle d'appliquer un vecteur tension parallèle à  $\Phi_r$  et de même sens (respectivement de sens opposé). Par contre l'application d'un vecteur tension en quadrature par rapport au vecteur flux conserve son amplitude constant, mais fait brutalement évoluer sa phase [CAR 00]. Donc, la variation du flux donne deux composantes, l'un change l'amplitude de vecteur noté « composante du flux » et l'autre change sa position notée « composante du couple » comme l'illustre la figure suivante :



**Figure III.4** Illustration de la composante de couple et du flux lors de la variation du vecteur flux

Ainsi, pour fonctionner avec un module de flux pratiquement constant, il suffit de choisir une trajectoire presque circulaire pour l'extrémité du vecteur flux. Pour cela, le vecteur tension appliqué doit être toujours perpendiculaire au vecteur flux. Cela est possible avec une période de contrôle très faible devant la période de rotation de flux. Comme on n'a que huit vecteurs tension possible, l'amplitude du vecteur flux est variable autour de la valeur fixe souhaitée, ce qui ramène l'extrémité du vecteur flux à balancer entre deux valeurs proches déterminées par la

bande du comparateur à hystérésis utilisé. En plus, la composante du flux des vecteurs tensions appliquées doit être minimale contrairement à la composante du couple qui doit être maximale [Zol 97].

### III.5.2 Principe de contrôle du couple de la machine

Commander les interrupteurs de l'onduleur en très bref temps pour un vecteur tension désiré permet d'obtenir une variation du couple rapide en changeant le vecteur flux rotorique selon l'équation (III.7). Alors, la production du couple, en utilisant le vecteur flux, devient plus évidente ainsi que son contrôle. Le couple électromagnétique est proportionnel au produit vectoriel entre les vecteurs des deux flux statorique et rotorique selon l'expression suivante [Rah 00], [Mok 02] :

$$C_{em} = k(\overrightarrow{\Phi_s} \cdot \overrightarrow{\Phi_r}) = k |\overrightarrow{\Phi_s}| |\overrightarrow{\Phi_r}| \sin(\gamma) \quad (\text{III. 8})$$

Avec  $\gamma$  l'angle entre les vecteur flux statorique et rotorique.

Le couple dépend de l'amplitude des deux vecteurs  $\Phi_s$  et  $\Phi_r$  ainsi que leur position relative.

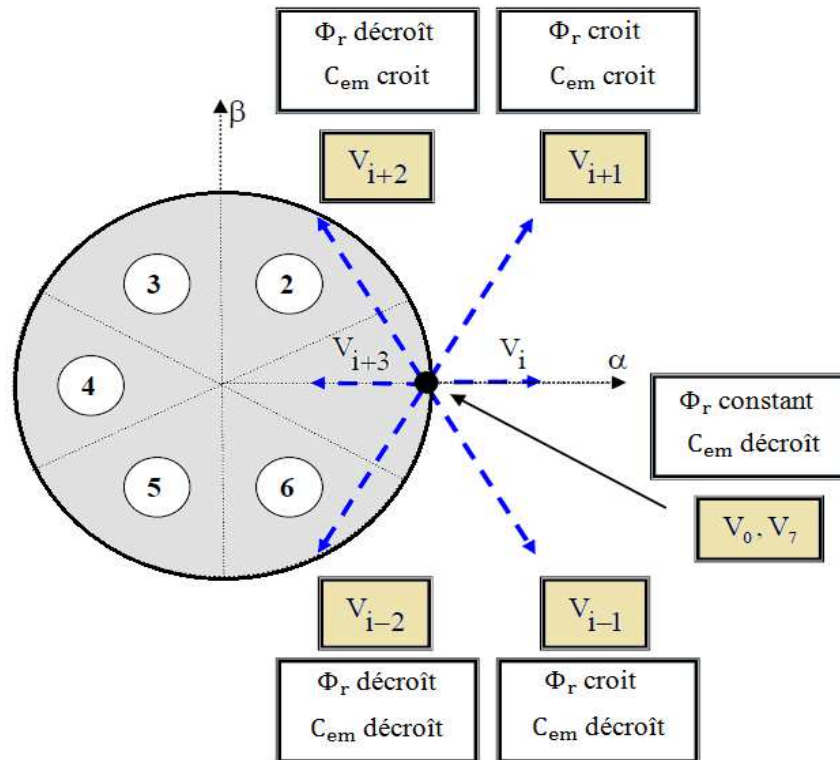
### III.5.3 Choix du vecteur de tension

Les variations du couple électromagnétique peuvent être contrôlées uniquement à partir de la vitesse de rotation du vecteur  $\overrightarrow{\Phi_r}$ , dont le choix du vecteur tension rotorique dépend de la variation souhaitée pour le module de  $\Phi_r$ , de sens de rotation de  $\Phi_r$  et également de l'évolution souhaitée pour le couple [Arn 02], [Sar 00].

Ainsi, nous pouvons délimiter l'espace d'évolution  $\Phi_r$ , en le décomposant en six zones  $i$ , avec  $i \in [1,6]$ , telle que représenté dans la **figure III.5**. Lorsque le vecteur flux  $\Phi_r$  se trouve dans une zone  $i$ , le contrôle du flux et du couple peut être assuré en sélectionnant l'un des vecteurs tensions suivant :

- Si  $V_{i+1}$  est sélectionné alors  $\Phi_r$  croît et  $C_{em}$  croît,
- Si  $V_{i-1}$  est sélectionné alors  $\Phi_r$  décroît et  $C_{em}$  décroît,
- Si  $V_{i+2}$  est sélectionné alors  $\Phi_r$  décroît et  $C_{em}$  croît,
- Si  $V_{i-2}$  est sélectionné alors  $\Phi_r$  croît et  $C_{em}$  décroît,

- Si  $V_0$  ou  $V_7$  sont sélectionnés, alors la rotation du flux  $\Phi_r$  est arrêtée, d'où une décroissance du couple alors que le module du flux  $\Phi_r$  reste inchangée lorsque la vitesse de rotation est supérieure à zéro.



**Figure III.5** - Sélection du vecteur tension

Le niveau d'efficacité des vecteurs tensions appliqués dépend également de la position du vecteur flux dans la zone  $i$ .

En effet, au début de zone, les vecteurs  $V_{i+1}$  et  $V_{i-2}$  sont perpendiculaires au vecteur flux rotorique  $\Phi_r$ , d'où une évolution rapide du couple mais une évolution lente de l'amplitude du flux  $\Phi_r$ , alors qu'en fin de zone l'évolution est inverse. Avec les vecteurs  $V_{i-1}$  et  $V_{i+2}$ , il correspond à des évolutions lente du couple et rapide de l'amplitude du flux  $\Phi_r$  en début de zone, alors qu'en fin de zone c'est le contraire [MAI 04].

Quelque soit le sens d'évolution du couple ou du flux, dans la zone  $i$ , les deux vecteurs  $V_i$  et  $V_{i+3}$  ne sont jamais utilisés. En effet, ceux-ci ont la composante de flux la plus forte (évolution très rapide de  $\Phi_r$ ) mais l'effet sur le couple lui, dépend de la position de  $\Phi_r$  dans la zone, avec un effet nul en milieu de zone. Ce qui signifie que lors du déplacement du flux  $\Phi_{r0}$  sur une zone  $i$ , un bras de l'onduleur ne commute jamais et ainsi de diminuer la fréquence de commutation moyenne des interrupteurs de convertisseur [And 96].



Le vecteur de tension à la sortie de l'onduleur est déduit des écarts de couple et de flux, estimé par rapport à leur référence, ainsi que la position du vecteur  $\Phi_r$ . Un estimateur de  $\Phi_r$ , en module et en position ainsi qu'un estimateur de couple sont donc nécessaires.

### III.6. Estimateurs

#### III.6.1. Estimation du flux rotorique

L'estimation du flux peut être réalisée à partir des mesures des grandeurs rotoriques courant et tension de la machine.

$$\text{A partir de l'équation : } \Phi_r = \int_0^t (V_r - R_r i_r) dt$$

On obtient les composantes d et q du vecteur flux rotorique  $\Phi_r$  :

$$\begin{cases} \Phi_r = \int_0^t (V_{rd} - R_r i_{rd}) dt \\ \Phi_r = \int_0^t (V_{rq} - R_r i_{rq}) dt \end{cases} \quad (\text{III. 9})$$

On obtient les composantes  $V_{rd}$  et  $V_{rq}$ , à partir de la tension d'entrée de l'onduleur  $U_{dc}$ , et des états de commande ( $S_a, S_b, S_c$ ) [Mer 00], et en appliquant la transformation de parc liée au rotor :

$$V_r = V_{rd} + j V_{rq} \quad (\text{III. 10})$$

D'où :

$$\begin{cases} V_{rd} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_{dc} \left( S_a - \frac{1}{2} (S_b + S_c) \right) \\ V_{rq} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{dc} (S_b - S_c) \end{cases} \quad (\text{III. 11})$$

Les courants  $i_{rd}$  et  $i_{rq}$ , sont également obtenus à partir des courants réels  $i_{ra}$ ,  $i_{rb}$  et  $i_{rc}$  :

$$I_r = I_{rd} + j I_{rq} \quad (\text{III. 12})$$

$$\begin{cases} i_{rd} = \sqrt{\frac{3}{2}} i_{ra} \\ i_{rq} = \frac{1}{\sqrt{2}} (i_{rb} - i_{rc}) \end{cases} \quad (\text{III. 13})$$

L'amplitude du flux statorique est estimée à partir de ses composantes  $\Phi_{r\alpha}$  et  $\Phi_{r\beta}$ , par

$$\Phi_r = \sqrt{\Phi_{rd}^2 + \Phi_{rq}^2} \quad (\text{III.14})$$

L'angle  $\alpha_r$  entre le référentielle statorique et le vecteur flux  $\Phi_r$  est égal à :

$$\alpha_r = \arctg\left(\frac{\Phi_{rd}}{\Phi_{rq}}\right) \quad (\text{III. 15})$$

### III.6.2. Estimation du couple électromagnétique

Le couple électromécanique peut être estimé à partir des flux estimés, et des courants rotorique mesurés, et qui peut se mettre sous la forme suivante :

$$C_{em} = p(\Phi_{rd} i_{rd} - \Phi_{r\beta} i_{rq}) \quad (\text{III. 16})$$

On peut remarquer dans cette équation que l'exactitude de cette dernière dépend de la qualité d'estimation du flux et de la précision de la mesure des courants rotorique.

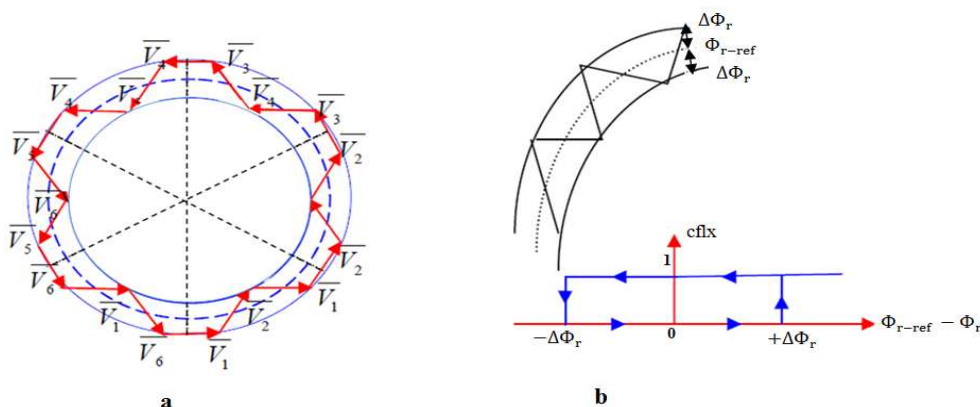
### III.7. Correction de flux rotorique et du couple électromagnétique

#### III.7.1. Correcteur de flux

La sortie du correcteur doit indiquer le sens d'évolution du module de  $\Phi_r$ , afin de sélectionner le vecteur tension correspondant. Pour cela, un simple correcteur à hystérésis à deux niveaux semble être la solution la plus simple et la mieux adapté à la commande étudiée, et qui permet d'obtenir de très bonnes performances dynamiques (Figure (III.6)).

La sortie du correcteur, représentée par une variable booléenne *cflx* indique directement si l'amplitude du flux doit être augmentée (*cflx* = 1) ou diminuée (*cflx* = 0) de façon à maintenir :

$|\Phi_{r-ref} - \Phi_r| < \Delta\Phi_r$ , avec  $\Phi_{r-ref}$  la consigne de flux et  $\Delta\Phi_r$  l'écart d'hystérésis du contrôleur [And 96].



