

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

# MEMOIRE DE FIN CYCLE

En vue de l'obtention du diplôme master

Spécialité : Électrotechnique

Option : Energies Renouvelables

**Thème :**

**Commande non linéaire d'une génératrice  
asynchrone à double alimentation en  
fonctionnement autonome**

Présenté par :

**LATBI Yamina**

**MANSOUR Souad**

Promoteurs :

**K. IDJDARENE**

**S. TAMALOUZT**

**Année universitaire 2012/2013**

# REMERCIEMENT

*Remerciements à dieu- le tout puissant- qui nous a aidé  
à réaliser ce modeste travail.*

*Nous tenons à remercier nos deux promoteurs Mr K. Idjdarene et  
Mr S.Tamalouzt d'avoir accepté de nous encadrer et de nous suivre  
durant toute cette période.*

*Nos remerciements vont aussi au président et aux membres du jury qui  
nous fait l'honneur de participer au jury  
de ce travail.*

*Et enfin nous remercions l'ensemble, enseignants et collègues de notre  
promotion, qui nous ont aidé à réaliser ce modeste travail.*

*SOUAD/YAMINA*

# DEDICACES

*Je dédie ce modeste travail :*

*À mes très chère parents.*

*À mes grandes mères.*

*À mes frères : Mourad, Mouhand et Chafaa.*

*À mes sœurs : Sabrina, Lynda, Lila et Sonia.*

*À mon mari Faouzi et sa familles.*

*À mon binôme Yamina et sa familles.*

*À tous mes cousin(e) s.*

*À tous mes ami(e) en particulier : Yamina, Samir, Lynda, Karima, Sonia,  
Dehia, Kaissa, Billal et Salim.*

*À toute la promotion 2013 en particulier l'option énergies  
renouvelables.*

SOUAD

*Je dédie ce modeste travail :*

*A Ma chère maman.*

*À mes frères : Karim, Omar et Mouhamed.*

*À mes sœurs : Fatiha et Nabila.*

*À mon binôme Souad et sa familles.*

*À tous mes cousin(e) s.*

*À tous mes ami(e) en particulier : Toufik, Souad, Samia, Samir, Lynda,  
Karima, Sonia, Dehia, Kaissa, Billal et Salim*

*À toute la promotion 2013 en particulier l'option énergies renouvelables.*

YAMINA

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

## **Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne**

I.1.Introduction.....	3
I.2. Principe de conversion de l'énergie éolienne.....	3
I.2.1. Avantages de l'énergie éolienne.....	4
I.2.2. Inconvénients de l'énergie éolienne .....	4
I.3. Différents types d'éoliennes.....	4
I.3.1. Eolienne à axe vertical.....	4
I.3.2. Eoliennes à axe horizontal.....	5
I.3.3. Constitution d'une éolienne à axe horizontal.....	6
I.4. Systèmes de régulation.....	7
I.5. Mode de fonctionnement des éoliennes.....	8
I.5.1. Fonctionnement à vitesse fixe.....	8
I.5.2. Fonctionnement à vitesse variable.....	8
I.6. Zone de fonctionnement d'une éolienne.....	8
I.7. Eoliennes connectées au réseau électrique.....	9
I.7.1. Machine asynchrone à cage.....	9
I.7.2 Machine asynchrone à double alimentation.....	10
I.7.3. Machine synchrone.....	11
I.8. Eoliennes en fonctionnement isolé et autonome.....	12
I.8.1. Machines synchrones.....	12
I.8.2. Machines Asynchrones.....	13
Conclusion .....	17

## **Chapitre II : Modélisation de la chaîne éolienne**

II.1 Introduction.....	18
II.2 Schéma de la structure choisie.....	18
II.3. Modélisation de la partie mécanique.....	19
II.3.1. Modèle du vent.....	19
II.3.2. Modélisation de la turbine éolienne.....	19
II.3.3. Modèle du multiplicateur.....	20
II.3.4. Modélisation de l'arbre de transmission.....	20
II.4. La modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.....	21

II.4.1. Modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation.....	21
II.4.2. Transformation de Park.....	24
II.4.3. Choix du référentiel.....	27
II.4.3.1. Référentiel lie au rotor.....	27
II.4.3.2. Référentiel lie au stator.....	27
II.4.3.3. Référentiel lie au champ tournant.....	28
II.5. Fonctionnement de la MADA dans les quatre quadrants.....	28
II.6. Modélisation du convertisseur de puissance.....	29
II.6.1. Redresseur.....	29
II.6.2. L'onduleur.....	30
II.6.3. Modélisation du bus continue.....	31
II.7. Modélisation de convertisseur (DC/DC) abaisseur – élévateur.....	32
II.7.1. Fonction de transfert de convertisseur DC /DC abaisseur –élévateur.....	33
II.7.2. Asservissement de la tension.....	33
II.8. Le modèle électrique simple de la batterie RC.....	34
Conclusion.....	35

### **Chapitre III : Commande de la chaîne éolienne**

III.I. Introduction.....	36
III.2. Principe générale sur la DTC.....	36
III.3. partitionnement algorithmique de la commande.....	37
III.4. Fonctionnement et séquences d'un onduleur de tension.....	37
III.5. Règle du comportement des grandeurs à contrôler (flux, couple).....	39
III.5.1. Réglage de comportement du flux rotorique.....	39
III.5.2. Sélection du vecteur de tension.....	41
III.6. Estimateurs.....	42
III.6.1. Estimateur du flux rotorique.....	42
III.6.2. Estimation du couple électromagnétique.....	43
III.7. Elaboration du vecteur de commande.....	43
III.7.1 Correcteur du flux.....	43
III.7.2. Le correcteur du couple.....	44
III.8. Elaboration de la table de commande.....	45
III.9. simulation de la chaine de conversion éolienne proposée.....	45
Conclusion.....	47

---

**Chapitre IV: Simulation et Interprétation**

IV.1 Introduction.....	48
IV.2 Résultat de simulation.....	48
Conclusion.....	64
Conclusion générale.....	65
Références bibliographie .....	66

---

## Listes des figures

### Chapitre I

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

**Fig. I.2** Eolienne à axe vertical

**Fig. I.3** Eolienne à axe horizontal

**Fig. I.4** Eléments constituant une éolienne

**Fig. I.5** Schéma d'éoliennes à axe horizontal monopole, bipale et tripale

**Fig. I.6** Zone de fonctionnement d'une éolienne

**Fig. I.7** Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse variable

**Fig. I.8** Système éolien basé sur la MADA à vitesse variable.

**Fig. I.9** Système éolien basé sur une machine synchrone à aimants permanents à vitesse variable.

**Fig. I.10** Machine asynchrone auto – excitée avec une batterie de condensateurs.

**Fig. I.11** Schéma de principe de la double alimentation.

**Fig. I.12** Système hybride de génération d'énergie électrique (Hydroélectrique et Photovoltaïque).

**Fig. I.13** Aérogénérateur autonome basé sur une GADA sans système de stockage

**Fig. I.14** Système proposé (Aérogénérateur autonome basé sur une GADA) associé à un système de stockage (Batterie)

### .Chapitre II

**Fig. II.1** Schéma présentatif de système proposé

**Fig. II.2** représentation schématique de la MADA

**Fig. II.3** Génératrice asynchrones à double alimentation [axe réel et axe (d, q)]

**Fig. II.4** Mode opérationnels caractéristique de la MADA

**Fig. II.5** Redresseur et onduleur MLI

**Fig. II.6** Redresseur MLI

**Fig. II.7** Onduleur MLI

**Fig. II.8** Courant circulant dans le bus continu

**Fig. II.9** Convertisseur abaisseur élévateur

**Fig. II.10** Fonctionnel de la boucle de tension

**Fig. II.11** Modèle R-C de la batterie

### Chapitre III

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

**Fig. III.2** Principe du contrôle du flux rotorique

**Fig. III.3** Illustration de la composante de couple et du flux lors de la variation du vecteur flux

**Fig. III.4** Sélection du vecteur tension

**Fig. III.5** (a) : Sélection des vecteurs tensions correspondantes au contrôle de l'amplitude  $\phi_r$  .  
(b) : Contrôleur à hystérésis à deux niveaux.

**Fig. III. 6** Evolution du couple en utilisant un correcteur à hystérésis à trois niveaux

**Fig. III .7** Schéma structurel de commande du système éolien global

### Chapitre IV

**Fig. IV.1** Vitesse de vent

**Fig. IV.2** L'allure de glissement

**Fig. IV.3** Courant d'une phase rotorique

**Fig. IV.4** (a) : Trajectoire du flux rotorique estimé

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

**Fig. IV.5** L'allure temporaire de des flux rotorique et leur zoom dans le repère (d, q)

**Fig. IV.6** Couple électromagnétique

**Fig. IV.7** Tension d'une phase de la charge

**Fig. IV.8** Courant d'une phase d'une phase

**Fig. IV.9** Tension redressée

**Fig. IV.10** L'allure de la tension et le courant rotorique

**Fig. IV.11** Les allures des puissances misent en jeu dans le système proposé

**Fig. IV.12** Tension de la batterie

**Fig. IV.13** Vitesse de vent

**Fig. IV.14** Couple électromagnétique

**Fig. IV.15** Trajectoire du flux rotorique estimé

**Fig. IV.16** Courant d'une phase de la charge

**Fig. IV.17** Allure de tension de la charge

**Fig. IV.18** Allure de la tension redressée

**Fig. IV.19** L'allure d la tension aux bornes de la batterie de stockage

**Fig. IV.20** Les allures des puissances misent en jeu dans le système proposé

**Fig. IV.21** Allure de courant de phase

**Fig. IV.22** Allure de la tension redressée

**Fig. IV.23** Courant d'une phase de la charge

**Fig. IV.24** Allure de tension de la charge

**Fig. IV.25** Les allures des puissances mises en jeu dans le système proposé

**Fig. IV.26** Allure de tension de la batterie

**Fig. IV.27** Courant d'une phase de la charge

**Fig. IV.28** Tension d'une phase de la charge

**Fig. IV.29** Allure de la tension redressée

**Fig. IV.30** Les allures des puissances mises en jeu dans le système proposé

**Fig. IV.31** Allure de tension de la batterie

## Notations

## Indices

$P_v$	Puissance de vent ou puissance éolienne [W]
$P_t$	Puissance aérodynamique ou la turbine éolienne [W]
$C_{aero}$	Couple aérodynamique ou la turbine éolienne [N.m]
$\Omega$	Vitesse de rotation de l'éolienne [rad /s]
$R$	Rayon des pales de l'éolienne [m]
$S$	Surface balayée par l'éolienne [m <sup>2</sup> ]
$V_{vent}$	Vitesse de vent [m/s]
$\rho$	Masse volumique de l'air (1.25 Kg /m <sup>3</sup> )
$C_p$	Coefficient de puissance
$\lambda$	Rapport de la vitesse en bout des pâles
$G$	Gain du multiplicateur de vitesse
$C_g$	Couple de multiplicateur de vitesse
$\Omega_{turbine}$	Vitesse de rotation de la turbine [rad/s]
$\beta$	Angle d'orientation des pales [rad]
$J_{turbines}$	Moment d'inertie de la turbine [kg .m <sup>2</sup> ]
$J$	Moment d'inertie total de transmission
$\Omega_{méc}$	Vitesse mécanique de la génératrice [rad/s]
$C_{arbre}$	Couple transmit à la génératrice [N.m]
$C_{em}$	Couple électromagnétique [N.m]
$C_{vis}$	Couple des frottements visqueux [N.m]
$f$	Coefficient de frottement visqueux [N.m.s/rad]
$P$	Nombre de paire de Pôles de la machine
$V_d$	La vitesse de démarrage, à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de la puissance [m /s]
$V_m$	La vitesse maximale du vent, pour laquelle la turbine doit s'arrêter, pour des raisons de sécurité [m/s]
$V_n$	La vitesse nominale à partir de laquelle l'éolienne est en pleine production [m/s]
$I_{sabc}$	Courant statorique sur les axes (a, b, c) [A]
$I_{rabc}$	Courant rotorique sur les axes (a, b, c) [A]
$V_{sabc}$	Tension statorique sur les axes (a, b, c) [V]

$V_{rabc}$	Tension rotorique sur les axes (a, b, c) [V]
$P_s$	Puissance active statorique [W] ;
$Q_s$	Puissance réactive statorique [VAR] ;
$P_r$	Puissance active rotorique [W] ;
$Q_r$	Puissance réactive rotorique [VAR] ;
$g$	Glissement de la génératrice.
$R_s$	Résistance d'une phase statorique [ $\Omega$ ].
$R_r$	Résistance d'une phase rotorique [ $\Omega$ ].
$\phi_{sd}$	Flux statorique d'axe directe [Wb].
$\phi_{sq}$	Flux statorique d'axe en quadrature [Wb].
$\phi_{rd}$	Flux rotorique d'axe directe [Wb].
$\phi_{rq}$	Flux rotorique d'axe en quadrature [Wb].
$\phi_{sabc}$	Flux statorique sur les axes ( a ,b, c ) [Wb]
$\phi_{rabc}$	Flux rotorique sur les axes ( a ,b, c ) [Wb]
$V_{sd}$	Tension statorique d'axe directe [V].
$V_{sq}$	Tension statorique d'axe en quadrature [V].
$V_{rd}$	Tension rotorique d'axe directe [V].
$V_{rq}$	Tension rotorique d'axe en quadrature [V].
$\omega_s$	Pulsation statorique [rd/s].
$\omega_r$	Pulsation rotorique [rd/s].
$\omega$	Pulsation mécanique de la génératrice [rd/s].
$\Omega$	Vitesse électrique de la machine [rd/s].
$P$	Nombre de paires de pôles de la génératrice.
$L_s, L_r$	Inductance cyclique statorique et rotorique [H].
$M_{sr}$	Inductance mutuelle entre le stator et le rotor de la machine [H].
$I_{sd}$	Courant statorique d'axe directe [A].
$I_{sq}$	Courant statorique d'axe en quadrature [A].
$I_{rd}$	Courant rotorique d'axe directe [A].
$I_{rq}$	Courant rotorique d'axe en quadrature [A].
$\theta_r$	Angle relatif entre la première phase rotorique de la machine et l'axe « d » du repère de Park [rad].
$\theta_s$	Angle relatif entre la première phase statorique de la machine et l'axe « q » du repère de Park [rad /s].
$\theta$	Angle électrique de la machine [rad].

$F_1, F_2, F_3$	Fonctions logiques correspondantes à l'état de l'interrupteur de redresseur
$V_{dc}$	Tension redressée [V]
$i_{dc}$	Courant redressé [A]
$I_a, I_b, I_c$	Courants du coté génératrice [A].
$i_c$	Courants capacité [A].
$i_{ond}$	Courant d'entrée à coté de l'onduleur [A].
$C$	Capacité du bus continu [F].
$R_b$	Résistance de la batterie [ $\Omega$ ].
$C_{bat}$	Capacité de la batterie [F]
$V_{bat}$	Tension de la batterie [V]
$V_{sourtie}$	Tension de sortie de convertisseur Buck –boost[V]
$V_{ref-dc}$	Tension continue de référence [V]
$V_{entré}$	Tension d'entrée de convertisseur [V]
$I_{bat}$	Courant de la batterie [A]
$I_L$	Courant de l'inductance de Buck- boost [A]
$V_{on1}, V_{on2}, V_{on3}$	Tensions simples d'onduleur [V]
$V_a, V_b, V_c$	Tensions d'alimentation des enroulements statosique [V]
$\alpha$	Rapport cyclique de Buck- boost
$R$	Resistance de Buck- boost [ $\Omega$ ].
$E_0$	La force électromotrice de la batterie [V]
$\alpha_r$	L'angle entre le référentielle statorique et le vecteur flux $\phi_r$ .
$\phi_{r-ref}$	Flux rotorique de référence [Wb]
$C_{em-ref}$	Couple électromagnétique de référence [N.m]
$N$	Nombre de la zone de position du flux statorique
$C_{flx}$	Grandeur de sortie du contrôleur de flux
$C_{cpt}$	Grandeur de sortie du contrôleur de flux
$\Delta C_{em}$	Ecart d'hystérésis du contrôleur de couple

## Introduction générale

La filière éolienne est largement reconnue aujourd'hui pour sa capacité de concilier tant les intérêts économiques qu'environnementaux. En effet, comparativement aux filières dominantes et traditionnelles de production d'électricité, ses avantages environnementales sont indéniables : l'énergie de source éolienne n'émet aucun polluant dans l'air, ne contribue pas aux phénomènes des changements climatiques globaux, ne requiert pas l'inondation d'écosystèmes et la pollution aquatique afférente et modifie ni le cours ni le débit des rivières naturelles. Tel que l'énergie solaire, thermique ou photovoltaïque, la filière éolienne peut généralement être reproduite à un coût largement inférieur.

Pour ces raisons, la poursuite du développement de l'énergie éolienne est souvent perçue comme étant un excellent exemple du développement durable dans le secteur énergétique. Pour cela, un nombre croissant de pays et des régions adoptent des lois, règlements ou politiques visant directement ou indirectement le développement accru de cette filière de sorte que l'énergie éolienne occupe une place importante sur le marché mondiale de l'énergie [Dun 98].

Les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable. Ce qui permet d'augmenter le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe. Ce sont des algorithmes de commande qui permettent de contrôler la vitesse de rotation des éoliennes à chaque instant [El-Aim 04].

L'énergie éolienne est la source d'énergie renouvelable la plus fiable : une éolienne a un taux de disponibilité matérielle de plus de 98%. A lui seul, ce facteur de disponibilité se situe bien au-delà des autres moyens de production d'électricité ; néanmoins, il faut tenir compte du facteur de disponibilité global qui, lui dépend fortement du vent mais également de la consommation.

Une grande partie des éoliennes installées de nos jours sont équipées de machines asynchrones à double alimentation (MADA). Cette génératrice permet la production d'électricité à vitesse variable, ceci permet alors de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions du vent. Ces éoliennes sont aussi équipées d'hélice à angle de calage de pale variable pour s'adapter aux conditions du vent. L'ensemble de l'éolienne est contrôlé de manière à maximiser en permanence la puissance produite en recherchant le point de fonctionnement à puissance maximum communément appelé MPPT [Boy 06].

Le principe du contrôle direct du couple (CDC) consiste à partir des références externes, tel que le couple et le flux, à rechercher le meilleur état de commande de l'onduleur pour satisfaire les exigences de l'utilisateur.

La commande CDC considère le convertisseur associé à la machine, comme un ensemble où le vecteur de commande est constitué par les états de commutation. La recherche de l'état de commutation le plus adapté à un instant de calcul reposant sur une heuristique est considéré **[Annex 08]**.

Pour réaliser ce travail, nous l'avons subdivisé en quatre chapitres. Dans le premier, nous exposerons quelques généralités sur l'énergie éolienne.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation de la partie mécanique de la chaîne éolienne ainsi que la partie électrique, la génératrice asynchrone à double alimentation, le redresseur et l'onduleur de tension utilisé pour la commande, le convertisseur buck-boost (abaisseur, élévateur) et la batterie pour le système de stockage.

Le traitement de la commande de la chaîne éolienne par la technique du contrôle direct de couple (CDC), et la commande du système de stockage seront présentés dans le troisième chapitre.

Le dernier chapitre sera consacré à la présentation et aux commentaires des résultats de simulation du système proposé.

Une conclusion générale et des perspectives seront données à la fin de ce mémoire pour une continuation éventuelle du présent travail.

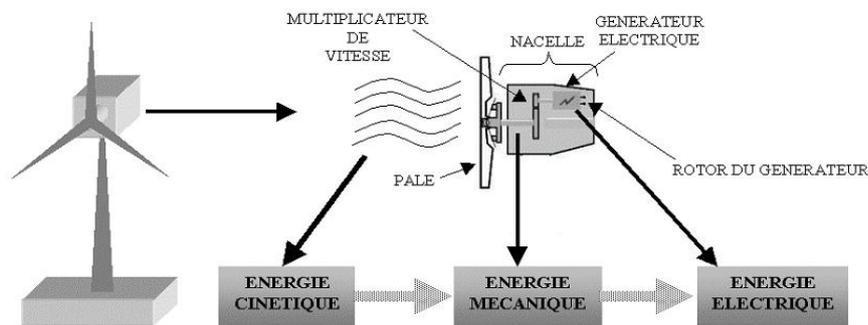
## I.1. Introduction

Le soleil, l'eau, le vent, le bois et les autres produits végétaux sont autant des ressources naturelles capables de générer de l'énergie grâce aux technologies développées par les hommes. Leur relatif faible impact sur l'environnement en fait des énergies d'avenir face au problème de la gestion des déchets du nucléaire et aux émissions de gaz à effet de serre.

Les énergies renouvelables représentent par ailleurs une chance pour plus de milliards de personnes isolées d'accéder enfin à l'électricité. Ces atouts, alliés à des technologies de plus en plus performantes, favorisent le développement des énergies renouvelables tel que : l'énergie éolienne qui utilise le vent pour produire de l'électricité et répond à la fois au besoin croissants d'énergies et la lutte contre l'effet de serre.

## I.2. Principe de conversion de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus couramment appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.



**Fig. I. 1** Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

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 pâles 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.2.1. Avantages de l'énergie éolienne

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles.
- L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres d'énergie qui ont causé un changement radical de climat par la production énorme et directe du  $CO_2$ .
- L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire.

### I.2.2. Inconvénients de l'énergie éolienne

- Le bruit : en effet la population habitant près des sites éoliens déplore le bruit due à L'aérodynamisme de l'aérogénérateur, les éoliennes installées actuellement produisent un son de 55 décibel à leur pieds [Khe 07], en plus des flashes émis en haut du mât pour la visibilité pour les pilotes aériens ce qui perturbe la tranquillité de la campagne ;
- Plus le parc éolien est dense plus de risquent sont densent pour les oiseaux migrateurs ou ils se font tuer par les pâles des éoliennes ;
- La puissance fournie n'est pas constante. Etant l'énergie du vent n'est pas stable (stochastique). Ce qui peut perturber l'alimentation du réseau ;
- Le gisement éolien en milieu urbain est fortement limité par une rugosité (irrégularité) aérodynamique forte ; Le rendement d'une installation qui n'est pas placé à une hauteur importante est médiocre ;
- Les matériaux nécessaire à la fabrication des différents éléments (nacelle, mât, pâles et multiplicateur de vitesse notamment) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux (chères).

### I.3. Différents types d'éoliennes

Selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice, les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et à axe horizontal.

#### I.3.1. Eolienne à axe vertical [Idj 10].

Cette technologie 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 de vitesse pour des vents forts et un niveau sonore très faible voir inaudible.

Il existe principalement technologies trois 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], la figure (I.2) présente l'éolienne à axe vertical.



**Fig. I.2** Eolienne à axe vertical [Ber 02]

Outre le caractère vertical de leur axe de rotation, ces aérogénérateurs peuvent être classés selon leur principe de fonctionnement aérodynamique. Ainsi, contrairement aux éoliennes à axe horizontal qui utilisent uniquement la force de portance, les éoliennes à axe vertical de type Savonius utilisent la force de trainée et celles de type Darrieus reposent sur l'effet de portance subi par un profil soumis à l'action d'un vent relatif ; cet effet est similaire aux forces qui s'exercent sur l'aile d'un avion.

### **I.3.2. Eoliennes à axe horizontal**

Les turbines à axe horizontal sont de loin les plus utilisées. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à deux, trois ou plusieurs pâles [Mir 05]. Toutefois, les structures les plus courantes sont à trois pâles. Une éolienne à axe horizontal est constituée d'une hélice perpendiculaire au vent montée sur un mat dont les pâles sont profilées aérodynamiquement à la manière d'une aile d'avion. Par conséquent, ce type de turbines doit toujours être orienté face au vent [Lec 04]. Par comparaison à la turbine à axe vertical, pour la même vitesse de vent, les éoliennes à axe horizontal sont capables de produire plus d'énergie grâce à un meilleur coefficient de puissance. Par ailleurs, elles ont un coût moindre et une efficacité accrue due à leur position à plusieurs dizaines de mètres du sol [Poi 03].



**Fig. I.3** Eolienne à axe horizontal [Iva 04]

➤ **Avantages [Poi 03]**

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

➤ **Inconvénients [Abd 07]**

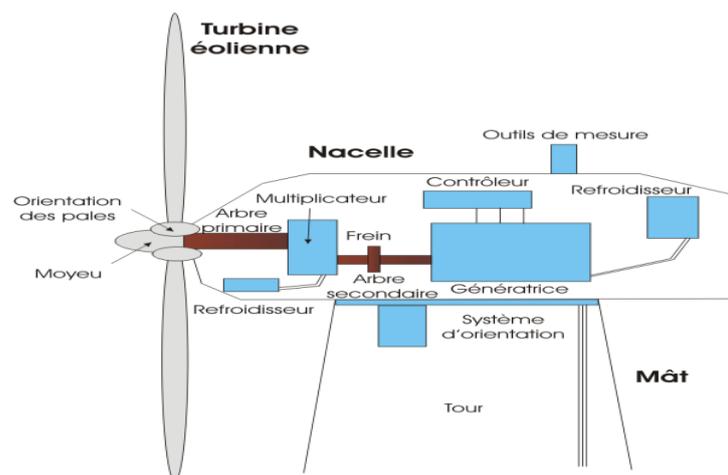
- ✓ Bruit conséquent ;
- ✓ Vibrations non négligeables ;
- ✓ Grande sensibilité au flux éolien et sa variation.

### I.3.3. Constitution d'une éolienne à axe horizontal

Les différents composants d'une éolienne à axe horizontal sont représentés sur la figure (I.4)

En général, l'éolienne à axe horizontal est constituée de trois éléments principaux : La tour (mat), la nacelle et les pâles qui sont supportées par le moyeu [Ham 08].

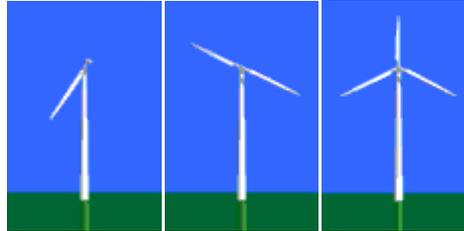
**Le mât :** le mât ou le tour : généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique sa forme est conique pour augmenter la rigidité tout en minimisant le poids de la structure .A l'intérieur, sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôles, l'appareillage de connexion au réseau de distribution ainsi que l'échelle d'accès à la nacelle. Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor et nacelle pour éviter que les pâles ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante pour éviter les perturbations près du sol.