**Figure III.6** –(a) : Sélection des vecteurs tensions correspondantes au contrôle de l'amplitude  $\Phi_r$ .

(b) : Contrôleur à hystérésis à deux niveaux.

### III.7.2 Le correcteur de couple

Le correcteur de couple a pour fonction de maintenir le couple dans les limites  $|C_{em-ref} - C_{em}| < \Delta C$ , avec  $C_{em-ref}$  la référence de couple et  $\Delta C$  la bande d'hystérésis du correcteur. Un correcteur à trois niveaux permet de contrôler la machine dans les deux sens de rotation, soit pour un couple positif ou négatif. La sortie du correcteur, représentée par la variable booléenne indique directement si  $ccpl = 1$ , le couple est inférieur à la limite inférieure de la bande et il faut donc l'augmenter. Si  $ccpl = 0$ , le couple est à l'intérieur de la bande donc il faut le maintenir. Si  $ccpl = -1$ , le couple est supérieur à la limite supérieure de la bande donc il faut le diminuer [BER 06].

Ce choix d'augmenter le nombre de niveaux est proposé afin de minimiser la fréquence de commutation moyenne, car la dynamique de couple est généralement plus rapide que celle du flux [AME 05].

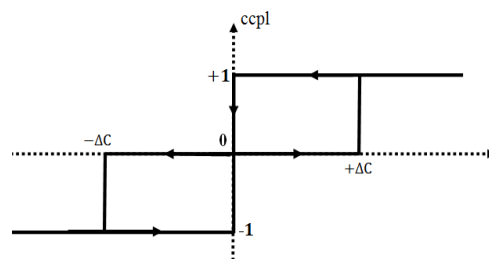


Figure III.7 - Correcteur de couple à trois niveaux

### III.8. Elaboration de la table de commande

La table de commande est construite en fonction de l'état des variables ( $cflx$  et  $ccpl$ ) et des zones  $S$  de position  $\Phi_r$ , comme le montre le tableau III.3. Cette table permet de définir le vecteur qu'il faut appliquer dans chaque secteur à partir des sorties des correcteur et la position du vecteur flux rotorique.

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

**Tableau III.3** – La table de commutation avec un correcteur de couple à trois niveaux

On retrouve bien dans la table de commutation, la formulation de sélection des vecteurs tensions  $V_{i+1}$ ,  $V_{i-1}$ ,  $V_{i+2}$  et  $V_{i-2}$ , correspondant à une zone de fonctionnement  $S_i$ .

En sélectionnant l'un des deux vecteurs nuls  $V_0$  ou  $V_7$ , la rotation du flux  $\Phi_r$  est arrêtée et entraîne une décroissance du couple électromagnétique. On choisit alternativement  $V_0$  ou  $V_7$  de manière à minimiser le nombre de commutation sur l'onduleur [And 96].

### III.9. Simulation de la chaîne éolienne proposée

La structure complète du modèle global de la commande de la chaîne éolienne est représentée par la figure III.8, on utilise dans cette commande la table classique de Takahashi. Le choix du vecteur de tension est effectué à chaque période d'échantillonnage. La structure de commande peut être divisée en quatre blocs comme il a été détaillé dans le paragraphe III.3.

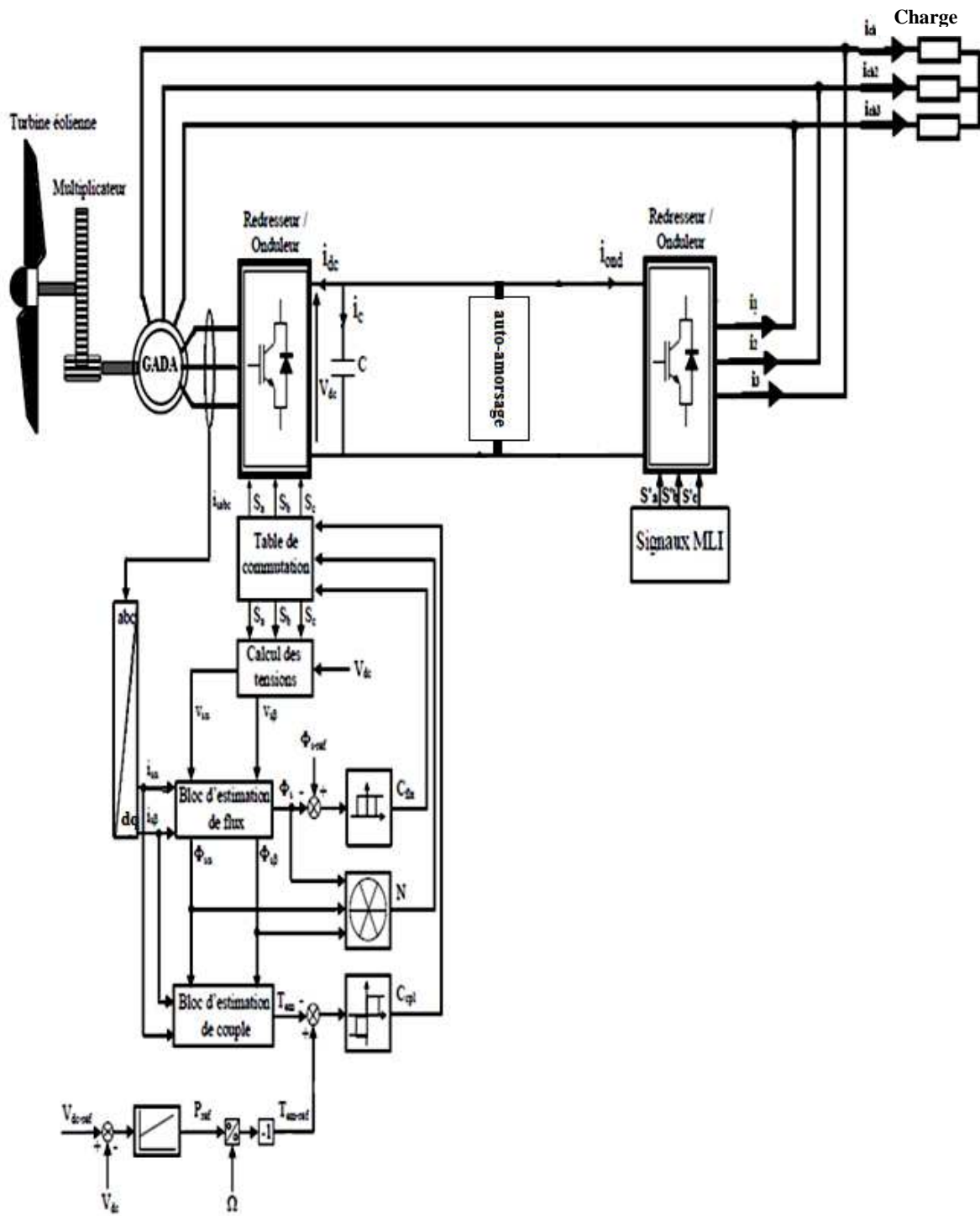


Figure III.8 – Schéma structurel de commande du système éolien global

### III.10. Résultats de simulation

Le système proposé étudié par simulation sur MATLAB, où il est composé d'une génératrice asynchrone à double alimentation, fonctionnant en autonome (le générateur débite sur une charge triphasée équilibrée), dont le rotor est connecté à un redresseur à MLI et un onduleur commandé par la technique du control direct du couple. Le modèle de la machine est celui présenté dans le chapitre II. Dans ce qui suit, deux tests de simulation sont effectués afin de quantifier les performances de la commande. Le premier permettra de tester l'influence de la variation de vitesse, sur une charge RL constante. Le second quantifier l'impact de variations de la charge sur l'évolution de la tension du bus continu.

#### III.10.1. Influence de la variation de la vitesse d'entraînement

Le système global, de la figure (III.8) a été simulé. La tension de bus continu ( $V_{dc}$ ) est régulée par un régulateur PI qui nous délivre à sa sortie un couple de référence qui sera appliqué comme consigne à l'algorithme de commande DTC proposée, servant à contrôler notre générateur.

Dans ce paragraphe, nous allons présenter les résultats de simulation obtenus pour un profil de vitesse d'entraînement variable, illustré sur la figure (III.9). Ce dernier est choisi d'une manière à imposer les trois modes de fonctionnement de la génératrice (GADA), hyposynchrone et hypersynchrone ainsi que le régime synchrone, comme le récapitule les allures de la puissance active rotorique ( $P_r$ ), figure (III.10), ainsi que celle du courant d'une phase rotorique ( $i_r$ ), figure (III.11). La résistance et l'inductance de la charge prennent les valeurs  $10 \Omega$  et  $50 \text{ mH}$  respectivement.

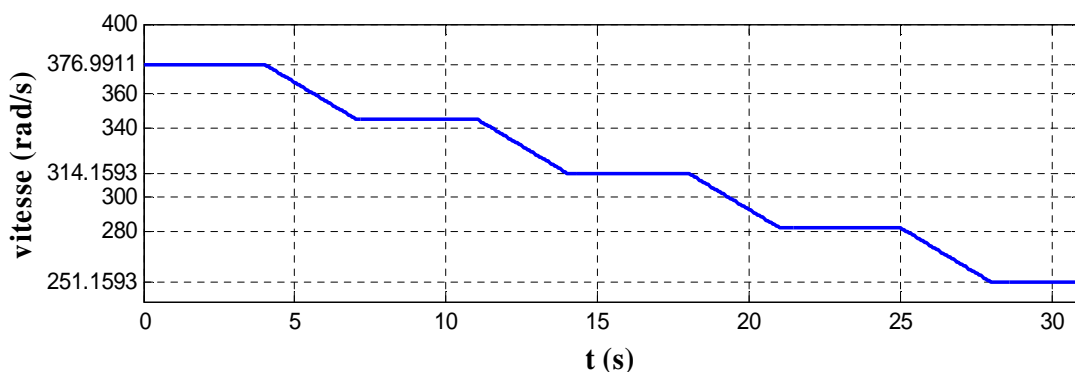


Figure III. 9 – Le profil de vitesse d'entraînement.

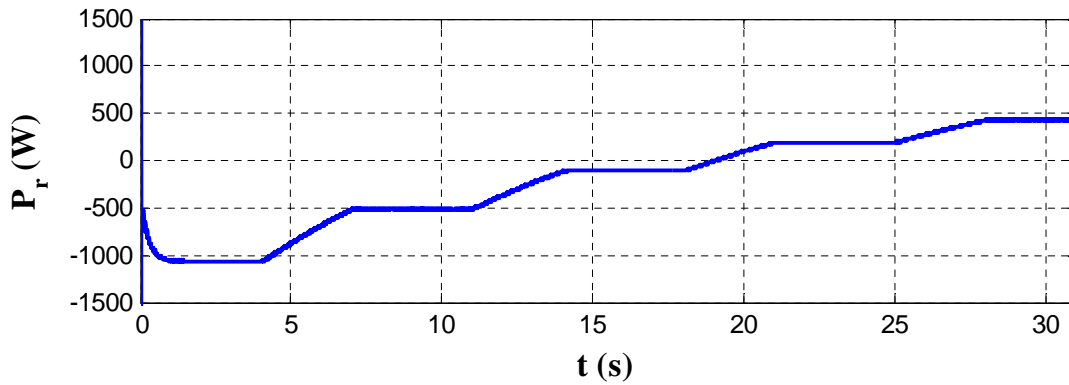


Figure III.10 – Allure de la puissance rotorique.

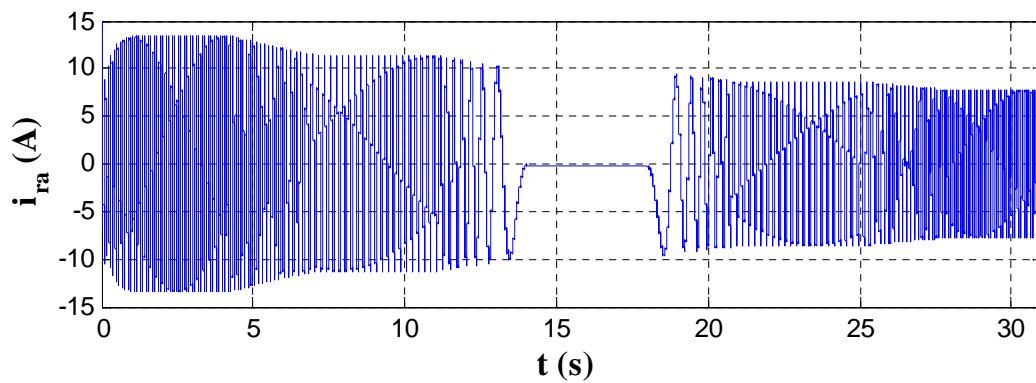


Figure III.11 – Courant d'une phase rotorique.