**Fig. I.4** Eléments constituant une éolienne [Rob 13]

**La nacelle :** regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.

**Les pâles :** Elles sont généralement réalisées dans un mélange de fibres de verre et de matériaux composites. Elles ont pour rôle de capter l'énergie du vent et de la transférer ensuite au rotor. Le nombre des pâles peut varier suivant les éoliennes. Actuellement, le système tripale est le plus utilisé car il permet de limiter les vibrations, le bruit et la fatigue du rotor par rapport à un système bipale ou monopale et d'améliorer le coefficient de puissance.



**Fig. I.5** Schéma d'éoliennes à axe horizontal monopale bipale et tripale [Win 13]

**Moyeu :** En générale c'est une pièce d'acier moulé, il reçoit les pâles sur des brides normalisés et se monte sur l'arbre lent d'entrée du multiplicateur. 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].

#### I.4. Systèmes de régulation

Les trois systèmes de régulation existant :

- La régulation active par vérins hydrauliques, dite aussi "**pitch control**", consiste à faire varier l'angle de calage des pâles 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.
- Un dernier 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. Ce système est dit à régulation active par décrochage aérodynamique, "**active stall**" on l'utilise pour les éoliennes de fortes puissances [Idj 10].

## I.5. Mode de fonctionnement des éoliennes

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une influence sur son fonctionnement, le fait qu'une éolienne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration.

Les avantages principaux des deux types de fonctionnement sont les suivants [Cam 03] :

### I.5.1. 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 électrique de commande ;
- Moins cher.

### I.5.2. Fonctionnement à vitesse variable

- Augmentation du rendement énergétique ;
- Réduction des oscillations du couple ;
- Réduction des efforts subis par le convertisseur de puissance ;
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

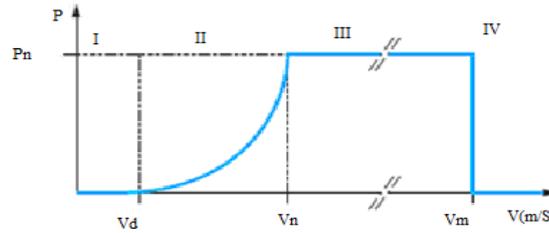
Les deux types de machine électrique les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes [Ack 02].

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.6. Zone de fonctionnement d'une éolienne [Iva 04]

Les objectifs de la régulation de l'éolienne sont d'assurer sa sécurité pour les vents forts et de limiter sa puissance. Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance nominale  $p_n$  qui est obtenue à partir de vitesse de vent  $V_n$ . Lorsque la vitesse du vent est supérieure à  $V_n$ , un système de freinage se met en marche afin d'éviter la destruction mécanique, de sorte sa vitesse de rotation reste pratiquement constante.

La figure suivante illustre les différentes zones de fonctionnement d'une éolienne :



**Fig. I.6** Zone de fonctionnement d'une éolienne

Avec :

- $V_d$  : la vitesse de démarrage, à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de la puissance.
- $V_m$  : la vitesse maximale du vent, pour laquelle la turbine doit s'arrêter, pour des raisons de sécurité.
- $V_n$  : la vitesse nominale à partir de laquelle l'éolienne est en pleine production.

Les vitesses  $V_d$  ;  $V_n$  ;  $V_m$  définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent :

- **Zone I** : la puissance est nulle (la turbine ne fonctionne pas)
- **Zone II** : dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent  $V$ .
- **Zone III** : La vitesse de rotation est maintenue constante et la puissance fournie reste égale à  $P_n$ .
- **Zone IV** : dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

## I.7. Eoliennes connectées au réseau électrique

On peut évaluer deux types d'éoliennes raccordées sur les 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. Machine asynchrone à cage

La machine asynchrone à cage peut être utilisée en fonctionnement à vitesse variable en introduisant un variateur de fréquence comme il est montré sur la fig (I.7) [El-Aim 02].

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.

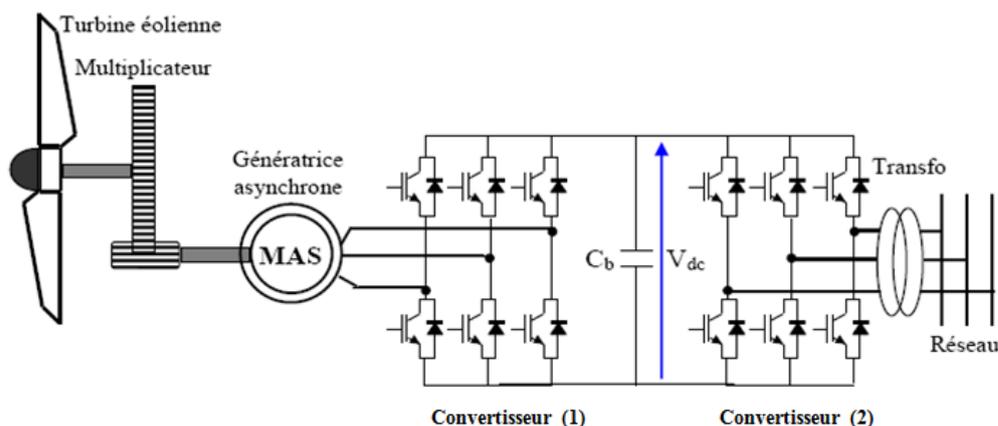


Fig. I.7 Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse variable

[Idj 10].

### I.7.2 Machine asynchrone à double alimentation

Avec les machines synchrones, c'est actuellement l'une des deux solutions concurrentes en éolien à vitesse variable. La machine asynchrone à double alimentation (MADA) à rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones à cage et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants, ce qui diminue légèrement leur robustesse.

Une des solutions très intéressante dans le domaine de la conversion de l'énergie éolienne consiste à coupler le rotor de la génératrice à double alimentation au réseau électrique à travers deux convertisseur MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en mode onduleur fig (I.10) [Abd 07].

Le surcoût engendré par la présence de bobinages au rotor est compensé par l'économie réalisée sur le convertisseur. En général, le dimensionnement de la chaîne se limite à 30% de la puissance nominale du stator de la machine électrique, ce qui suffit à assurer une variation sur 30% de la plage de vitesse se qui constitue 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].

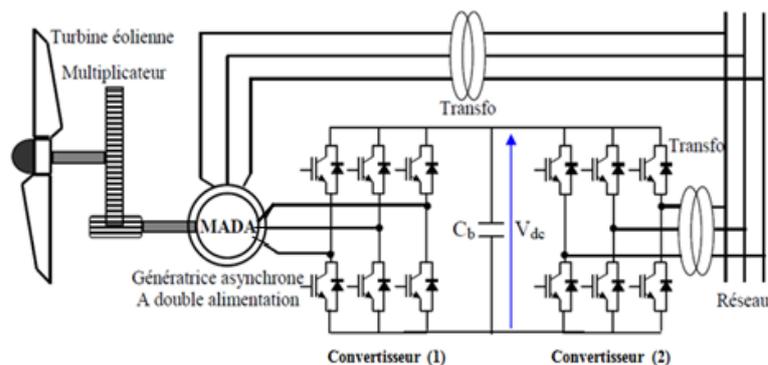


Fig. I. 10 Système éolien basé sur la MADA à vitesse variable.

### I.7.3. Machine synchrone

Les machines asynchrones sont bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple limité, insuffisant pour un couplage mécanique direct sur les voilures éoliennes. La présence d'un multiplicateur de vitesse est donc indispensable. En revanche, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à des dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes (lorsqu'elles ont un très grand nombre de pôles) [Mir 05].

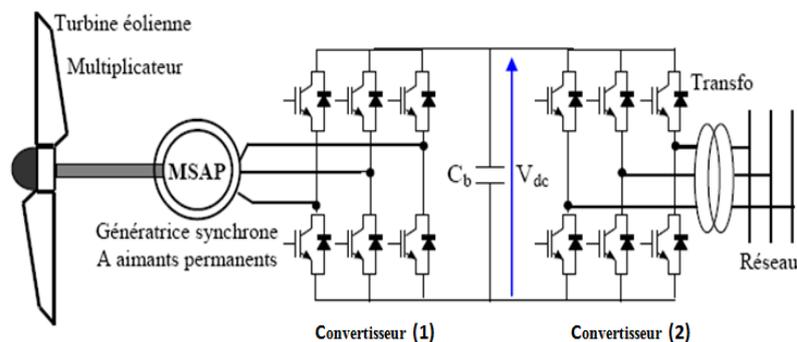
Par ailleurs, il est difficile de les munir de plusieurs paires de pôles [Dav 07]. Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents et à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables.

La solution la plus intéressante consiste à coupler le stator de la génératrice synchrone à aimants permanents à travers deux convertisseurs à MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en mode onduleur figure (I.9). 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 [Dav 07].

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 transitée

autorisant ainsi un fonctionnement en commande à poursuite du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking 'MPPT') [Abd 07].



**Fig. I.9** Système éolien basé sur une machine synchrone à Aimants permanents à vitesse variable [Idj 10].

### I.8. Eoliennes 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, conjugués aux incitations gouvernementales, 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].

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.8.1. Machine synchrones [Mek 04]

Les machines synchrones sont connues pour offrir des couples massifs importants pour des dimensions géométriques convenables. Elles peuvent ainsi être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes (sans multiplicateur mécanique)

## A. Machines à reluctance variable

Quelques travaux ont également concerné l'utilisation de la machine synchrone à réluctance variable pour des applications en conversion d'énergie éolienne [**Cam 03**].

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

Le fonctionnement générateur de cette structure est très proche de celui d'une machine asynchrone à cage. Par conséquent, elle peut être utilisée en autonome débitant sur un banc de capacités en parallèle à la charge ou encore sur un redresseur à MLI [**Tou 99**].

## B. Machines synchrones à rotor bobiné

Ce type des machines font appel, le plus souvent, à une excitation au niveau du rotor ce qui le rendent généralement non utilisées dans les systèmes éoliens autonomes et isolé [**Mek 04**].

## C. Machines synchrones à aimants permanents

La machine synchrone à aimants permanents est une solution très intéressante dans les applications éoliennes isolées et autonomes vu ses avantages cités précédemment (un bon rendement et un bon couple massique) et la non nécessité d'une source d'alimentation pour le circuit d'excitation [**Idj 10**].

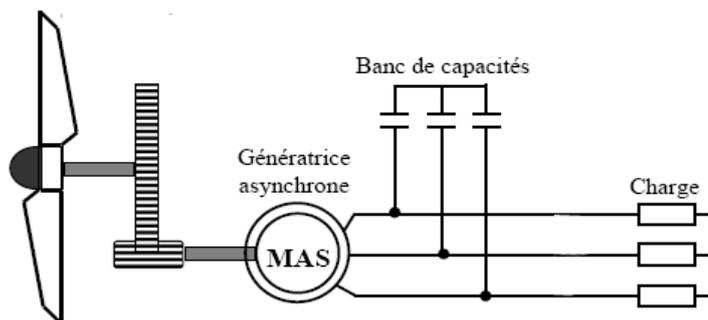
### I. 8.2. Machines asynchrones

Le générateur asynchrone est largement utilisé dans les turbines éoliennes isolées de moyenne et grande puissance en raison de sa simplicité mécanique et son coût réduit.

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

Grâce aux nombreux avantages qu'elle a par rapport aux autres types des machines électriques (robustesse, maintenance, prix), la machine asynchrone à cage d'écureuil est intéressante pour l'utilisation comme génératrice couplée à une turbine éolienne [**Pen 01**]. La demande de puissance réactive est compensée par la connexion d'un groupe de condensateurs en parallèle avec le générateur, Fig (I.12), ou par la mise en œuvre d'un convertisseur statique de puissance. 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

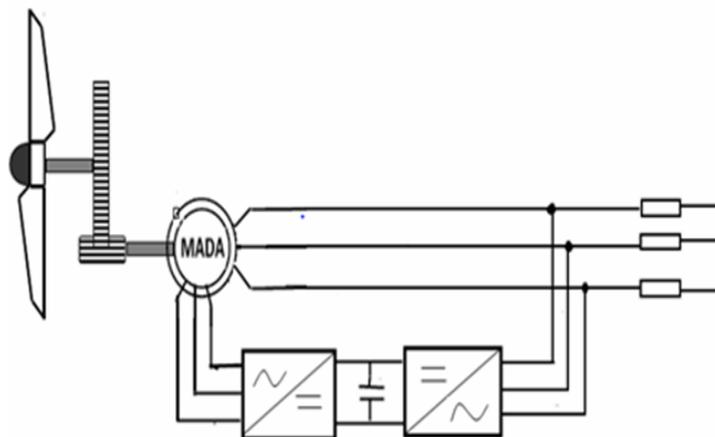
lors de variations de charge ou de vitesse du vent. Pour surmonter cet inconvénient, tout en gardant un banc de capacités d'auto excitation.



**Fig. I.10** Machine asynchrone auto – excitée avec une batterie de condensateurs.

## B. Machines à double alimentation

Une des configurations en forte croissance dans le marché des turbines éoliennes d'une manière générale et en particulier dans les systèmes isolés est connue sous le nom de générateur asynchrone doublement alimenté (GADA). 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, Fig (I.11). L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil 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 [Idj 10].

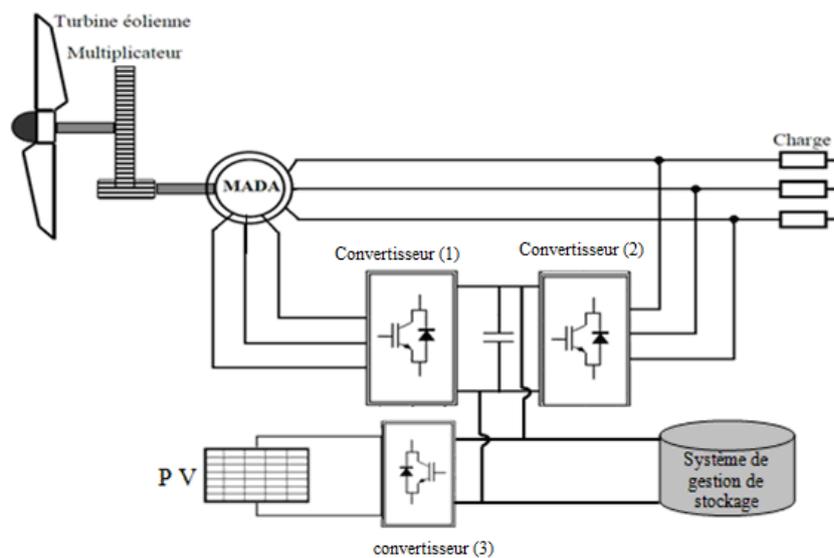


**Fig. I.11** Schéma de principe de la Machine double alimentation.

Le système (éolienne basé sur la GADA en fonctionnement autonome) n'est pas vraiment cité dans la littérature comme le cas des deux machines présentées (GAS et GSAP). Néanmoins on peut trouver plusieurs références dont on cite ;[Rob 06] et [Gal 06], fig (I.13). La référence [Rob 06] a traité le cas d'une commande vectorielle appliquée à la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) sans capteur de vitesse ou de position, où il a utilisé un estimateur adaptative

avec modèle de référence, dont il estime la vitesse de rotation et de position du rotor en fonction des courant rotorique ; par contre, [Gal 06] a proposé une commande en mode glissant appliquée à une génératrice asynchrone à double alimentation dédiée à une éolienne à vitesse variable, alimentant une charge isolée (autonome) qui fonctionne à fréquence constante.

Le travail élaboré par [Den 06] est l'étude d'un système hybride (hydroélectrique à vitesse variable - solaire) autonome destiné à alimenter une charge (RLC) autonome, fig (I.12) son principe est d'extraire le maximum d'énergie, par rapport aux panneaux solaire ainsi que l'hydroélectrique, en leurs appliquant la MPPT, et de contrôler le système global en se basant sur la commande de bus continu.



**Fig. I.12** Système hybride de génération d'énergie électrique (Hydroélectrique et Photovoltaïque).

En se basant sur cette description on dit qu'un système de génération autonome peut être décomposé en deux types :

#### a. Système de génération autonome sans stockage :

La puissance produite dépend de la puissance de charge ( $P_{ch} = P_{pro}$ ) ce qui implique que le fonctionnement ne sera pas optimale.

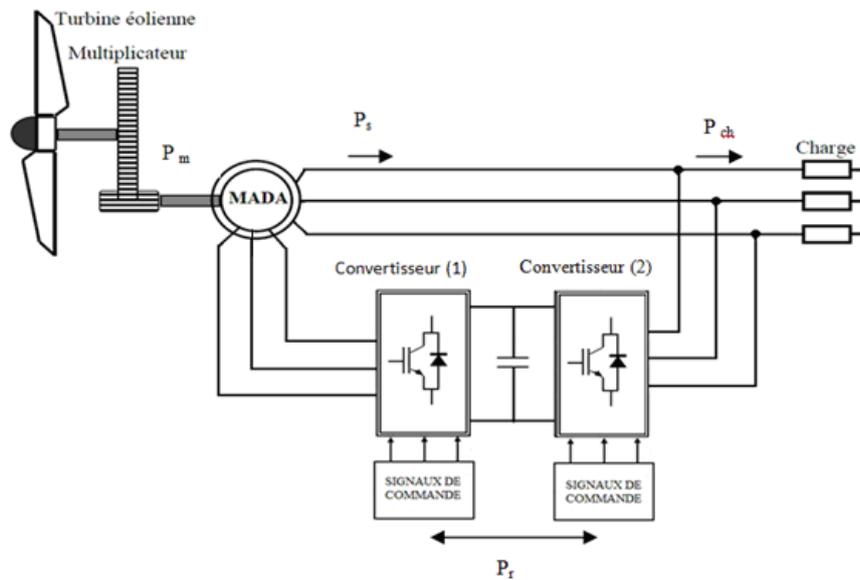


Figure. I .13 Aérogénérateur autonome basé sur une GADA sans système de stockage

**b. Système de génération autonome avec stockage**

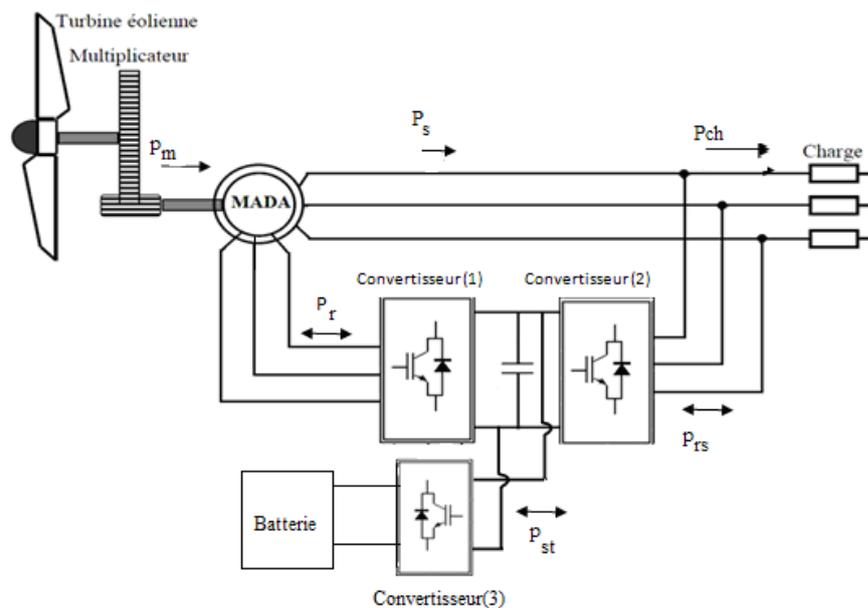


Figure I.14 Système proposé (Aérogénérateur autonome basé sur une GADA) associé à un système de stockage (Batterie).

Pour remédier au problème posé dans le cas précédent un système de stockage est associé à ce générateur pour que la puissance produite ne dépendra pas de la puissance de charge mais de celle délivrée par l'algorithme MPPT, Fig (I.14).

Notre système est basé sur le schéma représenté sur la Fig (I.14) qui se résume en un générateur asynchrone à double alimentation connecté à une charge équilibrée, caractérisée par une tension et une fréquence de fonctionnement fixes, ce qui nous orienterons sur la commande à

utiliser pour le contrôle de l'énergie débitée par l'éolienne, en agissant sur les deux convertisseurs connectés au rotor de la génératrice associé à une batterie de stockage d'énergie électrique.

**Conclusion**

Dans cette partie une synthèse bibliographique a été présentée concernant les différents types d'éoliens avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnements. Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, puis les machines électriques et leurs utilisation dans le cas de connexion au réseau et en fonctionnement autonome sont présentés.

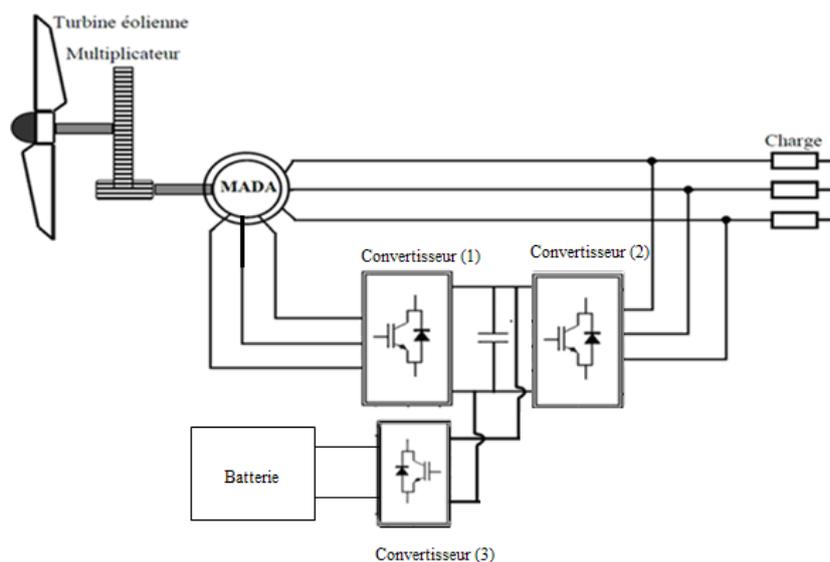
A la fin de cette récapitulation nous avons opté pour un système de production d'énergie éolien équipé d'un système de stockage (Batterie) qui fera l'objet de notre travail.

## II. 1. Introduction

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

Ce chapitre aura comme objectif une modélisation des différents éléments de la structure de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

## II.2 Schéma de la structure choisie



**Fig. II.1** Schéma présentatif de système proposé

La figure (II.1) représente un système éolien en fonctionnement autonome basé sur la machine asynchrone double alimentée, alimentant des charges passives. 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 pour avoir fonctionnement optimal de la chaîne, un système de stockage sera associé. Ce système permet de générer une puissance électrique d'une meilleure qualité.

## II.3. Modélisation de la partie mécanique

### II.3.1. Modèle du vent

De nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés et l'un des principes retenus consiste à générer l'allure temporelle du vent à partir d'un bruit blanc sur lequel on applique une fonction de transfert à déterminer. Ces dépendent de grandeurs caractéristiques du site et de la nature de vent [Cam 03].

### II.3.2. Modélisation de la turbine éolienne [Poi 03]

Un système éolien classique est constitué d'une aéro-turbine qui transforme l'énergie de vent en énergie mécanique, d'un multiplicateur de vitesse de gain  $G$  qui permet à la fois de diminuer le couple et d'augmenter la vitesse de rotation et d'un générateur électrique qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

La puissance du vent captée par les pales est définie de la manière suivante :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_{vent}^3 \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$\rho$  : La densité de l'air qui est égale à  $1,22 \text{ kg/m}^3$ ;

$S$  : La surface balayée par la turbine.

$V_{vent}$  : La vitesse du vent.

La puissance du vent n'est pas totalement captée par les pales, d'où la puissance aérodynamique est inférieure à celle du vent, les deux puissances sont liées par l'expression suivante:

$$P_{aero} = C_p \cdot P_{vent} \quad (\text{II.2})$$

Où:

$C_p$  : Coefficient de puissance de l'éolienne (valeur maximale théorique 0,593). Le  $C_p$  dépend de la vitesse du vent, du nombre de pales, de leur rayon, de leur angle de calage  $\beta$  et de leur vitesse de rotation.

Le couple aérodynamique est donné alors par la formule suivante :

$$C_{aero} = \frac{P_{aero}}{\Omega_{turbine}} = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot S \cdot V_{vent}^3 \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (\text{II.3})$$

### II.3.3. modèle du multiplicateur [Rek 07]

Les vitesses mécaniques de la turbine et celle de la génératrice sont liées par la relation suivante :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{méc}}{G} \quad (\text{II.4})$$

Les couples sur l'arbre lent  $C_{aéro}$  et ce sur l'arbre rapide  $C_{arbre}$  sont exprimés par la relation suivante :

$$C_{arbre} = \frac{C_{aero}}{G} \quad (\text{II.5})$$

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

Les masse des différents éléments de la turbine sont représentées par l'inertie  $J_{turbine}$  le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale  $J$  constituée de l'inertie de la turbine ramenée sur l'axe rapide et celle de la génératrice  $Jg$ , et on suppose que le multiplicateur de vitesse est idéal, l'inertie totale  $J$  est donnée alors par l'expression suivante [EL-Aim 04] :

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + Jg \quad (\text{II.6})$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet d'établir l'évolution de la vitesse mécanique à partir de couple mécanique totale  $C_{em}$  appliqué au rotor :

$$C_{em} = J \cdot \frac{d\Omega_{méc}}{dt} \quad (\text{II.7})$$

Le couple mécanique prend en compte le couple électromagnétique  $C_{em}$  produit par la génératrice, du couple des frottements visqueux  $C_{visq}$  et du couple issu du multiplicateur  $C_{arbre}$ .

$$C_{méc} = C_{arbre} - C_{em} - C_{visq} \quad (\text{II.8})$$

Le couple visqueux est donné par l'expression suivante :

$$C_{visq} = f \cdot \Omega_{méc} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

$f$  : Coefficient de frottement visqueux.

## II.4. La modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

L'étude du fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation, en moteur comme en générateur, nécessite de disposer d'un modèle mathématique. 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].