Les figures (III.12.a) et (III.12.b) montrent que la trajectoire du flux rotorique est parfaitement circulaire ce qui justifie que son module est constant, malgré la variation du couple électromagnétique, cela signifie que le couple et le flux sont découplés. De plus l'évolution temporelle du couple électromagnétique suit sa référence, comme l'indique la figure (III.13).

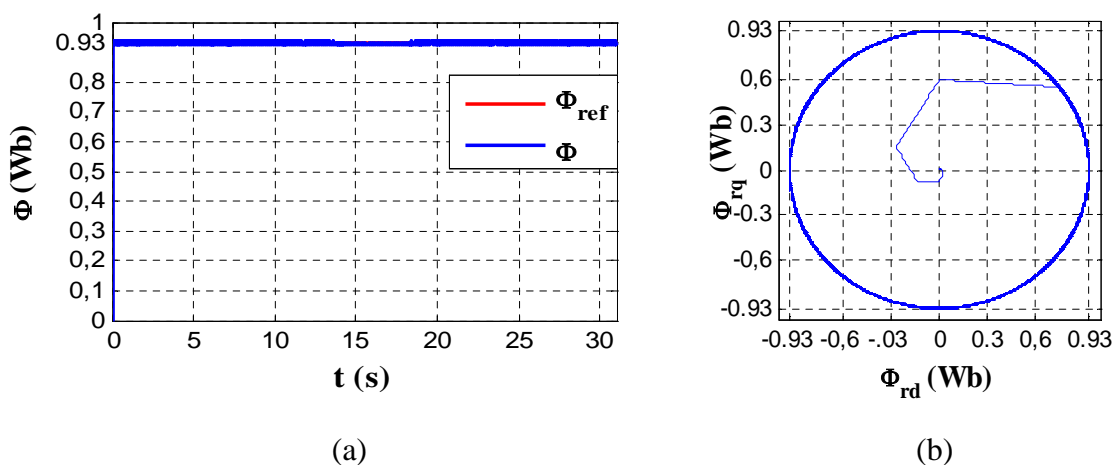


Figure III.12 – (a) : Trajectoire du flux rotorique estimé.

(b) : Evolution du module du flux rotorique estimé par rapport à sa référence.

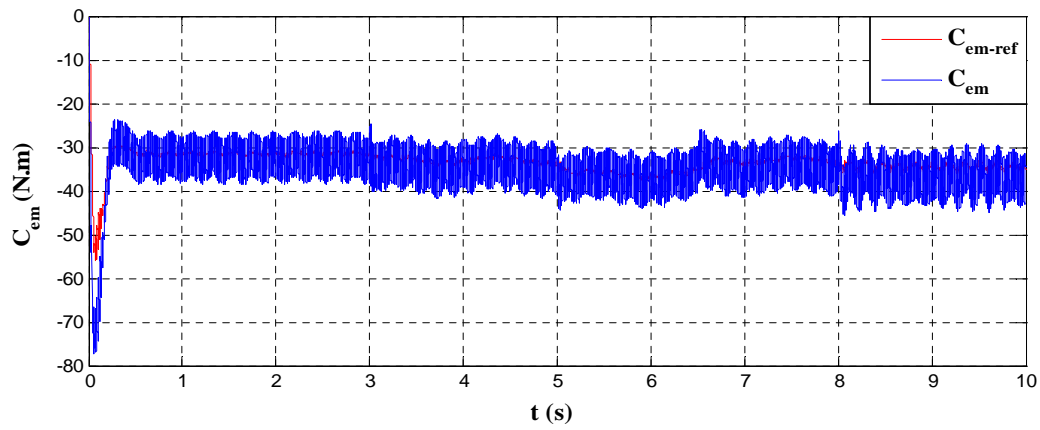


Figure III.13 – Couple électromagnétique.

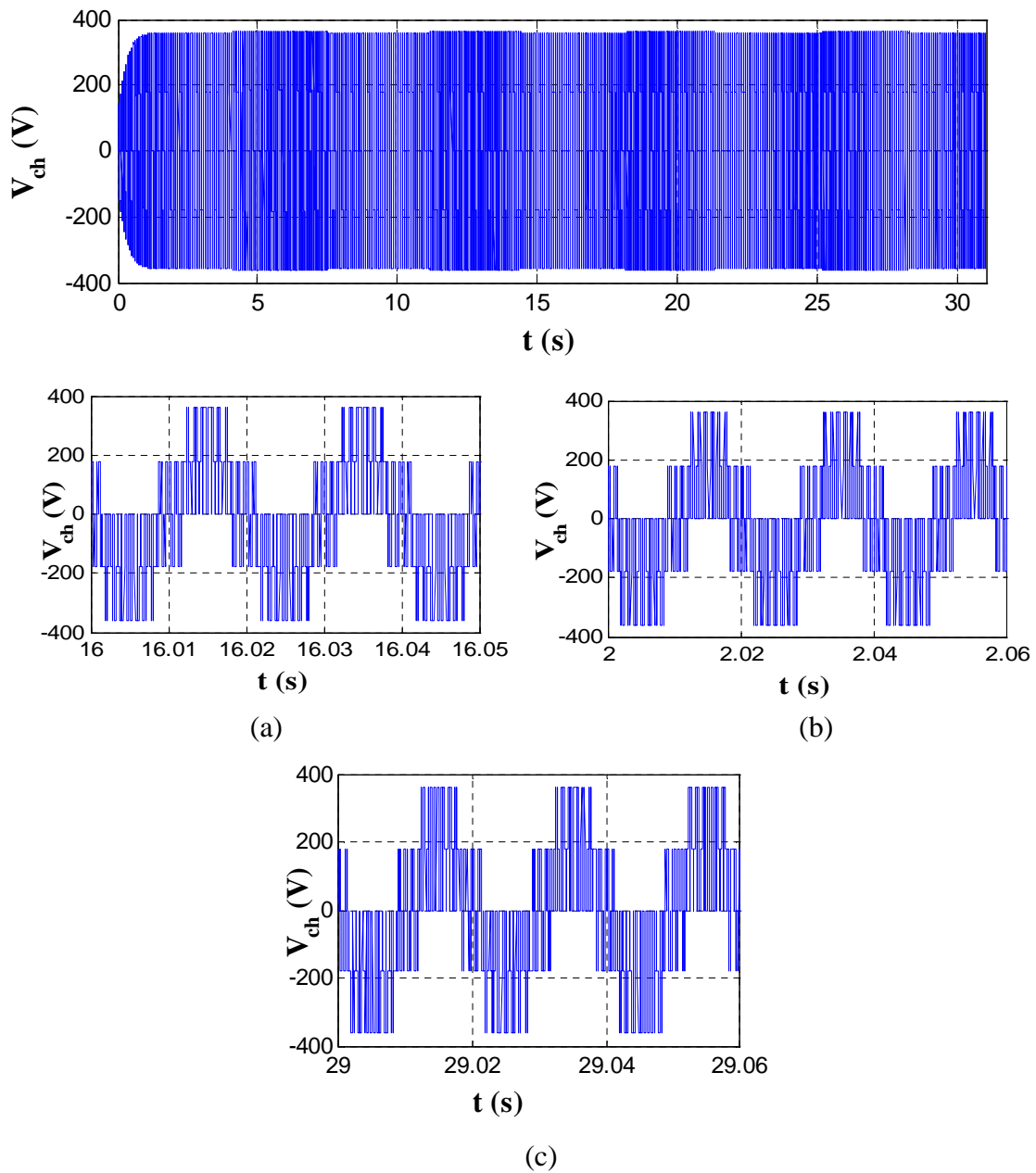
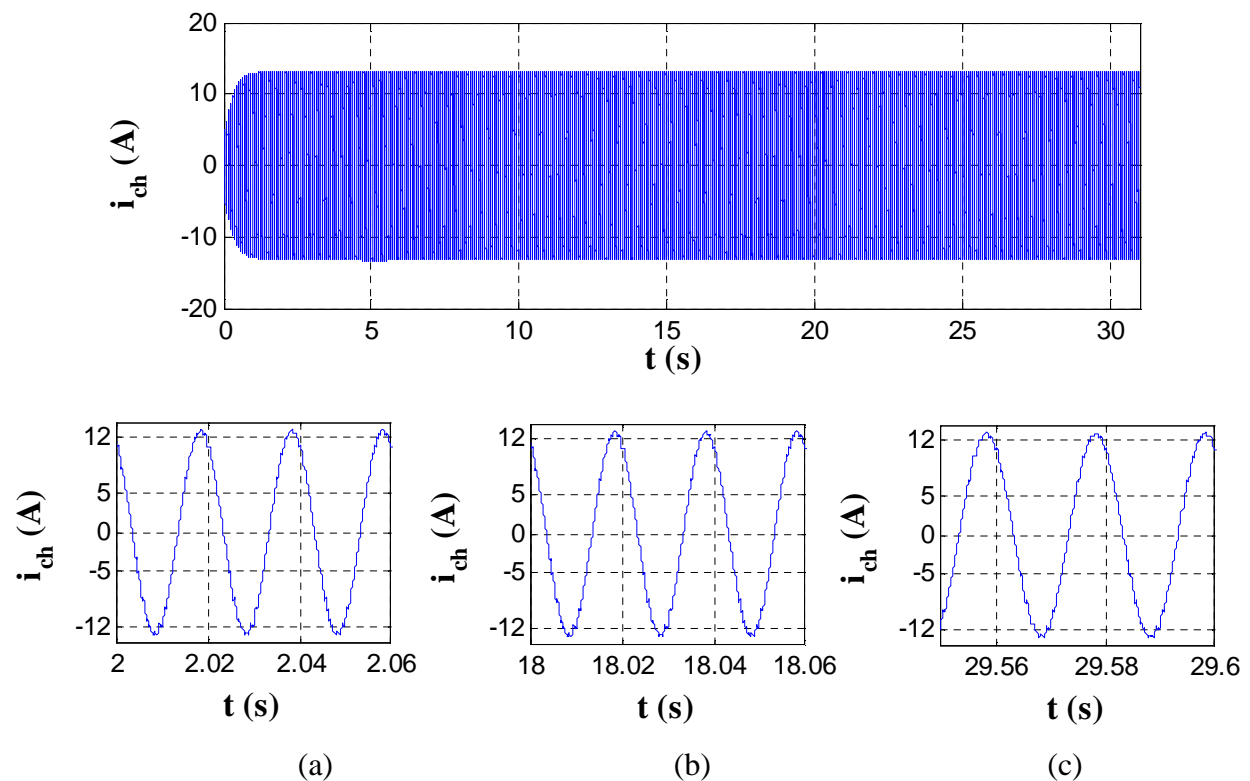


Figure III.14 – Tension d’une phase de la charge.

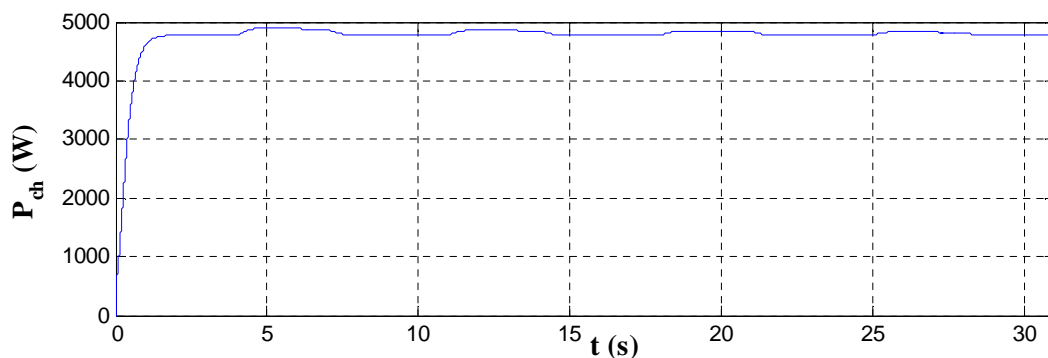


Sur les figures (III.14) et (III.15), les allures de la tension et du courant de charge montre que quelque soit la vitesse appliquée l'amplitude et la fréquence restent constantes (pour une charge constante).