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 ferromagnétique sont négligées (pas de courants de Foucault ni d'hystérésis) ;
- L'influence de l'effet de peau est négligée ;

### II.4.1. Modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation

On considère que la machine est alimentée par deux systèmes de tensions sinusoïdales triphasées équilibrées  $(v_{sa}, v_{sb}, v_{sc})$  de pulsation  $\omega_s = 2\pi \cdot f_s$  et  $(v_{ra}, v_{rb}, v_{rc})$  de pulsation  $\omega_r = 2\pi \cdot f_r$  [Abd 97]

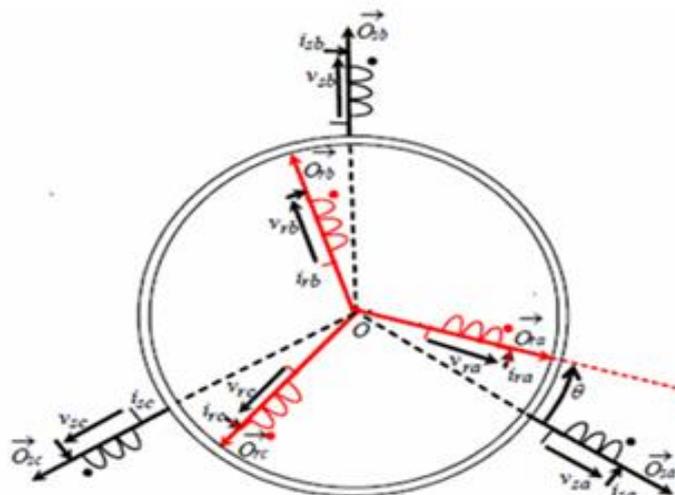


Fig. II.2 Représentation schématique de la MADA

Les équations générales des tensions de la machine s'obtiennent en considérant que la tension appliquée à chacun des enroulements, est la somme de la tension ohmique et de la chute de la tension inductif.

$$V = Ri + \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{II.10})$$

### A. Les équations électriques

Pour les phases statorique, et rotorique on a :

$$[V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d\phi_{sabc}}{dt} \quad (\text{II.11})$$

$$[V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d\phi_{rabc}}{dt} \quad (\text{II.12})$$

Les vecteurs des tensions statorique et rotorique sont définies par :

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

Les vecteurs des résistances statorique et rotorique sont définies

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

Les vecteurs des courants statorique et rotorique sont définies

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

### B. Les équations magnétiques

Les équations magnétiques de la MADA sont données par

$$[\phi_{sabc}] = [L_{ss}][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}] \quad (\text{II.13})$$

$$[\phi_{rabc}] = [L_{rr}][i_{rabc}] + [M_{rs}][i_{sabc}] \quad (\text{II.14})$$

Avec :

$$\begin{aligned}
 [L_{ss}] &= \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} & [L_{rr}] &= \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \\
 [\phi_{sabc}] &= \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} & [\phi_{rabc}] &= \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} \\
 [M_{rs}]^t &= [M_{rs}] = M_{sr} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (II.15)
 \end{aligned}$$

D'après les relations précédentes, on aura :

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

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

Finalement

$$[V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d[L_{ss}][i_{sabc}]}{dt} + \frac{d[M_{ss}][i_{rabc}]}{dt} \quad (II.18)$$

$$[V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d[L_{rr}][i_{rabc}]}{dt} + \frac{d[M_{rr}][i_{sabc}]}{dt} \quad (II.19)$$

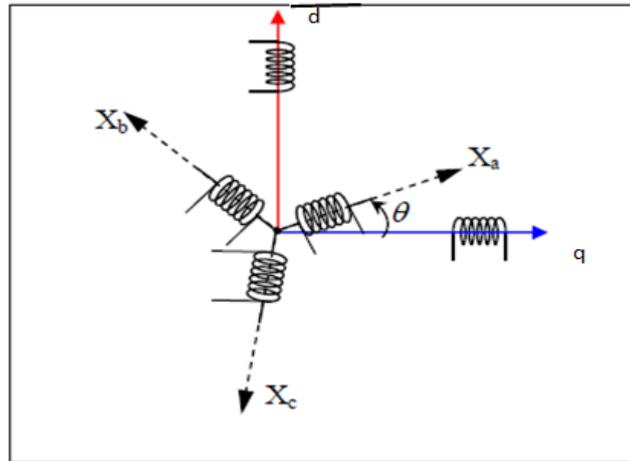
C. L'équation mécanique

L'équation mécanique est donnée par l'expression suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f\Omega \quad (II.20)$$

### II.4.2. Transformation de Park

La transformation de Park consiste à transformer le système triphasé équilibré (a b c) en un système d'axe biphasé tournant (d q) orthogonaux équivalent, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système. La figure (II.3) présente le système d'axes réel ( $X_a$ ,  $X_b$ ,  $X_c$ ) et le système d'axes fictifs (d, q).



**Fig II.3** Système d'axe triphasé et biphasé

La matrice de Park est définie comme suite :

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

La matrice inverse de Park est donnée par :

$$[p(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

L'application de Park à l'équation électrique de la MADA, nous donne :

$$\begin{cases} V_d = Ri_d + \frac{d\phi_d}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \phi_q \\ V_q = Ri_q + \frac{d\phi_q}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \phi_d \\ V_0 = Ri + \frac{d\phi_0}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

La composante homopolaire du système (II.23) est nulle car on a un système équilibré finalement le système d'équation de tension statorique et rotorique et de la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Equation magnétique de la MADA dans le repère (d, q)

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

Avec

$L_s = l_s - M_s$  : Inductance cyclique statorique de la machine ;

$L_r = l_r - M_r$  : Inductance cyclique rotorique de la machine ;

$M = \frac{3}{2} M_{sr}$  : Inductance mutuelle cyclique entre stator et le rotor de la machine.

A partir des équations des flux (II.25) on tire les expressions des courants :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{\phi_{sd}}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{rd} \\ i_{sq} = \frac{\phi_{sq}}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{rq} \\ i_{rd} = \frac{\phi_{rd}}{L_r} - \frac{M}{L_r} i_{sd} \\ i_{rq} = \frac{\phi_{rq}}{L_r} - \frac{M}{L_r} i_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

Plusieurs solutions sont possibles pour orienter le repère «d, q» par rapport au repère triphasé.

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

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

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

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

Avec :

$\Omega$ : La vitesse mécanique.

$\omega$ : La pulsation mécanique.

Ainsi, en partant des équations (II.23), (II.24), et en utilisant la relation (II.25) 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 (d, q)

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

Les puissances statorique active et réactive sont donnée par :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq} \\ Q_s = V_{sq} i_{sd} - V_{sd} i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

Equation de couple

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_s} (\phi_{sq} i_{rd} - \phi_{ds} i_{qr}) \quad (\text{II.30})$$

Avec :

$p$  : Nombre de paire de pôles

### II.4.3. Choix du référentiel

Les équations de la machine peuvent être exprimées dans trois référentiels selon la vitesse qu'on veut attribuer au repère (d, q) [Abd 97] :

#### II.4.3.1. Référentiel lie au rotor

Ce référentiel est choisi dans les problèmes des régimes transitoire ou la vitesse de rotation est constante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \\ \frac{d\theta_r}{dt} = 0 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} \end{array} \right. \quad (\text{II.31})$$

#### II.4.3.2. Référentiel lie au stator

Ce référentiel est choisi dans le but d'étudier des variations importantes de la vitesse de rotation :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\theta_s}{dt} = 0 \\ \frac{d\theta_r}{dt} = -\omega \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} + \omega \phi_{rd} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} - \omega \phi_{rq} \end{array} \right. \quad (\text{II.32})$$

### II.4.3.3. Référentiel lie au champ tournant

Il est souvent utilisé dans les problèmes de commande, il permet de correspondre des grandeurs continues aux grandeurs sinusoïdales du régime permanent.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \\ \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \phi_{rd} \end{array} \right. \quad (\text{II.33})$$

## II.5. Fonctionnement de la MADA dans les quatre quadrants

La MADA peut fonctionner en moteur comme générateur, en mode hypo synchrone et hypersynchrone. Ces modes de fonctionnement sont illustrés sur figure (II.4) ; avec  $P_r$ ,  $P_m$  et  $P_s$  désignent respectivement, les puissances du rotor, mécanique et du stator.

### a- fonctionnement moteur

- ✓ Mode hypo synchrone : dans ce mode la puissance  $P_r$  est fournie par le rotor.
- ✓ Mode hyper synchrone : dans ce cas la puissance  $P_r$  est absorbée par le rotor.

### b- fonctionnement générateur

- ✓ Mode hypo synchrone : dans ce mode la puissance  $P_r$  est absorbée par le rotor.
- ✓ Mode hyper synchrone : dans ce mode la puissance  $P_r$  est fournie par le rotor.

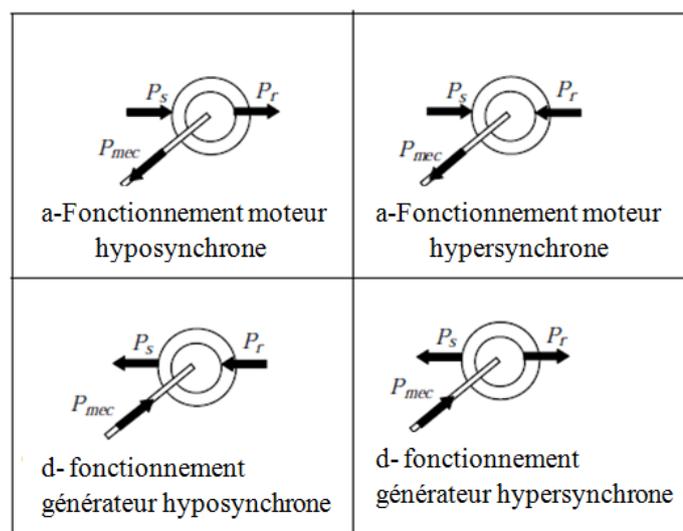
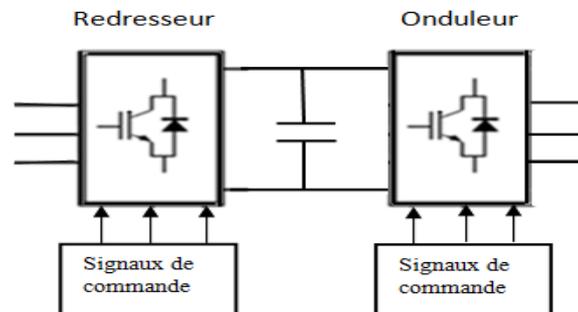


Fig. II.4 Mode opérationnels caractéristique de la MADA [Dri 05]

## II.6. Modélisation du convertisseur de puissance [lar 05].

Dans cette partie, on modélisera les convertisseurs qui interviennent dans la chaîne de conversion éolienne (le redresseur et l'onduleur MLI).



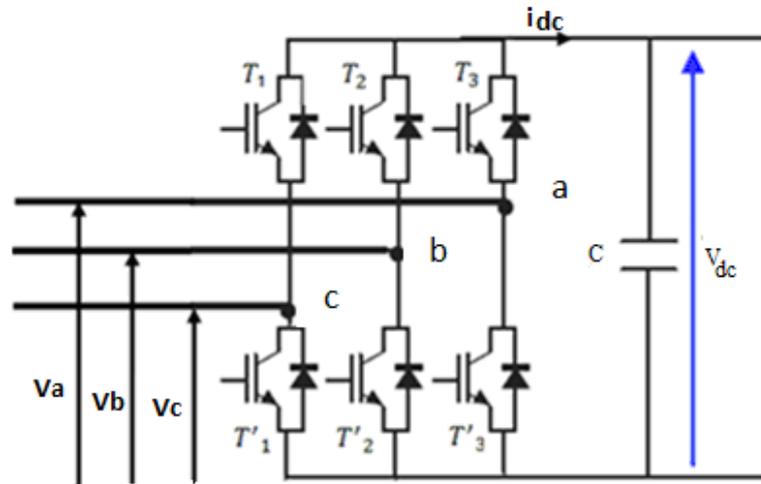
**Fig. II.5** Redresseur et onduleur MLI

Le redresseur et l'onduleur sont tous les deux formés de trois bras composée chacun de deux cellules de commutation, qui sont constituées d'un élément semi-conducteur commandé et d'une diode antiparallèle

Du fait que les constantes de temps des machines et des régulateur sont très grandes devant le temps de transition d'un état à l'autre des composants semi-conducteurs on peut faciliter la tâche et réduire le temps de simulation en modélisant les convertisseurs par un ensemble d'interrupteurs idéaux : les durées de commutation sont négligeables, la chute de tension produite est proposée nulle lorsqu'ils conduisent et les courant qui les traversent sont nuls lorsqu'ils sont bloqués

### II.6.1. Redresseur

Les redresseurs MLI sont des onduleurs utilisés à l'envers qui permettent de produire une tension continue à partir d'un réseau alternatif



**Fig. II.6** Redresseur MLI

Le redresseur MLI est modélisé par la matrice de connexion suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

$$I_{dc} = F_1 I_a + F_2 I_b + F_3 I_c \quad (\text{II.35})$$

Avec :

- $V_{dc}$  : Tension redressée
- $I_{dc}$  : Courant redressé

$F_1, F_2, F_3$  sont des fonctions logiques correspondant à l'état des interrupteurs ;

### II.6.2. L'onduleur

L'onduleur de tension réalise l'interface entre deux types de source : la première est de courant (coté alternatif), la deuxième est de tension (coté continu). L'onduleur de tension utilisé, est composé de six interrupteurs, répartis d'une façon symétrique sur trois bras commandés à la fermeture et à l'ouverture, avec des diodes en antiparallèle comme le montre la figure (II.9).