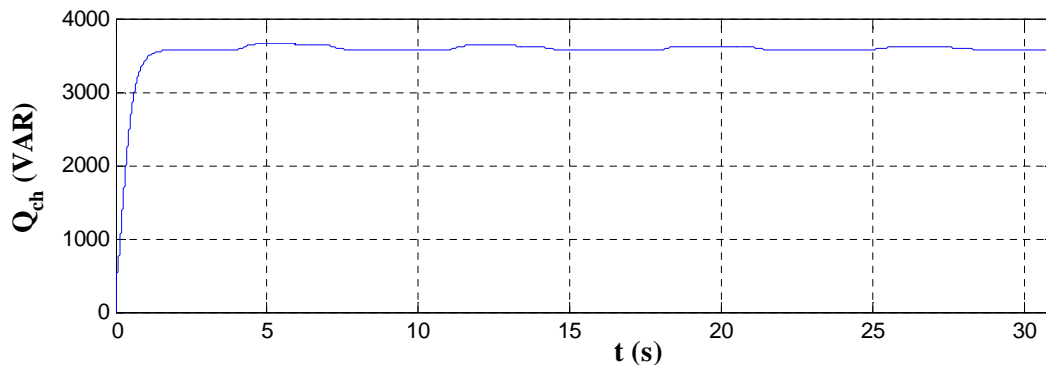


**Figure III.15** – Courant d'une phase de la charge.

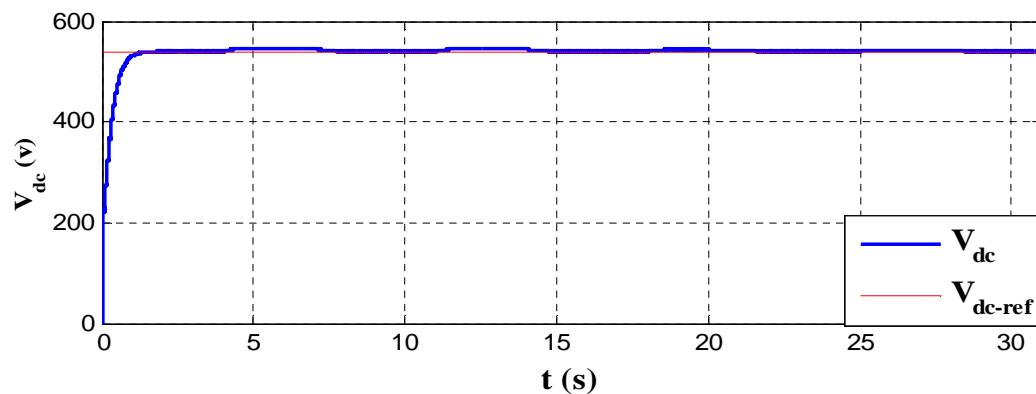
Les puissances active et réactive ( $P_{ch}$  et  $Q_{ch}$ ) mises en jeu dans la charge sont données par les figures suivantes ; figure (III.16) et figure (III.17), justifiant ce qui est annoncé pour les allures de la tension et du courant de charge ( $v_{ch}$  et  $i_{ch}$ ). De plus l'amplitude de la tension du bus continu n'est pas affectée par la variation de la vitesse comme l'illustre la figure (III.18).



**Figure III.16** – Puissance active d'une phase de la charge.



**Figure III.17** – Puissance réactive d'une phase de la charge.



**Figure III.18** – Tension redressée.

### III.10.2. Influence de variation de la charge

Pour déterminer les performances de notre système, en faisant varier la charge sous les différents modes de fonctionnement de la génératrice, en se basant sur l'application de la commande DTC. Pour chaque palier de vitesse (régime de fonctionnement) on applique deux charges, initialement la valeur de la charge est  $R = 20\Omega$  et  $L = 100\text{mH}$  à  $t = 6\text{ s}$  la résistance est diminuée à  $R = 10\Omega$ . On fixe la valeur de référence de la tension de bus continu  $V_{\text{dc-ref}}$  à 540V.

#### III.10.2.1. Régime hyposynchrone

Commençant par un entraînement en régime hyposynchrone, Les différents résultats sont présentés ci-dessous. Le flux rotorique, figure (IV.19), est totalement insensible à la variation de la charge.

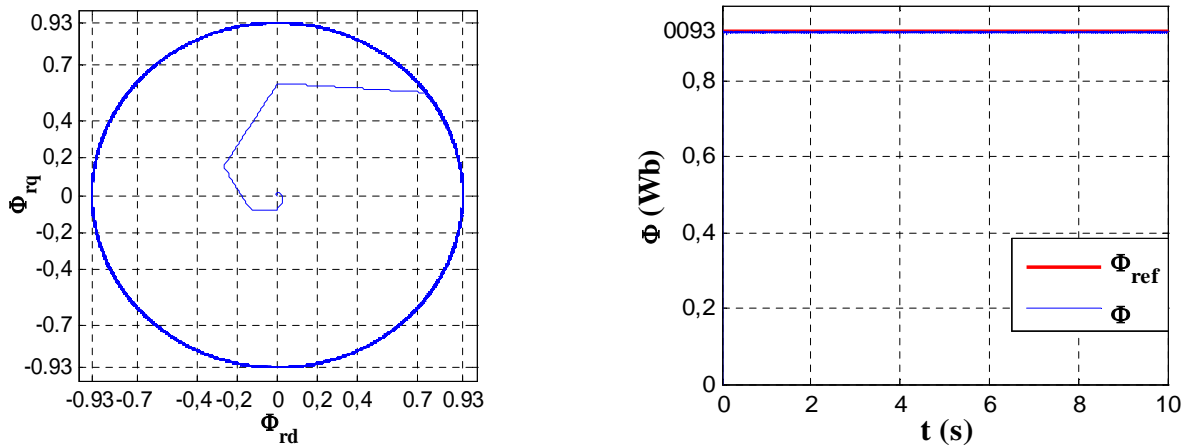


Figure III.19 – Trajectoire de flux rotorique.

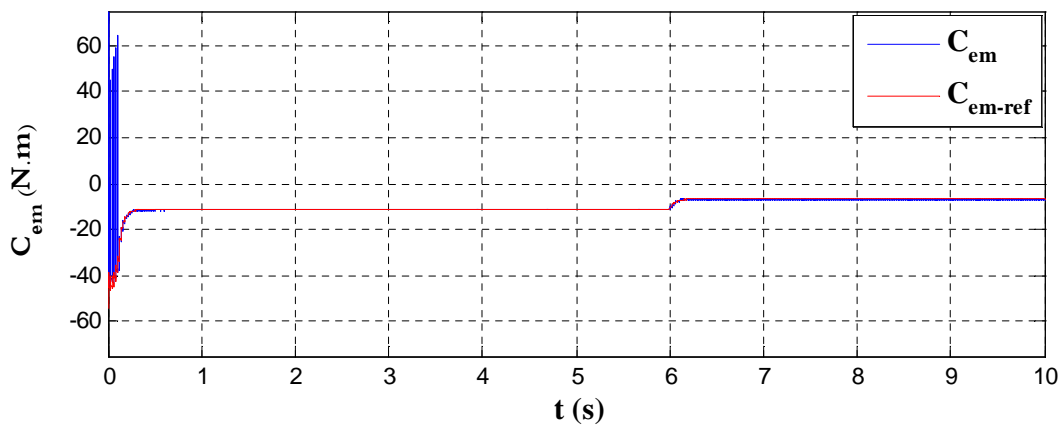
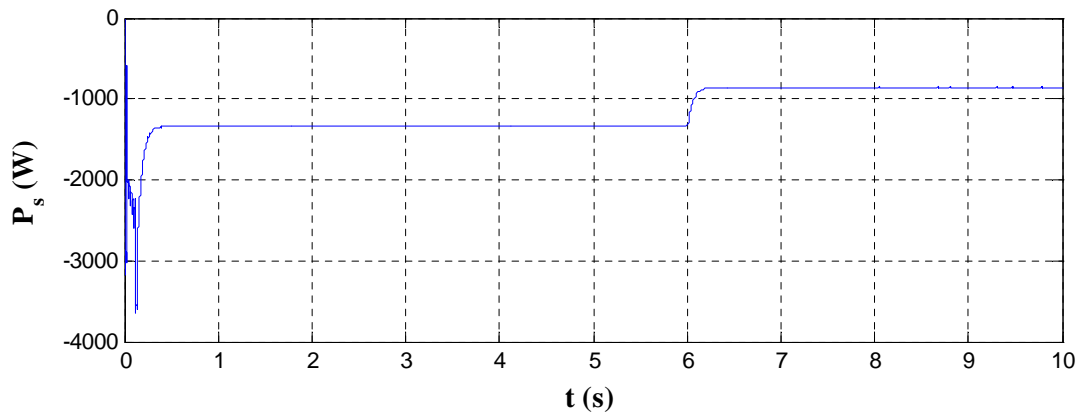


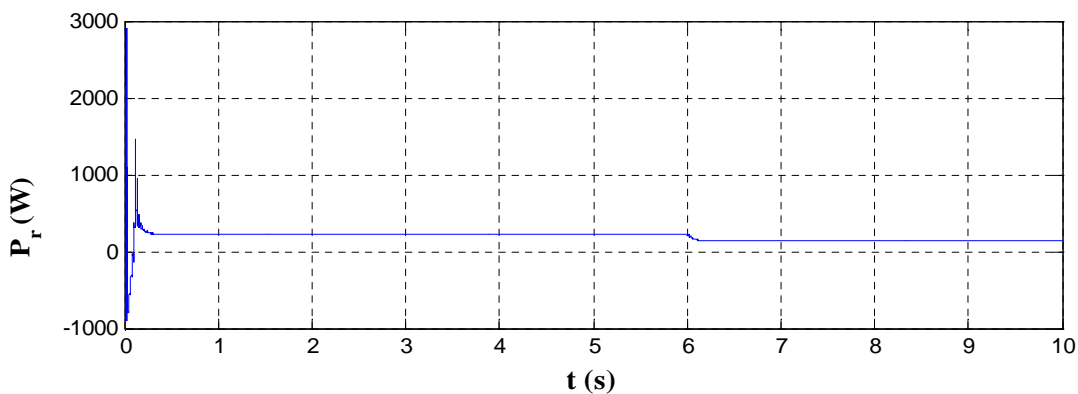
Figure III.21 – Couple électromagnétique.

La figure (III.21) montre que le couple électromagnétique suit la consigne et varie en fonction de la charge.

La puissance active statorique est fournie à la charge tandis que la puissance rotorique qui a un signe positif justifiant ainsi qu'elle est absorbée par la génératrice, de plus leurs amplitudes dépendent de la variation de la charge; c'est à dire, que l'augmentation de la charge engendre la variation des deux puissances comme le montre les figures (III.22) et (III.23), respectivement. Le régime hyposynchrone est confirmé par  $P_r > 0$ .

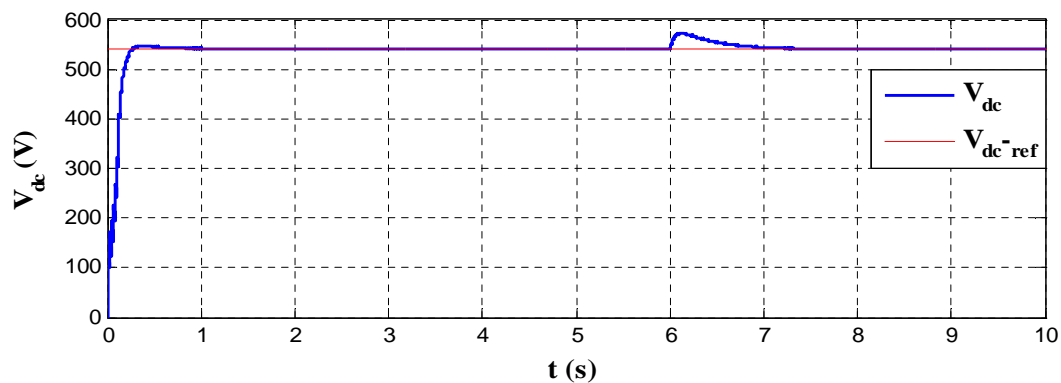


**Figure III.22-** Allure de la puissance active statorique



**Figure III.23 -** Allure de la puissance active rotorique

La figure (III.24) présente l'évolution de la tension du bus contenu ( $V_{dc}$ ) qui est fortement impactée par la variation de la charge avec un dépassement mais la poursuite de sa valeur de référence est assurée au régime permanent. Cette constatation est valable pour les trois régimes de fonctionnement de la GADA.



**Figure III. 24 –** Allure de la tension redressée

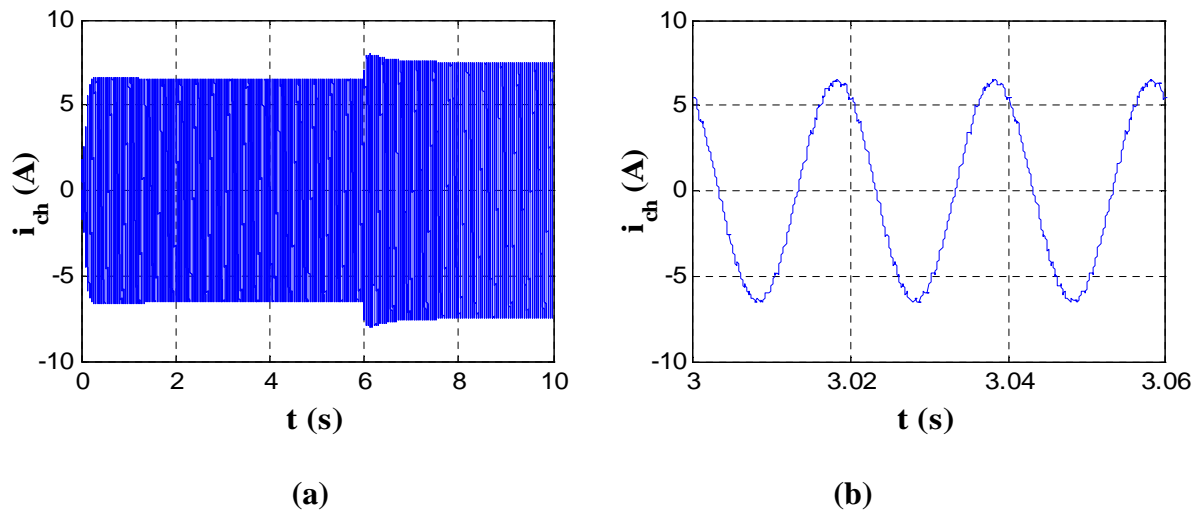


Figure III.25 – Courant d'une phase de la charge

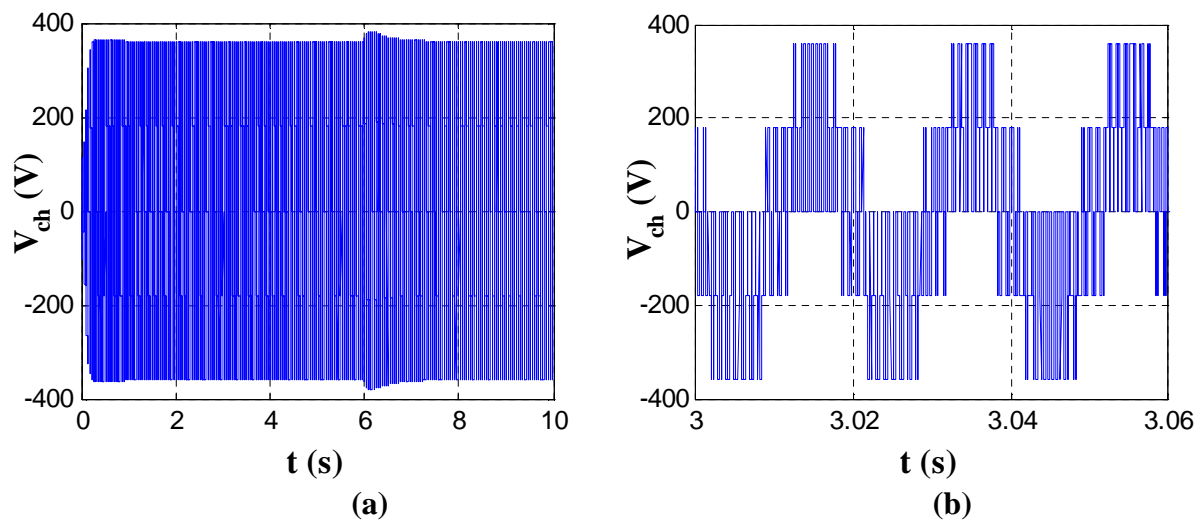


Figure III.26 – Allure de tension de la charge

Sur les figures (III.25) et (III.26), respectivement, les allures du courant de la tension et de charge sont illustrés, ce qui montrent que l'amplitude du courant change selon la variation de la charge, mais la fréquence ne subit pas de variation (reste constante) quelque soit la valeur de la charge connectée. Ce qui est vérifié pour les différents modes de fonctionnement de la génératrice.

### III.10.2.2. Régime synchronisme

A fin de confirmer le régime fonctionnement synchrone de la génératrice, nous représentant l'allure du courant rotorique qui a une fréquence nulle ce qui justifiée la nature continue de ce courant, figure (III.27).

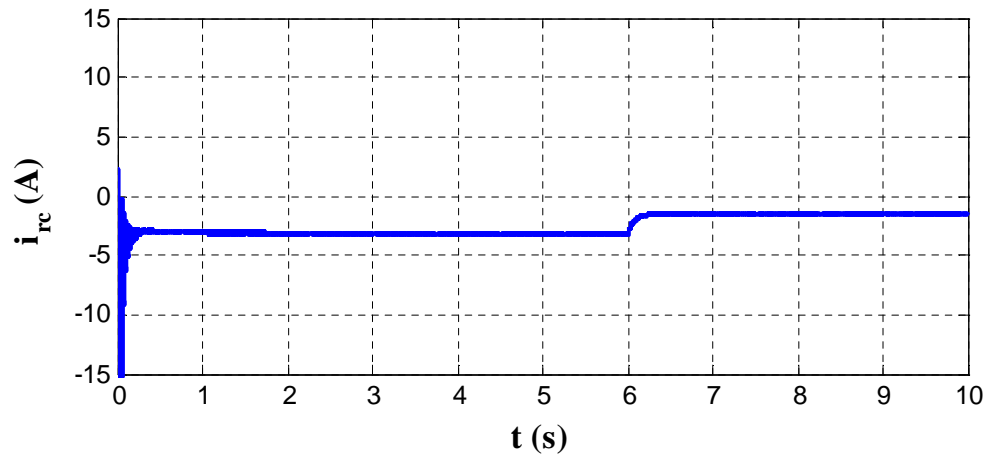


Figure III.27 – Allure de courant de phase.

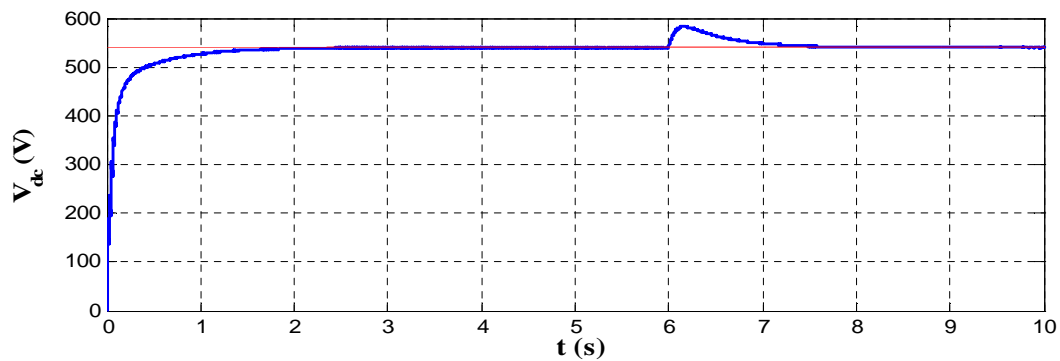


Figure III.28 – Allure de la tension redressée

La figure (III.28) présente l'évolution de la tension du bus contenu ( $V_{dc}$ ).

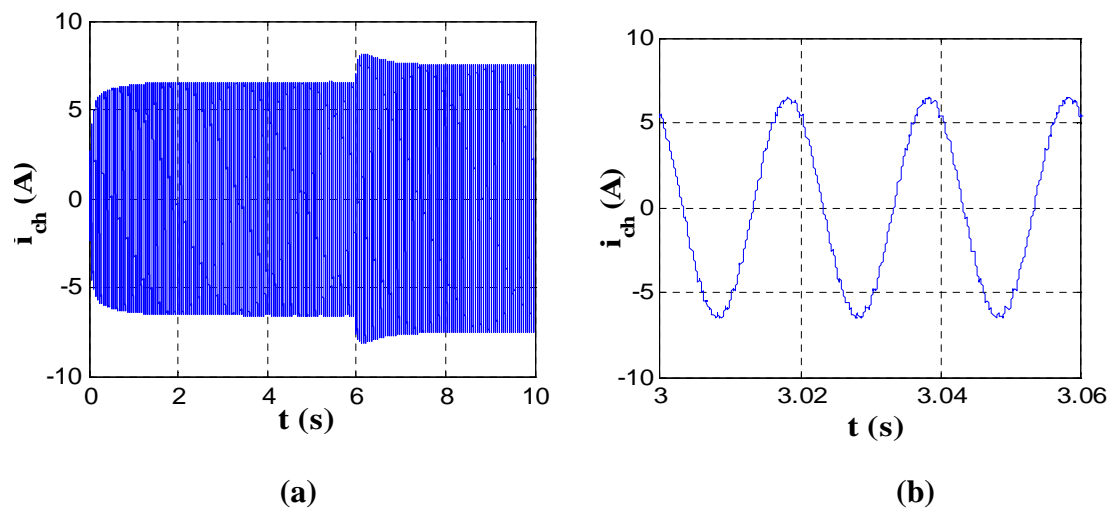


Figure III.29– Courant d'une phase de la charge

Les allures de la tension et du courant de charge sont illustrées sur les figures (III.29) et (III.30), respectivement.

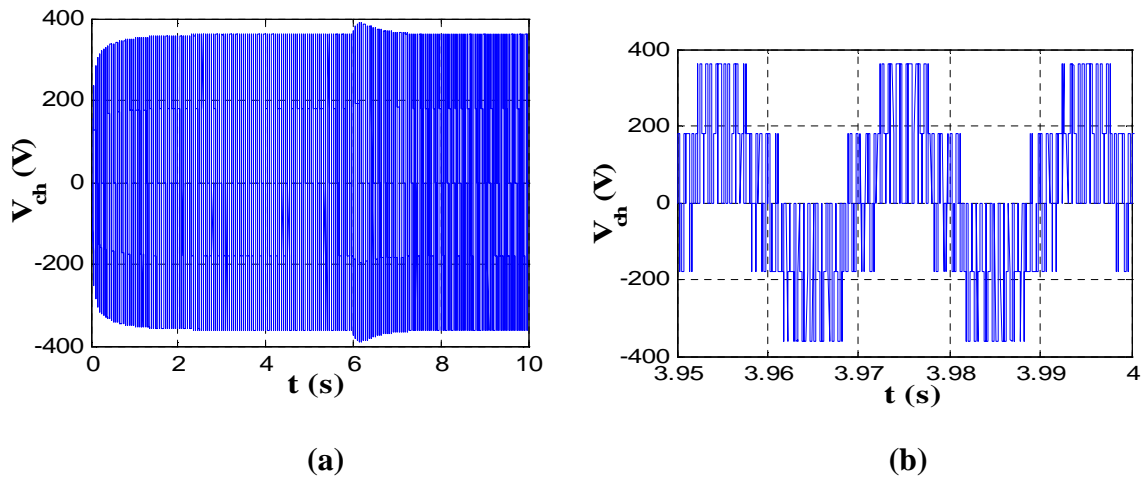


Figure III.30 – Allure de tension de la charge

### III.10.2.3. Régime hypersynchrone

Le régime de fonctionnement hypersynchrone est confirmé par le signe négatif de la puissance rotorique  $P_r < 0$ , figure (III.31).