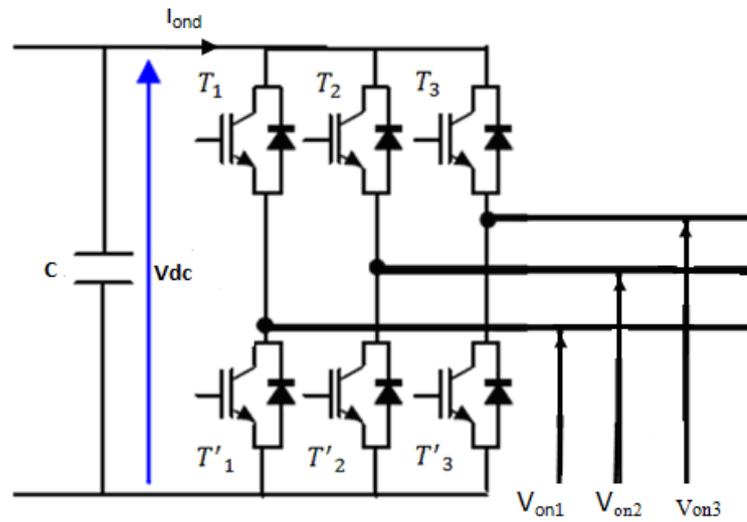


Fig. II.7 Onduleur MLI

On pose les fonctions logiques suivantes :

$$S_i = \begin{cases} 1 & \text{Si } T_i \text{ est fermé} \\ 0 & \text{Si } T_i \text{ est ouvert} \end{cases}$$

$$S'_i = \begin{cases} 1 & \text{Si } T'_i \text{ est fermé} \\ 0 & \text{Si } T'_i \text{ est ouvert} \end{cases}$$

L'onduleur est modélisé en associant à chaque bras une fonction  $F'_i$  avec ( $i=1,2,3$ ) tel que :

$$\begin{bmatrix} V_{on1} \\ V_{on2} \\ V_{on3} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F'_1 \\ F'_2 \\ F'_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$

Avec :

$F'_1, F'_2, F'_3$  Fonction logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.

### II.6.3. Modélisation du bus continu

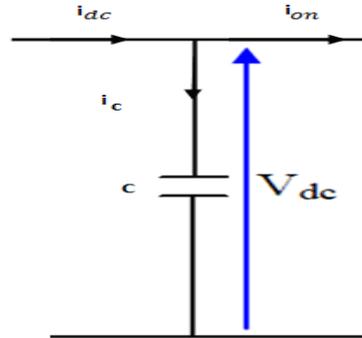
L'évolution temporelle de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif :

$$\frac{V_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} i_c dt \quad (\text{II.37})$$

Donc la tension du bus continu est égale à l'intégration du courant capacitif sur la capacité du bus continu ainsi, son expression s'écrira comme suit :

$$V_{dc} = \int \frac{1}{C} i_c dt \quad (\text{II.38})$$

Le courant de condensateur est issu d'un nœud où circulent deux courants modulés par chaque convertisseur comme le montre la figure ci-dessous

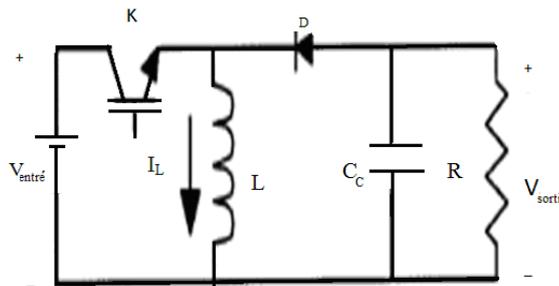


**Fig. II.8** Courant circulant dans le bus continu

$$i_c = i_{dc} - i_{on} \quad (\text{II.39})$$

## II.7. Modélisation de convertisseur (DC/DC) abaisseur – élévateur [Abb 11]

L'électronique de régulation et commande et détermine, à partir des consignes imposées de l'extérieur des mesures prélevées sur le générateur et la charge, la séquence de conduction et de blocage des interrupteur par les signaux logiques nécessaire à la commande en fonction du type de convertisseur utilisés. Dans la figure (II.9) un convertisseur abaisseur – élévateur DC-DC est affiché. La période de commutation est T et le rapport cyclique  $\alpha$ .



**Fig. II.9** Représentation du convertisseur abaisseur - élévateur

En supposant mode de conduction de fonctionnement continu, lorsque l'interrupteur est fermé équations d'état sont donnés par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_{entrée}) \\ \frac{dV_{sortie}}{dt} = \frac{1}{C_c} \left( -\frac{V_{sortie}}{R} \right) \end{array} \right., \quad 0 < t < dt, \tau : \text{fermé} \quad (\text{II.40})$$

Si l'interrupteur est ouvert

$$\begin{cases} \frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L}(V_{sortie}) \\ \frac{dV_{sortie}}{dt} = \frac{1}{C_c}(-I_L - \frac{V_{sortie}}{R}) \end{cases}, dT < t < T, T: \text{fermé} \quad (\text{II.41})$$

### II.7.1. Fonction de transfert de convertisseur DC /DC abaisseur –élevateur

$$G_{vs}(p) = G_{d0} \cdot \frac{(1 - \frac{p}{\omega_z})}{1 + (\frac{1}{\omega_0 Q}) \cdot p + (\frac{1}{\omega_0}) \cdot p^2} \quad (\text{II.42})$$

$$G_{d0} = \frac{V_s}{D \cdot D_1^2}$$

$$\omega_z = \frac{D_1^2 R}{D \cdot L}$$

$$\omega_0 = \frac{D_1}{\sqrt{L C_c}}$$

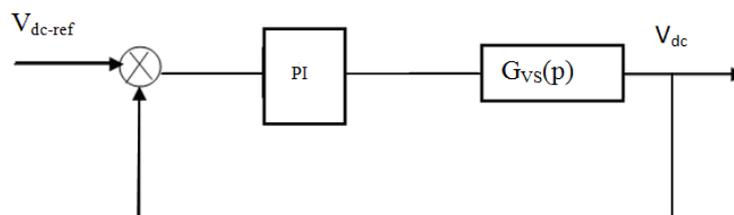
$$Q = D_1 R \sqrt{\frac{C_c}{L}} \quad \text{On } D = \alpha \text{ et } D_1 = 1 - \alpha$$

$$\alpha = \frac{V_{dc}}{V_{dc} + V_{bat}}$$

On remplace dans l'équation (II.42) on trouve :

$$G_{vs}(p) = \frac{1 - (\alpha \frac{L}{R}) \cdot p}{(1 - \alpha) \sqrt{L C_c} \cdot p^2 + (1 - \alpha)^2} \cdot \frac{V_{bat}}{(1 - \alpha)^3} \quad (\text{II.43})$$

### II.7.2. Asservissement de la tension



**Fig. II.10** Schéma fonctionnel de la boucle de tension

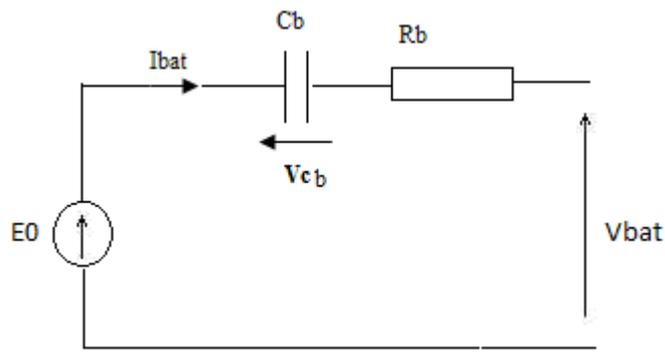
$V_{ref-de}$  : La tension continue de référence

$V_{entré}$  ou  $V_b$  : La tension d'entrée de du hacheur

$G_{vs}(p)$  : La fonction de transfert du hacheur équivalent en petit signaux

### II.8. Le modèle électrique simple de la batterie RC [Sin 10]

Le modèle électrique simple comprend une FEM.  $E_0$  modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie ( $C_b$ ) et une résistance interne ( $R_b$ ). La figure (II.11) représente le modèle simple de la batterie



**Fig. II.11** Modèle R-C de la batterie

Nous avons donc

$$V_{bat} = E_0 - V_{cbat} - R_b \cdot i_{bat} \quad (\text{II.44})$$

**Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation du système proposé basé sur une machine asynchrone à double alimentation. En premier lieu on a présenté les modèles de la partie mécanique (turbine, multiplicateur), puis la modélisation des convertisseurs statiques (redresseur, onduleur), pour passer à la représentation du modèle de la machine en utilisant la transformation de Park. En dernier lieu nous avons donné la modélisation du système de stockage basé sur un convertisseur abaisseur – élévateur et une batterie.

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

### III.1.Introduction

Grâce à son faible coût et sa simplicité de construction, conjugués aux techniques de variation de vitesse, la machine asynchrone s'impose de plus en plus dans les domaines de l'entraînement à vitesse variable. 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. Cette technique permet de calculer les grandeurs de contrôle qui sont le flux et le couple électromagnétique. Dans la structure CDC, la machine asynchrone commandée par l'onduleur de tension est un système dynamique hybride, dont la partie continue est la machine asynchrone et la partie discrète, l'onduleur de tension.

Dans ce chapitre, nous proposons une commande par CDC 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 CDC

Les méthodes de commande directe du couple DTC consistent à commander directement la fermeture et 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 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,

La mesure de la vitesse de l'arbre n'est pas nécessaire, ce qui est un grand avantage de ces méthodes. Le flux et le couple ainsi calculés et sont comparés à leurs valeurs de références 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

- ❖ Bloc de Traitement : composé des sous-blocs algorithmique de la transformée de Park
- ❖ 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), entraine une évolution excessive du niveau thermique.
- ❖ La possibilité de provoquer des résonances mécanique indésirable.

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

Les interrupteurs de l'onduleur de tension doivent être commandes de manière à maintenir le flux et le couple électromagnétique de la machine.

On cherchera donc à contrôler le flux et le couple via le choix du vecteur de tension qui se fera par une configuration des interrupteurs. Comme nous disposons de 3 interrupteurs, il y a donc  $2^3 = 8$  possibilités pour le vecteur  $V_r$ . Deux vecteurs ( $V_0$  et  $V_7$ ) correspondent au vecteur nul.

Le vecteur de la tension rotorique  $V_r$  peut s'écrire sous la forme :

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

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 déterminées par l'équation (II.2 3) [Can 00].

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

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

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

N	$S_a$	$S_b$	$S_c$	$V_c$	$V_s$	$V_e$	$V_r$	$V_d$	$V_q$
0	0	0	0	0	0	0	$V_0$	0	0
1	1	0	0	$\frac{2U_{dc}}{3}$	$-\frac{U_{dc}}{3}$	$-\frac{U_{dc}}{3}$	$V_1$	$\sqrt{\frac{2}{3}}U_{dc}$	0
2	1	1	0	$\frac{2U_{dc}}{3}$	$\frac{U_{dc}}{3}$	$-\frac{2U_{dc}}{3}$	$V_2$	$\sqrt{\frac{1}{6}}U_{dc}$	$\sqrt{\frac{1}{2}}U_{dc}$
3	0	1	0	$-\frac{2U_{dc}}{3}$	$\frac{2U_{dc}}{3}$	$-\frac{U_{dc}}{3}$	$V_3$	$-\sqrt{\frac{1}{6}}U_{dc}$	$\sqrt{\frac{1}{2}}U_{dc}$
5	0	0	1	$-\frac{U_{dc}}{3}$	$-\frac{U_{dc}}{3}$	$\frac{2U_{dc}}{3}$	$V_5$	$-\sqrt{\frac{1}{6}}U_{dc}$	$-\sqrt{\frac{1}{2}}U_{dc}$
6	1	0	1	$-\frac{U_{dc}}{3}$	$-\frac{2U_{dc}}{3}$	$\frac{U_{dc}}{3}$	$V_6$	$\sqrt{\frac{1}{6}}U_{dc}$	$-\sqrt{\frac{1}{2}}U_{dc}$
7	1	1	1	0	0	0	$V_7$	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 :

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

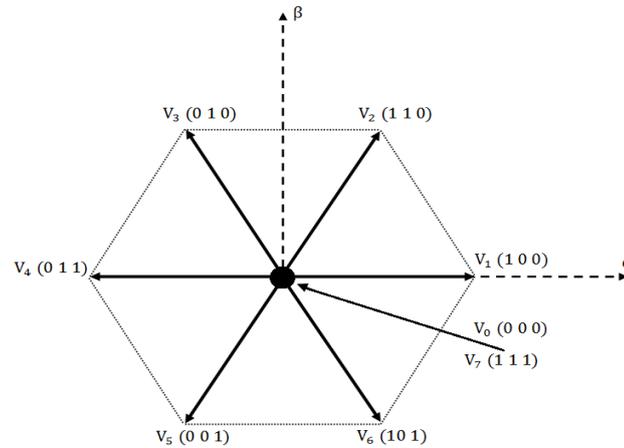
$$\arg(V_n) = \tan^{-1} \frac{V_{rq}(n)}{V_{rd}(n)} \quad (III.4)$$

A partir de ces deux équations, on détermine la position et le module de chaque vecteur, les calculés du module et de l'argument sont donnés dans le tableau ci-dessous

$V_n$	$V_0$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_7$
Module	0	$U_{dc}\sqrt{2/3}$	$U_{dc}\sqrt{2/3}$	$U_{dc}\sqrt{2/3}$	$U_{dc}\sqrt{2/3}$	$U_{dc}\sqrt{2/3}$	$U_{dc}\sqrt{2/3}$	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,  
Fig III.1.