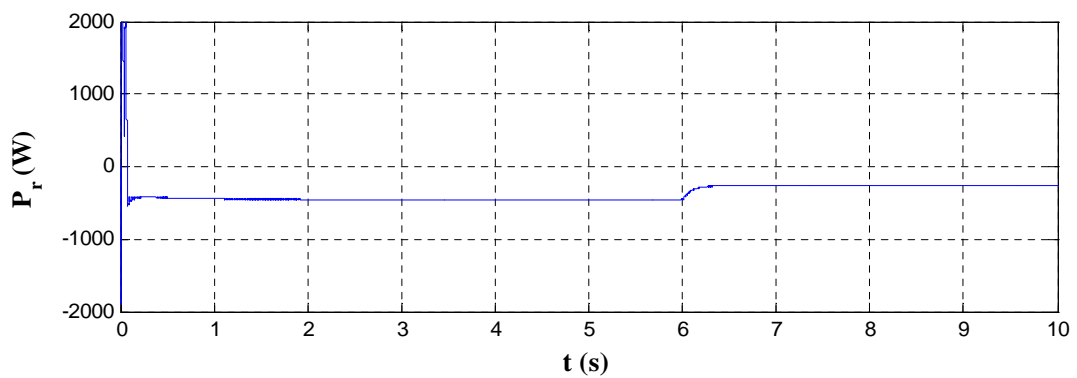


Figure III.31- Allure de la puissance active rotorique

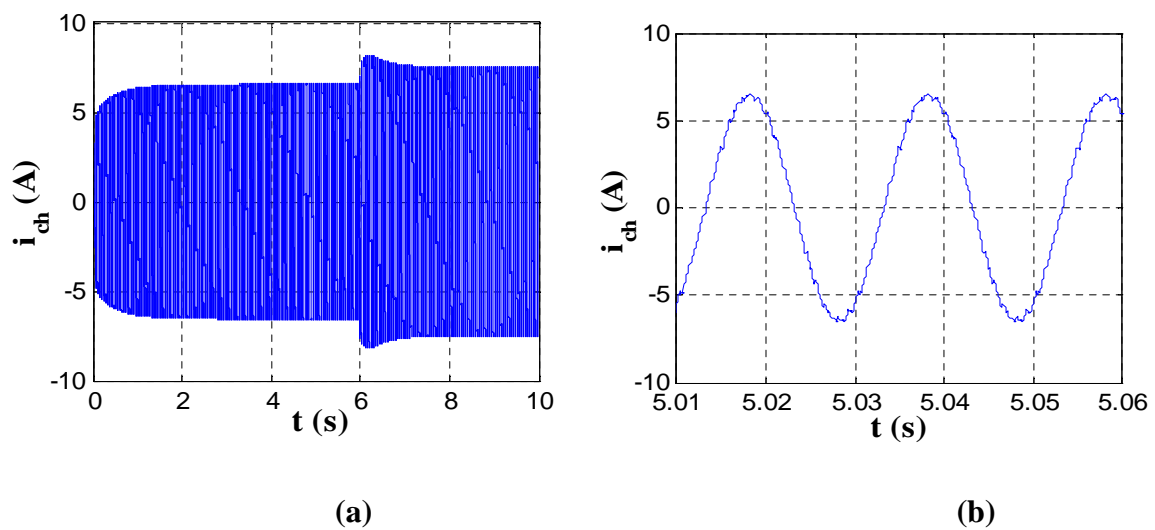
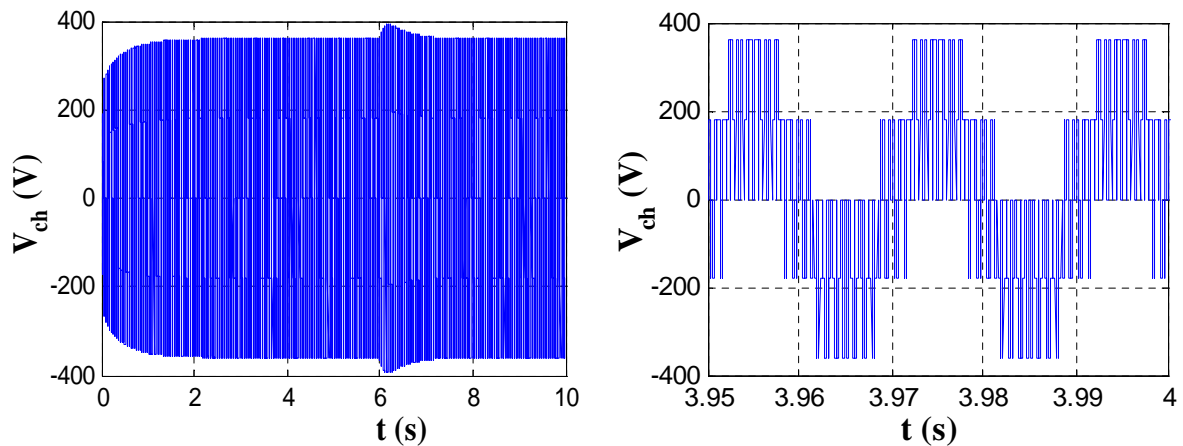
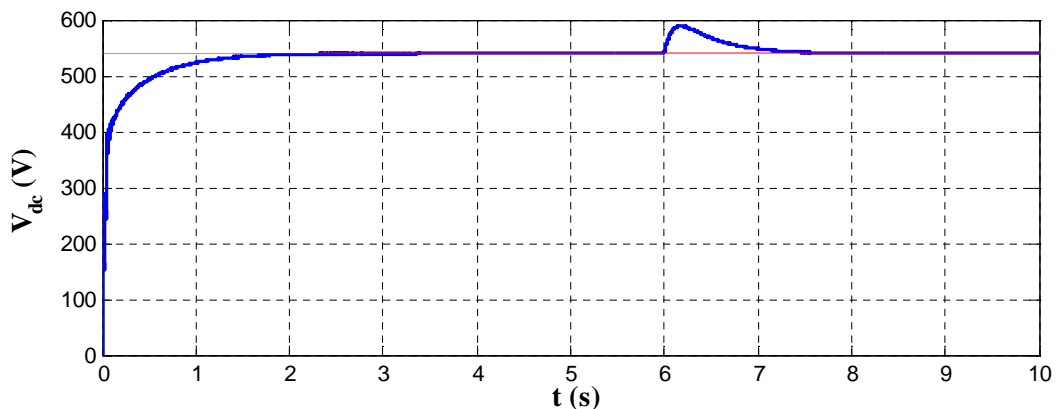


Figure III.23 – Courant d’une phase de la charge



**Figure III.33** – Tension d'une phase de la charge

Sur les figures (III.22) et (III.23), respectivement, le courant et la tension de charge sont représentés. Ainsi que l'évolution de la tension  $V_{dc}$  est montrée sur la figure (III.34).



**Figure III.34** – Allure de la tension redressée

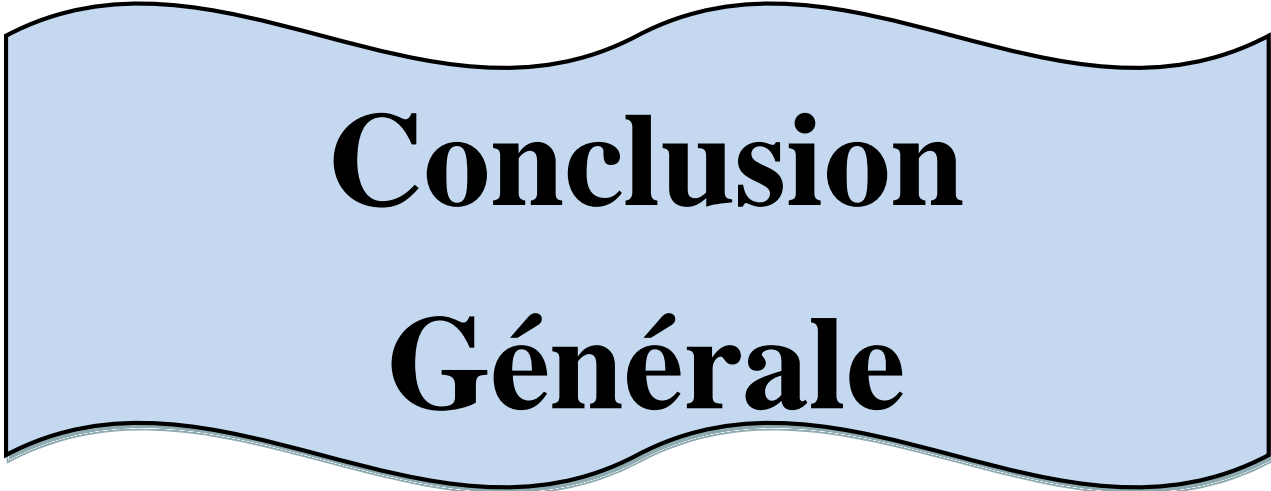
### III. 11. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la commande de la chaîne éolienne par la technique du contrôle directe du couple. Après avoir développé le principe de la DTC, nous avons étudié les différents modes de fonctionnements de la machine.

Le choix d'un correcteur à hystérésis malgré sa simplicité est une solution bien adaptée pour la commande directe du couple. L'application de cette commande nécessite une fréquence d'échantillonnage assez élevée pour réduire les ondulations sur le flux rotorique et le couple.

Les résultats de simulation montrent les bonnes performances dynamiques du couple et du flux. La variation de la charge affecte beaucoup plus celle de la tension de bus contenue plus que la variation de la vitesse.





**Conclusion  
Générale**

## Conclusion générale

L'objectif de ce présent travail est l'étude des performances d'une chaîne éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation connectée à une charge à travers son stator et via une interface d'électronique de puissance au rotor. Ce dernier est commandé par la technique de commande directe du couple.

Pour se placer dans le contexte général du travail et de choisir le système global à commander, il était important d'élaborer un document de synthèse illustrant les concepts fondamentaux d'une chaîne de conversion éolienne. Pour cela le premier chapitre a été consacré à la présentation de l'état de l'art des différents modes de production éolienne, types de générateurs ainsi que l'intérêt que peut apporter la machine asynchrone à double alimentation par rapport aux autres machines utilisées.

Bien évidemment toute implantation d'algorithme de commande nécessite la connaissance des modèles mathématiques des différentes parties du système à commander. La modélisation complète du système a été abordée dans le deuxième chapitre.

Le troisième chapitre a été consacré à la commande directe du couple de la chaîne de conversion éolienne par une technique non linéaire basée sur des régulateurs à hystérésis dénommée DTC. La génératrice asynchrone (GADA) connectée via un convertisseur de fréquence indirecte commandé afin de maintenir la tension de bus continue constante ainsi que la fréquence d'alimentation de la charge fixe pour des variations de vitesse et/ou de charge.

La technique de commande est alors été introduite et l'algorithme établis pour le fonctionnement en générateur autonome visé. Par ailleurs, dans un but de prospection et de tests, deux perturbations sont appliquées (fonctionnement sous trois régimes de machine ainsi que pour des charges différente).

Les résultats ont montré, d'une manière générale, une bonne dynamique du couple tout en gardant une meilleur précision du contrôle, ce qui est reflété par une très bonne régulation de la tension de bus continu ainsi qu'une fréquence de sortie constante quelque soit la valeur de la vitesse (régime de fonctionnement de la génératrice) mais une certaine sensibilité aux variations de la charge pour le premier. Toutefois, la régulation permet à la tension redressée

de retrouver rapidement sa valeur de référence. Enfin, en analysant les différents résultats obtenus, la DTC aboutit, globalement, à de meilleures performances.

Comme perspectives nous envisagerons :

- Etablissement du modèle de la MADA avec prise en compte de la saturation magnétique.
- Utilisation des onduleurs à niveau plus élevés ou des convertisseurs matriciels pour réduire les ondulations des interrupteurs de l'onduleur utilisé.
- La qualité de la puissance générée est de nature stochastique. Ceci limite la participation de l'éolienne au service système. D'où le fonctionnement du générateur seul n'est pas souhaité pour pallier à ce problème, il est intéressant de prévoir un système de stockage.

# **Nomenclateur**

## NOMENCLATEURE

- $C_{\text{arbre}}$  : couple sur l'arbre de la génératrice [N.m].
- $C_{\text{cpl}}$  : grandeur de sortie du contrôleur de couple.
- $C_{\text{em}}$  : couple électromagnétique [N.m].
- $C_{\text{flx}}$  : grandeur de sortie de contrôleur du flux.
- $C_{\text{m}}$  : coefficient de couple.
- $C_{\text{mec}}$  : couple mécanique total appliqué au rotor [N.m].
- $C_{\text{p}}$  : coefficient de puissance.
- $C_{\text{visq}}$  : couple résistant dû aux frottements [N.m].
- $f$  : coefficient de frottements visquex.
- $f_s$  : fréquences des grandeur.
- $G$  : rapporte de vitesse du multiplicateur.
- $G$  : glissement de la machine.
- $i_{\text{rd}}$  : courant rotorique d'axe direct [A].
- $i_{\text{sd}}$  : courant satatorique d'axe direct [A].
- $i_{\text{rq}}$  : courant rotorique d'axe quadrature [A].
- $i_{\text{sq}}$  : courant statorique d'axe quadrature [A].
- $i_{\text{r}}$  : courant rotorique [A].
- $[i_{\text{rabc}}]$  : vecteur des courant rotoriques [A].
- $i_{\text{s}}$  : courant statorique [A].
- $[i_{\text{rabc}}]$  : vecteur des courant statoriques [A].
- $J$  : inertie totale [kg.m<sup>2</sup>].
- $J_{\text{g}}$  : inertie de l'arbre de la génératrice [kg.m<sup>2</sup>].
- $J_{\text{t}}$  : inertie de la turbine [kg.m<sup>2</sup>].
- $K_{\text{i}}$  : gain intégrale du correcteur PI.
- $K_{\text{p}}$  : gain proportionnel du correcteur PI.
- $L_{\text{s}}$  : inductance cyclique propre au stator [H].
- $L_{\text{r}}$  : inductance cyclique propre au rotor [H].
- $l_{\text{s}}$  : inductance propre d'un enroulement statorique [H].
- $l_{\text{r}}$  : inductance propre d'un enroulement rotorique [H].
- $m$  : masse d'air qui traverse l'éolienne [kg].
- $M$  : inductance mutuelle cyclique stator rotor [H].

$M_r$  : inductance mutuelle entre deux phases rotorique [H].  
 $M_s$  : inductance mutuelle entre deux phases statorique [H].  
 $M_{sr}$  : valeur maximale des inductances mutuelle entre phase statorique et rotorique [H].  
 $N$  : vitesse de rotation de la machine en [tr/mn].  
 $[P(\theta)]$  : matrice de Park.  
 $p$  : nombre de paire de pôles de la machine.  
 $P_{mec}$  : puissance mécanique de la turbine éolienne [W].  
 $P_r$  : puissance active rotorique [W].  
 $P_s$  : puissance active statorique [W].  
 $P_t$  : puissance aérodynamique captée par la turbine éolienne [W].  
 $Q_r$  : puissance réactive rotorique [VAR].  
 $Q_s$  : puissance réactive statorique [VAR].  
 $R_t$  : rayonde l'hélice [m].  
 $[R_r]$  : matrice des résistances rotorique [ $\Omega$ ].  
 $[R_s]$  : matrice des résistances statorique [ $\Omega$ ].  
 $S_t$  : surface balayée par les pales éolienne [ $m^2$ ].  
 $S_{(i=a,b,c)}$  : variables booléennes de commande du l'onduleur.  
 $U_{dc}$  : tension continue à l'entrée de l'onduleur [V].  
 $V$  : vitesse du vent [m/s].  
 $V_{rd}$  : tension rotorique d'axe direct [V].  
 $V_{sd}$  : tenson statorique d'axe direct [V].  
 $V_{rq}$  : tenson statorique d'axe quadrature [V].  
 $V_{sq}$  : tenson statorique d'axe quadrature [V].  
 $V_r$  : tension rotoriques [V].  
 $[V_{rabc}]$  : vecteur des tensions rotoriques.  
 $V_s$  : tension rotorique [V].  
 $[V_{sabc}]$  : vecteur des tensions statoriques.  
 $V_{syn}$  : valeur de la vitesse de vent qui impose le régime synchrone à la machine.  
 $\theta$  : angle électrique entre l'axe de la phase (a) du rotor et l'axede la phase (a) du stator.  
[rad].  
 $\theta_r$  : angle électrique entre l'axe de la phase (a) du rotor et l'axe deirect [rad].  
 $\theta_r$  : angle électrique entre l'axe de la phase (a) du stator et l'axe deirect [rad].  
 $\lambda$  : vitesse spécifique de l'éolienne.  
 $\rho$  : masse volumique de l'air [ $kg/m^2$ ].

- $\Phi_{rd}$  : flux rotorique d'axe direct [Wb].  
 $\Phi_{sq}$  : flux rotorique d'axe quadratureur [Wb].  
 $\Phi_r$  : flux rotorique [Wb].  
 $\Phi_{sd}$  : flux rstatorique d'axe direct [Wb].  
 $\Phi_{sq}$  : flux statorique d'axe quadratureur [Wb].  
 $\Phi_s$  : flux staotorique [Wb].  
 $\Omega$  : vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice [rad/s].  
 $\Omega_t$  : vitesse de rotation de la turbine [rad/s].  
 $\gamma$  : angle entre les vecteurs flux statorique et rotorique [rad].  
 $\alpha_r$  : angle entre le référentiel (d, q) et le vecteur flux rotorique [rad].

## Indices

- ref : indique la valeur de référence.  
est : indique la valeur estimée.  
opt : indique la valeur optimale.  
n : indique la valeur nominale.



# Liste des figures



## Liste des figures

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

**Figure I.2** - Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

**Figure I.3** - Eolienne à axe vertical.

**Figure I.4** - Différentes déclinaisons des éoliennes à axe vertical de type Darrieus.

**Figure I.5** - Le rotor Savonius est composé de deux demi-cylindres désaxés.

**Figure I.6** - Eolienne Savonius sur une toiture.

**Figure I.7** - Eolienne à axe horizontal.

**Figure I.8** - Principales composants de l'éolienne à axe horizontal.

**Figure I.9** - Schéma d'éoliennes à axe horizontal mono pales, bipale et tripale

**Figure I.10** - Pitch contrôle.

**Figure I.12** - Principe de conversion de l'énergie dans une éolienne.

**Figure I.13** - Tube de courant autour d'une éolienne.

**Figure I.14** - Coefficient de puissance.

**Figure I .15** : Exemple de variation du coefficient de puissance en fonction de l'angle d'orientation des pales et du ratio de vitesse.

**Figure I.16** - Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable.

**Figure I.17** - Interface d'électronique de puissance.

**Figure I.18** - Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse fixe.

**Figure I. 19** - Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à fréquence variable.

**Figure I.20** - Système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation à fréquence variable.

**Figure I.21** - Système éolien basé sur une machine synchrone à aimants permanents à fréquence variable.

**Figure I.22** – Machine synchrone avec redresseur à diodes.

**Figure I.23** – Machine synchrone connectée à un redresseur à diodes et hacheur dévolteur.

**Figure I.24** – Machine synchrone avec convertisseur à diodes et hacheur en pont.

**Figure I.25** – Machine synchrone connectée à un redresseur à MLI.

**Figure I.26** - Machine asynchrone auto – excitée avec une batterie de condensateurs.

- Figure I.27**– Machine asynchrone auto – excitée avec compensation série.
- Figure I.28** – Structure à base de deux convertisseurs MLI.
- Figure I.29** - Schéma de principe de la double alimentation.
- Figure I.30** - Machine asynchrone à double bobinage statorique..
- Figure I.31** - Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor .
- Figure II.1** – Schéma représentatif de système proposé.
- Figure II.2** – Représentation schématique d'une machine asynchrone double alimentée.
- Figure II.3** – Les différents systèmes d'axes utilisés.
- Figure (II.4)** - Fonctionnement de la MADA en mode moteur (hypo-synchronisme).
- Figure (II.5)** - Fonctionnement de la MADA en mode moteur (hyper-synchronisme).
- Figure II.6** - Fonctionnement de la MADA en mode générateur (hypo-synchronisme).
- Figure (II.7)** - Fonctionnement de la MADA en mode générateur (hyper-synchronisme).
- Figure II.8** Schéma de l'onduleur de tension.
- Figure II.9** : Schéma d'un bras de l'onduleur.
- Figure II.10** - Topologies de base d'un redresseur de tension.
- Figure (II.11)** - Principes de fonctionnement de Modulateur MLI à bande d'hystérésis.
- Figure III.1** – Représentation vectorielle des tensions de l'onduleur.
- Figure III.3** – Principe du contrôle du flux rotorique.
- Figure III.4** Illustration de la composante de couple et du flux lors de la variation du vecteur.
- Figure III.5** - Sélection du vecteur tension.
- Figure III.6** -(a) : Sélection de vectrices tensions correspondantes au contrôle de l'amplitude  $\Phi_r$  .  
-(b) : Contrôleur à hystérésis à deux niveaux.
- Figure III.7** - Correcteur de couple à trois niveaux.
- Figure III.8** – Schéma structurel de commande du système éolien global
- Figure III. 9** – Le profil de vitesse d'entraînement.
- Figure III.10** – Allure de la puissance rotorique.
- Figure III.11** – Courant d'une phase rotorique.
- Figure III.12** – (a) : Trajectoire du flux rotorique estimé.  
(b) : Evolution du module du flux rotorique estimé par rapport à sa référence.
- Figure III.13** – Couple électromagnétique.
- Figure III.14** – Tension d'une phase de la charge.
- Figure III.15** – Courant d'une phase de la charge.

- Figure III.16** – Puissance active d’une phase de la charge.
- Figure III.17** – Puissance réactive d’une phase de la charge.
- Figure III.18** – Tension redressée.
- Figure III.19** – Trajectoire de flux rotorique.
- Figure III.21** – Couple électromagnétique.
- Figure III.22**- Allure de la puissance active statorique.
- Figure III.23** - Allure de la puissance active rotorique.
- Figure III. 24** – Allure de la tension redressée.
- Figure III.25** – Courant d’une phase de la charge.
- Figure III.26** –Allure de tension de la charge.
- Figure III.27** – Allure de courant de phase.
- Figure III.28** – Allure de la tension redressée .
- Figure III.29**– Courant d’une phase de la charge.
- Figure III.30** –Allure de tension de la charge.
- Figure III.31**- Allure de la puissance active rotorique.
- Figure III.23** – Courant d’une phase de la charge.
- Figure III.33** – Tension d’une phase de la charge.
- Figure III.34** – Allure de la tension redressée.

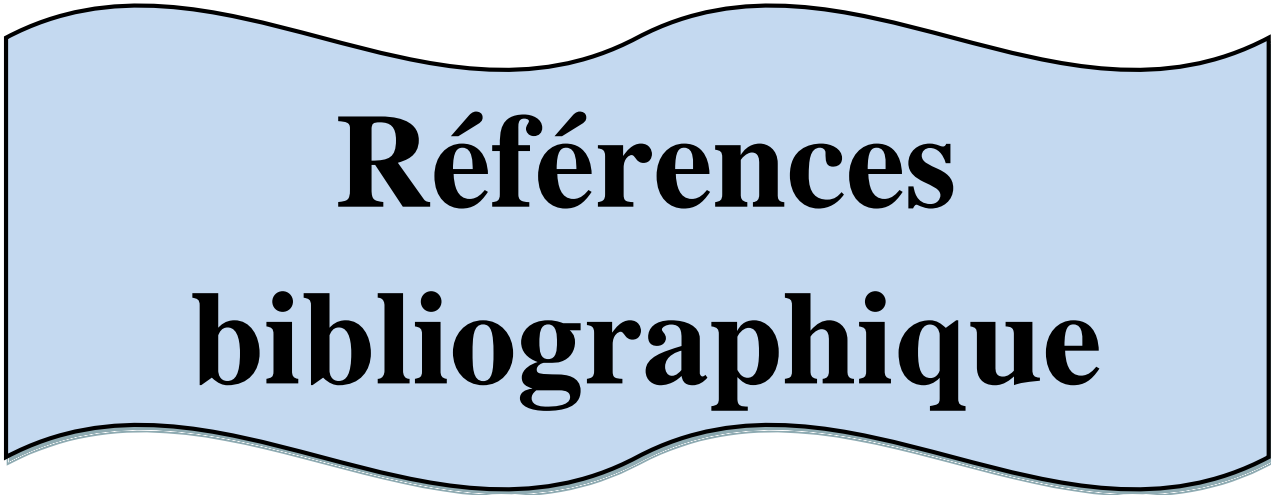
# Liste des tableaux

## Liste des tableaux

**Tableau III.1** – Calcul des vecteurs de tension

**Tableau III.3** – La table de commutation avec un correcteur de couple à trois niveaux

**Tableau III.2** – Module et argument de chaque vecteur tension



**Références  
bibliographiques**

- [Abd 04] : R. Abdelli, « Différentes stratégies de contrôle direct de couple d'une machine asynchrone », mémoire d'ingénieur en électrotechnique, option commande électrique, de l'université A.Mira Bejaia, Algérie, juin 2004.
- [Abd 07] : A. Abdelli « Optimisation multicritère d'une chine éolienne passive », thèse de doctorat, institut national polytechnique de toulouse, France, 2007.
- [Ack 02]: T. Ackermann, I. Söder, « overview of wind energy-status. renewable and sustainable energy reviews », vol. 6, pp. 67-128, 2002.
- [Aim 04] : S. el Aimani, «modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat, école centrale de lille, France, 2004.
- [Ame 05] : A. Ammeur, « commande sans capteur de vitesse par DTC d'une machine asynchrone à aimant permanent dotée d'un observateur d'ordre complet à mode glissant », mémoire de magister de l'université de Batna, Algérie, 2005.
- [Amm 08] : H. Ammaoui, M. Bouzera, « etude de la commande direct de couple d'une machine asynchrone à aimant permanent dotée d'un observateur d'ordre complet à mode glissant », mémoire de magister de l'université A. Mira Bejaïa, Algérie, 2008.
- [And 96] : C. Andere, « Contrôle direct de couple d'une machine asynchrone par l'orientation de son flux statorique », Thèse de doctorat de l'institut nationale polytechnique de Grenoble, France, 1996.
- [Bel 08] : C. Belalahy « Dimensionnement d'une machine synchro à reluctance à excitation homopolaire par réseaux de permanences » thèse de doctorat Nancy, France, 2008.
- [Bel 10] : S. Belakehal, « conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables », Thèse de doctorat, université Mentouri, Constantine, 2010.
- [Ben 10] : L. Benalia « Commande en tension des moteurs induction double alimentés » thèse de doctorat de l'Université de Batna, Algérie, 2010.
- [Ber 06] : F. Bernard, « machine asynchrones – commande par contrôle direct de couple », technique de l'ingénieur, D3623, mai 2006.
- [Bon 98] : J. Bonal, G. Séguier. « Entraînements électriques à vitesse variable ». volume 2, la voisier, 1998.
- [Boy-a 06] : A. Boyette, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de doctorat en Génie électrique, Université de Henri Poincaré, Nancy-i, France, 2006.