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

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

#### III.5.1 Réglage du comportement du flux rotorique

On se place dans un repère fixe d, q au rotor de la machine. Le flux rotorique peut être obtenu par l'équation suivante

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

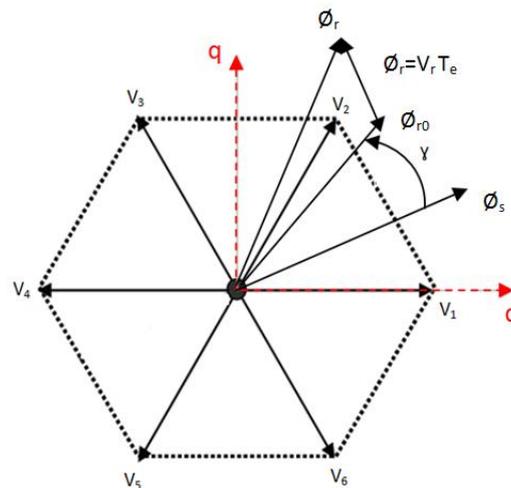
Sur un intervalle périodique de contrôle  $[0, T_e]$ , correspondant à une période d'échantillonnage  $T_e$  les commandes  $(S_a, S_b, S_c)$  sont fixes. Ainsi, on peut écrire :

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

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

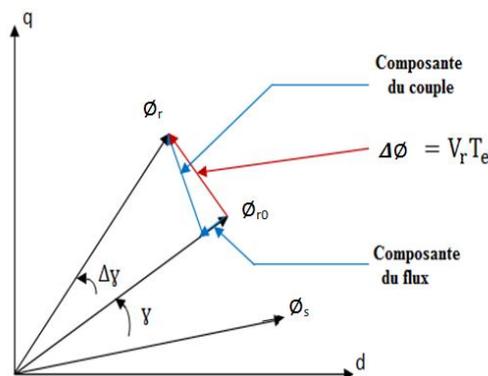
$$\phi_r(t) = \phi_r(0) + V_r T_e \Rightarrow \Delta\phi_r = T_e V_r \quad (\text{III.7})$$

On constate alors sur un intervalle  $[0, T_e]$  l'évolution du vecteur  $\phi_r$  se déplace sur la droite dont la direction est donnée par le vecteur  $V_r$  sélectionné pendant  $T_e$



**Fig. III.2** 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 [Can 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 (III.4) :



**Fig. III.3** 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



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 du 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. Estimateur du flux rotorique

L'estimation du flux peut être réalisé de la mesure des grandeurs rotorique, courant et tension, à partir de l'expression de flux rotorique :

$$\phi_r(t) = \int_0^t (V_r - R_r i_r) dt \quad (III.8)$$

Le calcul des flux rotorique se fait selon les expressions suivantes :

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

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

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

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

De même, les courants  $i_{rd}$  et  $i_{rq}$ , sont également obtenus à partir de la mesure des courants  $i_{ra}$ ,  $i_{rb}$  et  $i_{rc}$  et de l'application de la transformation de Park

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

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

Donc le module de flux rotorique s'écrit :

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

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

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

### III.6.2. Estimation du couple électromagnétique

On peut estimer le couple directement à partir des grandeurs estimées du flux  $\phi_{rd}$  et  $\phi_{rq}$ , des grandeurs calculées du courant  $i_{rd}$  et  $i_{rq}$  [Rek 04] :

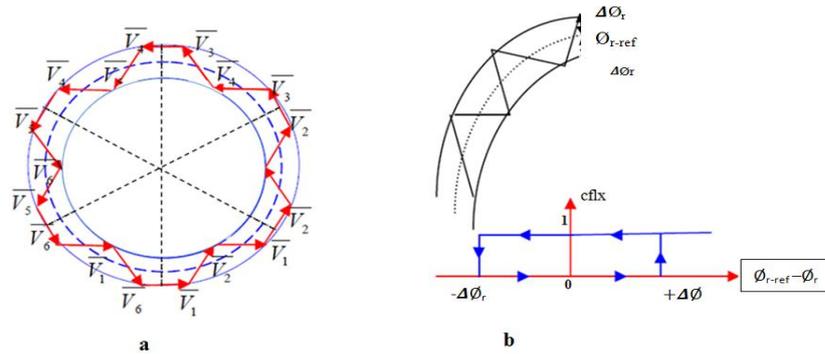
$$C_{em} = p(\phi_{rd} i_{rq} - \phi_{rq} i_{rd}) \quad (\text{III.16})$$

## III.7. Elaboration du vecteur de commande

### III.7.1. Correcteur du flux

Le but d'utiliser un correcteur de flux est de maintenir l'extrémité du vecteur flux ( $\phi_r$ ) dans une couronne circulaire comme le montre la figure (III.5). 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 correcteur à hystérésis à deux niveaux convient parfaitement et permet en plus d'obtenir de très bonnes performances dynamiques. 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  $\phi_{r-ref}$  correspond à la consigne de flux et  $\Delta\phi_r$  est la moitié de la largeur de la bande d'hystérésis du correcteur [Elb 06].



**Fig. III.5** (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 du couple

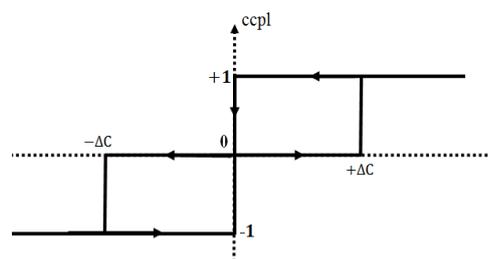
Ce correcteur a pour fonction de maintenir le couple dans les limites

$|C_{em-ref} - c_{em}| < \Delta C_{em}$ ,  $C_{em-ref}$  étant la référence du couple et  $\Delta C_{em}$  est la moitié de la largeur de la bande d'hystérésis du correcteur. Contrairement au flux, le couple électromagnétique peut être positif ou négatif.

Deux solutions peuvent alors être envisagées :

- Un correcteur à hystérésis à deux niveaux
- Un correcteur à hystérésis à trois niveaux

La sortie du correcteur est représentée par une variable booléenne Ccpl, elle indique directement si l'amplitude du couple doit augmenter en valeur absolue (Ccpl=1) pour une consigne positive et (Ccpl=-1) pour une consigne négative et (Ccpl=0) pour maintenir le couple constant [Elb 06], fig (III.7).



**Fig.III.6** Evolution du couple en utilisant un correcteur à hystérésis à trois niveaux

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

Pour élaborer une table de commande il est nécessaire de montrer un exemple de choix de vecteur tension  $V_r$  qui permet à la fois d'augmenter le module de flux rotorique et le vecteur 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  $V_{i-1}$  et  $V_{i+1}$ ,  $V_{i-2}$  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 arrêté 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 de conversion éolienne proposée

La structure complète du modèle globale de la commande de la chaîne de conversion est représentée par la figure (III.7), 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.

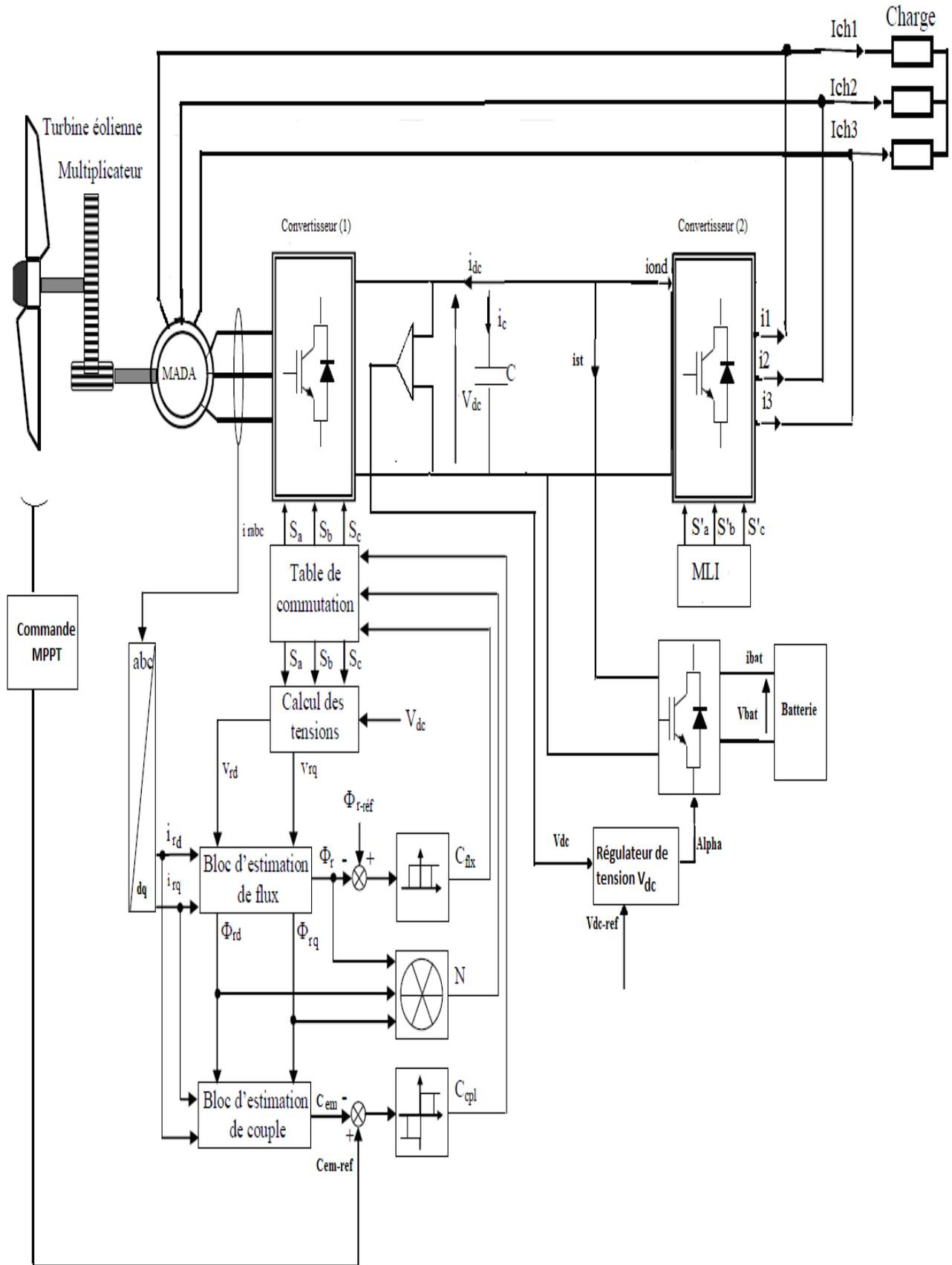


Fig.III. 7 Schéma structurel de commande du système éolien global

## **Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté le principe du contrôle direct du couple (CDC). Le choix d'un correcteur à hystérésis malgré sa simplicité est une solution bien adaptée pour cette commande. Son application nécessite une fréquence d'échantillonnage assez élevée pour réduire les ondulations sur le flux rotorique et le couple. Les résultats de simulation seront présentés au chapitre suivant.

## IV.1 Introduction

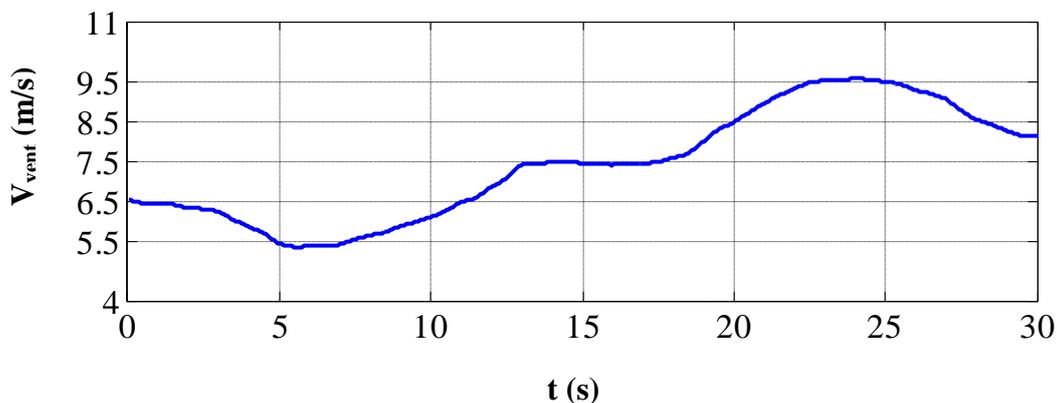
Dans ce chapitre les résultats de simulation de système de conversion déjà présenté et modélisé seront présenter et interpréter sous l'environnement MATLAB/SIMULIK, dans le but de vérifier les performances du système proposée.