- [**Boy-b 06**] : A. Boyette, shahrokh Saadate, « Eolienne avec génératrice asynchrone à double alimentation et unité de stockage d'énergie pour la production continue d'électricité », epf juillet (cd rom s7-2) Grenoble, France, 2006.
- [**Cam 03**] : H. Camblong « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », thèse de doctorat, école nationale supérieur d'arts et métiers, centre de bordeaux, France, 2003.
- [**Car 00**] : C. Canudas, « Modélisation, contrôle vectoriel et DTC, Commande des machine asynchrone », édition 1 hermès science Europe, 2000.
- [**Car 95**] : J. Caron, .T. Hautier, « Modélisation et commande de la machine asynchrone », livre, Edition TECHNIP, 1995.
- [**Cha 90**] : Chatlin « Machine électrique » Presses polytechnique Normandes, France, 1990.
- [**Cha 06**] : M. Challali, M. Khiri, « Etude d'une éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation et commandé par un convertisseur matriciel », mémoire de d'ingénieur en électrotechnique de l'Université A. Mira Bejaia, Algérie, 2006.
- [**Cla 06**] : Je – C. Sabonnadière, « Nouvelles technologies de l'énergie », Edition1 Hermès lavoisier, pp. 137 – 178, 2006.
- [**Dav 07**] : A. Davigny « Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, France, 2007.
- [**Dio 99**] : A. Diop, « contribution au développement d'un simulateur électromécanique d'aérogénérateurs », Thèse de doctorat, Université du Havre, France, 1999.
- [**Dje 07**] : H. Djeghloud « Filtrage actif de puissance », thèse de doctorat, Université Mentouri, Constantine, Algérie, 2007.
- [**Far 05**] : A. Farret, B. Palle et M. G. Simoes « IEE ull expandable model of parallel self-excited induction generators », IEE Proc-Electrique, power appl, vol 152, N° 1, January 2005.
- [**Hab 91**] : T.G. Habetler, d.m. divan. « Control strategies for direct torque control using discrete pulse modulation», IEE trans. ind. applicat., ia-27(5): 893-901, 1991.
- [**Ham 08**] : I. Hamzaoui, « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur », Mémoire de Magistère, polytechnique, Algérie 2008.
- [**Har 10**] : N. Herfia « Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens », Thèse de doctorat, Université Mentouri, Constantine, Algérie, 2010.
- [**Hau 00**] : E. Hau, wind turbines, Springer, 2000.



- [Idj 10] : K. Idjdarene « Contribution à l'étude et la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonomes » Thèse de doctorat, Université Lille 1, A. Mira de Bejaïa 2010.
- [Jan 03] : B. Jan Ekanayake, L. Holdsworth, X. Wu, and N. Jenkins, « Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines transactions on power systems », IEEE vol. 18, no.2, 2003.
- [Joi 03] , s. joi., L. Driesen, R. Belmans, « A comprehensive model of a doubly fed induction generator for dynamic simulations and power system studies » esat/electa. ku. leuven. belgium. icrep 03, 2003.
- [Keb 02] : Y. Kebbati, « Développement d'une méthodologie de conception matériel à base de module générique vhdl/vhdl-ams en vue d'une intégration de systèmes de commande électriques », Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg, France 2005.
- [Ken 11] : F. Kendouli, K. Nabti, K. Abed et H. Benalla « Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation » Conférence de l'Université Mentouri, Constantine, Algérie, 2011.
- [Kho 06] : S. Khojjet El-khil « Commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée (mada) » Thèse doctorat polytechnique de Toulouse, France, 2006.
- [Kui 02] : G. Van Kuik, « Research ready what drives the development », Global wind power conference proceedings, Paris, France, 2002.
- [Lav 04] : N. Laverdure, D. Roye, S. Bacha, R. Belhomme, « Technologie des systèmes éoliens – intégration dans les réseaux électriques », Revue 3ei, n°39, pp. 14-25, décembre 2004.
- [Lec 04] : L. Leclercq, « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », Thèse de doctorat, université des sciences et technologies de Lille, France, 2004.
- [Lei 92] : W. E. Leithead, « Effective wind speed models for simple wind turbine simulations », 14th british wind energy association conference proceedings, 1992, pp 321-326.
- [Lin 05] : J. Lianwei, H. Banakar.,; s. Baike; L.Changling; G. Joos, «Fundamental and applied research on doubly-fed induction generator », Proceedings of the eighth international conference on, volume 1, 27-29, pp. 32 – 37, Canada Area sept. 2005.),
- [Lub 03] : T. Lubin, « Modélisation et commande de la machine synchrone à réluctance variable. prise en compte de la saturation magnétique », Thèse de doctorat, université henri Poincaré, Nancy, France, 2003.

- [**Mac 03**] : M. Machmoum, F. Poitiers, L. Moreau et M.E. Zaïm, « Etude d'éoliennes à vitesse variable basées sur des machines asynchrones (mas-mada) » International Conference on Electrotechnics, Polytechnique de l'université de Nantes, France, 2003
- [**Mai 04**] : D. Daizi, « Commande direct du couple d'un moteur synchrone à reluctance variable par dsp », mémoire d'ingénieur en génie électrique, 2004.
- [**Mal 00**] : M. Malinowski and m.p. kazmierkowski, « Simulation study of virtual flux direct for three-phase pwm rectifiers », 26th annual conference of the IEEE; industrial electronics society, incon, vol. 4, pp. 2620 – 2625, Université, Monerri, Constantine, Algerie 2000.
- [**Mal 01**] : M. Malinowski, « Sensorless control strategies for three - phase pwm rectifiers », These, warsaw University of technology, institute of control and industrial electronics, Poland, 2001.
- [**Mar97**] : J. Martin, « energies éoliennes », Techniques de l'ingénieur, traité de génie énergétique, vol, b 8 585 1- b 8 585 21, 1997.
- [**Mer 00**] K. Merouani, A. Kheloui. « Commande directe du couple d'une machine asynchrone par pc » conférence internationale IEEE, 2000.
- [**Mig 08**] : L. Miguel « Contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée » Thèse de doctorat, Université Paris sud 11, France, 2008.
- [**Mir 05**] : A. Mirecki « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, France, 2005.
- [**Mok 04**] : B. Mokhtari, « Implantation de la DTC par des techniques de l'intelligence artificielle neuronale et neuro floue », Mémoire de magister de l'université de Batna, Algerie, 2005.
- [**Mul 02**] : B. Multon, O. Gergaud, H Ben-Ahmed, X. Roboam, S. Astier, b dakyo, C. Nichita « Etat de l'art dans les aérogénérateurs électriques », conférence en France 2002.
- [**Mulj 98**] : E. Muljadi, K. Pierce et P. Migliore – « Control strategy for variable speed, stall-regulated wind turbines », american controls conference, philadelphia, pa , juin 24-26, 1998.
- [**Mur 96**] : S. Murthy, C. Rabhu, K. Tandon « Analysis of series compensated self excited induction generators for autonomous power generation », international conference on power electronics, drives and energy systems for industrial growth, vol. 2, 8-11 january 1996, pp. 687- 693.
- [**Oua 09**] : M. Ouali, w. Bahloul, M. Chaabene et M.B.A Kamoun « E+tude statique d'une génératrice asynchrone autonome alimentant un moteur à induction », Tunisie, 2009.

- [Pat 10] : M. Pattnaik, and D. Kastha, member, IEEE « Control of double output induction machine based stand alone variable speed constant frequency generator with nonlinear and unbalanced loads », IEEE India, 2010.
- [Pen 96] : R. Pena, J. Clare et G. M. Asher «A doubly fed induction generator using back-to-back pwm converters supplying an isolated load from a variable speed wind turbine », IEEE proc-electr, power appl, vol 143, no 5, september 1996.
- [Phi 06] : P. Philippe e, A. Boyette, and S. Saadate, « Direct and indirect control of a doubly fed induction generator wind turbine including a storage unit », iecon'06 november 2006 Paris (cd rom isbn 1-4244-0136-4).
- [Poi 03] : F. PoitierP- « etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne - machine asynchrone à cage autonome ; machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », thèse de doctorat, université de Nantes, France, 2003.
- [Pol 05] : H. polinder, sjoerd w.h de haan, maxime r. dubois, g johannes. « basic operation principles and electrical conversion systems of wind turbines », epe journal, vol. 15, n°4, december 2005, pp. 43 – 50.
- [Rah 00] : M. F.Rahman, L. Zhong , and M.E.Haque. « Voltage switching tables for dtc controlled interior permanent magnet motor ». Journal of electrical and electronics engineering, special issue on power engineering, vol.20.no.1.pp.1-7, Australia, 2000.
- [Red 09] R. Redjem « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne » Mémoire magistère, Université Mentouri de Constantine, Algérie, 2009.
- [Rob 06] : B. Robyns, A. Davigny, C. Saudemont, A. Ansel, V. Courtecuisse, B. François, s. plumel, J. deuse, « impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie », actes des journées 2006 de la section electrotechnique du club EEA.
- [Rod 00] : J.I. Rodriguez, « Análisis dinámico y diseño del sistema de control de aeroturbinas de velocidad variable con generador asíncrono de doble alimentación », Thèse doctorale à l'université carlos iii de Madrid, Espagne, 2000.
- [Rog 04] : V. Rogez, « Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des etudes de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire », Thèse de doctorat, Université d'Artois décembre 2004.
- [Sab 06a] : C. Sabonnadière -, « Nouvelles technologies de l'énergie 1 », Hermès lavoisier, 2006, pp. 137 – 178, volume 1 : 2-7462-1376-1.

- [Sar 00] : S. Sarray. « Etude et simulation d'une commande directe de couple pour l'entraînement électrique d'une machine asynchrone ». Thèse de maîtrise en génie de la production automatisée m.ing doctorat Montréal , Canada / décembre 2000.
- [Sar 03] : F. M. Sargos, « Machines à réluctance variable », cours de d.e.a génie électrique de l'inpl, 2002-2003.
- [Sch 03] : A. Schmidhofer, H. Weiss, « Optimization of power electronics for small stand alone wind power stations », 10th European conference on power electronics and applications epe'03, Toulouse, France, 2003, pp. 1-6.
- [Sey 03] : D. Seyoum, M. F. Rahman et C. Grantham « Terminal voltage control of a wind turbine driven isolated induction generator using stator oriented field control », applied power electronics conference and exposition, eighteenth annual IEEE, vol. 2, Miami beach, 9-13 fevrier 2003, pp. 846-852.
- [Shr 95] : I. Shridhar, B. Singh, c. s. jha, b. p. singh et s. s. murthy – « selection of capacitors for the self-regulated short shunt seig excited induction generator », iee transactions on energy conversion, vol. 10, no. 1, march 1995, pp. 10-17
- [Tak 86] : I. Takahashi and T. Noguchi. « a new quick response and high efficiency control strategy of induction motor ». IEEE Trans. Ind. Electron., ie-22, sept/oct. 1986.
- [Tak 87] : I. Takahashi, S. Asakawa. « Ultra-wide speed control of induction motor covered 10a6 range». IEEE trans. Ind. Applicat., ia-25:227-232, 1987.
- [Tam 06] : H. Tambrabet, « Robustesse d'un control vectoriel de structure minimale d'une machine asynchrone », mémoire de magister en electrotechnique, option electronique de puissance de l'université d'Annaba, Algérie, 20 mai 2006.
- [tap 05] : A. Tapia, ; A .Tapia, , « Wind generation optimization algorithm for a doubly fed induction generator » IEEE proceedings on generation, transmission and distribution, volume 152, issue 2, 4.
- [Tou 00] : A. Tounzi, « Utilisation de l'énergie éolienne dans la production de l'électricité », la revue 3ei n°20, mars 2000, pp. 24 – 38.
- [Vri 83] : O. Vries, « On the theory of the horizontal axis wind turbine », ann. rev. fluid. mech. 1983, 15, pp. 77-96.
- [Zol 97] : M. R. Zoldghadri, «Contrôle direct de couple des actionneurs asynchrone », Thèse doctorat de l'institut nationale polytechnique de Grenoble, France, 1997.
- Université de Batna, Algérie, 2004.

**Sites web**

[win.dk12] : site: [www.windpower.dk](http://www.windpower.dk) – site web sur l'énergie éolienne au danemark, consulté avril 2012.

[win.or12] : site internet de l'association danoise de l'industrie éolienne, "<http://www.windpower.org/fr/core.htm>", consulté avril 2012.

[lar 12] : site: [www.lares-et-penates.fr](http://www.lares-et-penates.fr) – « lares et penates, energie renouvelable», consulté avril 2012.