## IV.2 Résultat de simulation

La chaîne à étudier par simulation sur MATLAB, est constituée d'une turbine éolienne et d'une génératrice asynchrone à double alimentation, fonctionnant en autonome (le générateur débite sur charge triphasé équilibrée), dont le rotor est connecté à un onduleur et un redresseur MLI commandé par la technique du contrôle direct du couple. Le modèle de la machine est celui présenté dans le chapitre II. Dans ce qui suit, deux tests de simulation sont exécutés afin de quantifier les performances de la commande. L'un permettra de tester l'influence de la variation de vitesse, sur une charge RL constante, et l'autre quantifier l'impact de la variation de la charge sur la qualité des résultats, en particulier l'évolution de la tension du bus continu.

### A. L'influence la variation de la vitesse d'entraînement

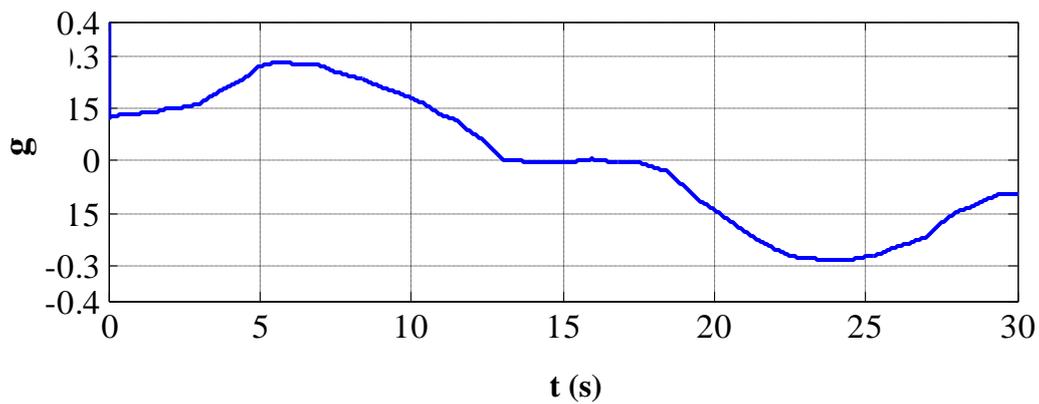
En faisant varie le profil de vent d'une manière à faire fonctionné notre génératrice dans ces trois mode, hyposynchrone, synchronisme et l'hypersynchrone comme l'indique la figure (IV. 1).



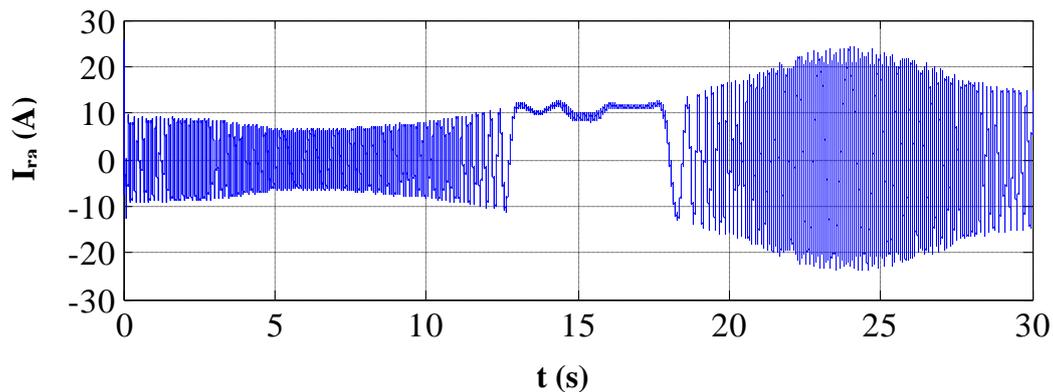
**Fig. IV.1** Vitesse de vent

Le profil du vent imposé, fig (IV.1), nous permet de balayer les trois régimes de fonctionnement de la MADA comme l'indique la forme du glissement de la génératrice, fig (IV.2).

La figure (IV.3), illustre l'allure du courant d'une phase rotorique. Le régime synchrone est montré par la grandeur continue de ce dernier.



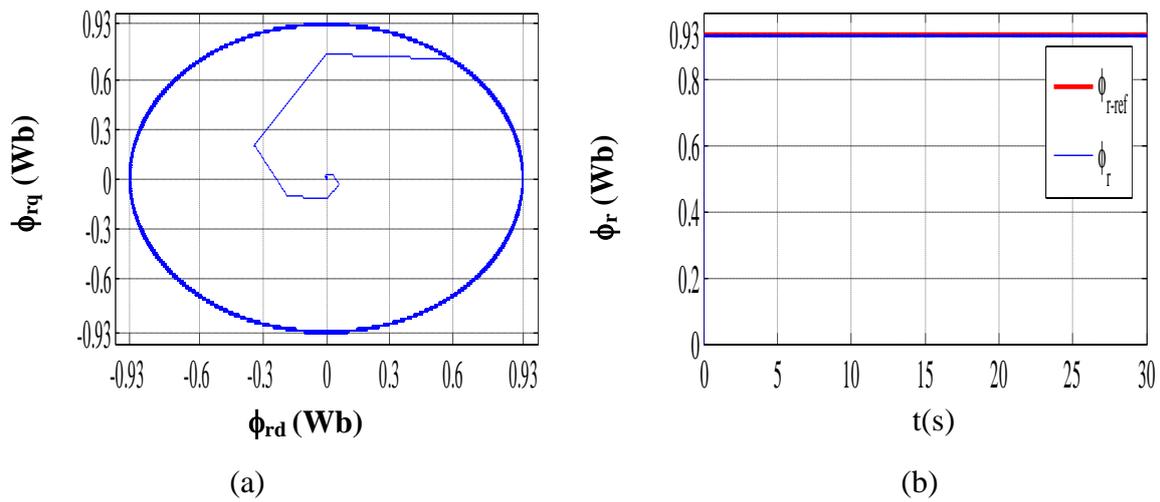
**Fig. IV.2** L'allure de glissement



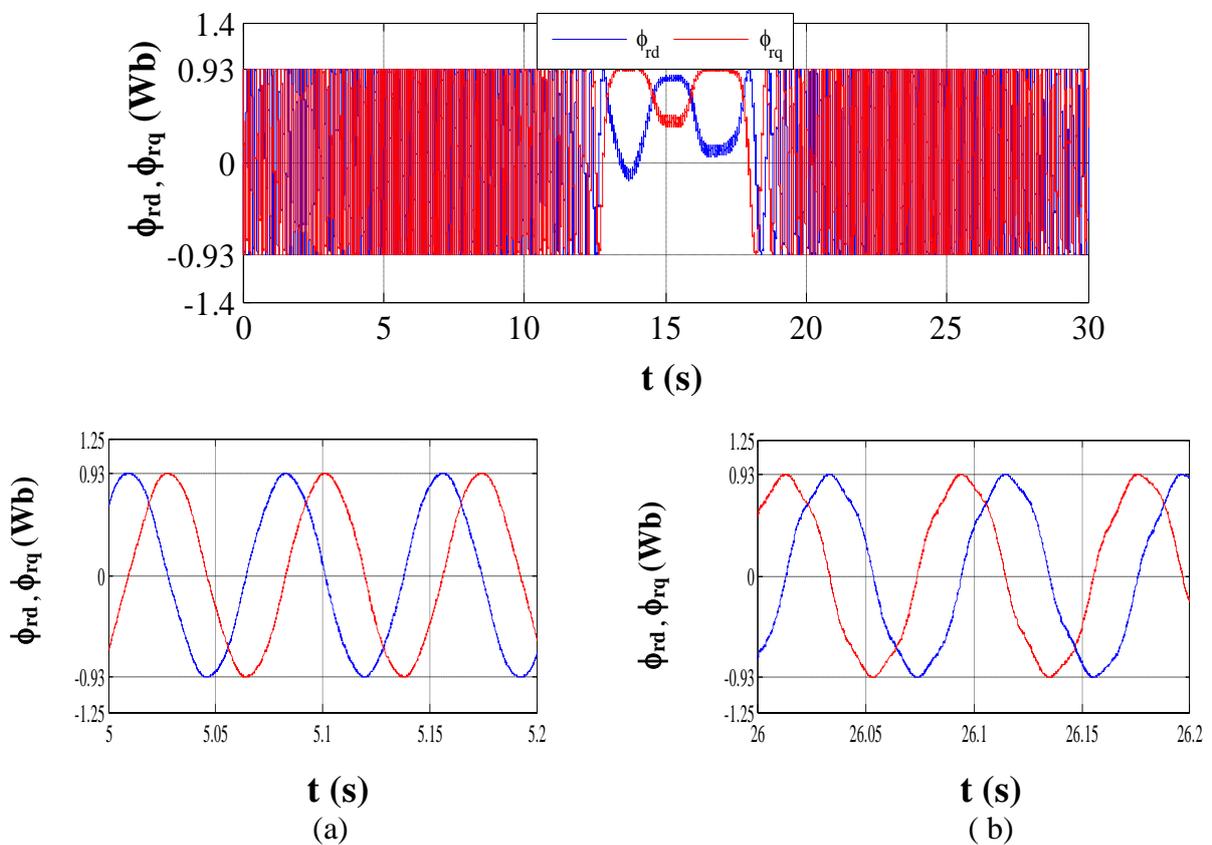
**Fig. IV.3** Courant d'une phase rotorique

Les figure (IV.4.a) et (IV.4.b) représentent la trajectoire du flux rotorique, dont on constate qu'il est parfaitement circulaire ce qui justifie que son module est maintenu constant, malgré la variation du couple électromagnétique, cela signifie que le couple et le flux sont découplés. De plus l'évolution temporaire du couple électromagnétique suit sa référence, comme l'indique la figure (IV.6).

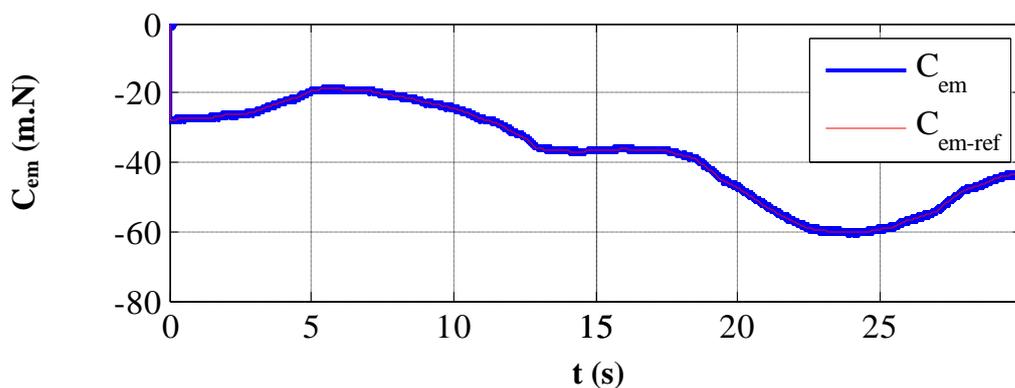
Par contre la figure (IV.5.a) et (IV.5.b), montre l'allure temporaire des deux flux ( $\phi_{rd}$  et  $\phi_{rq}$ ) ce qui indique déphasage en avant dans le premier cas puis en arrière dans le second se qui justifie le fonctionnement de la machine en hyposynchrone et en hypersynchrone, par conte le synchrone est indiquer par l'allure continu des deux flux, fig (IV.5).



**Fig. IV.4** (a) : Evolution du module du flux rotorique estimé par rapport à sa référence  
 (b) : Trajectoire du flux rotorique estimé

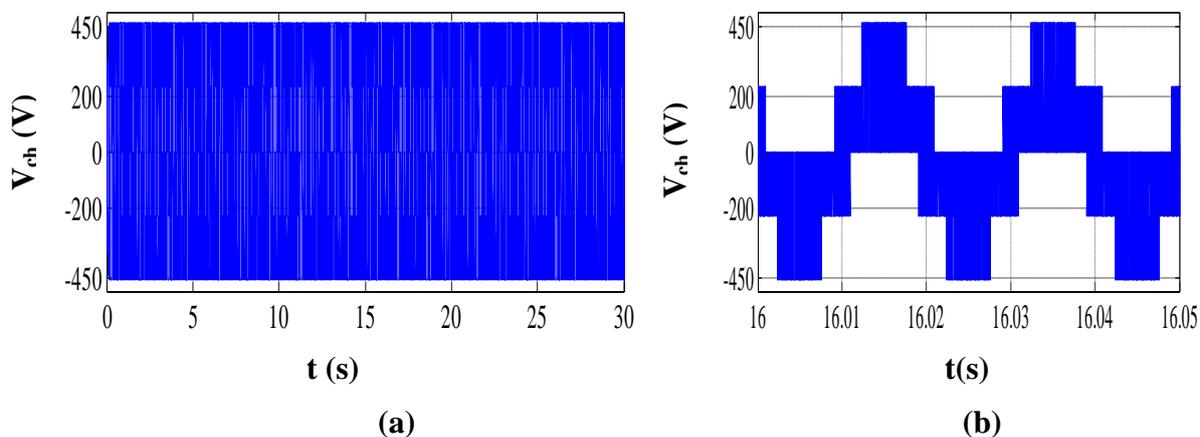


**Fig.IV.5** L'allure temporaire des deux flux rotorique et leur zoom dans le repère (d, q)

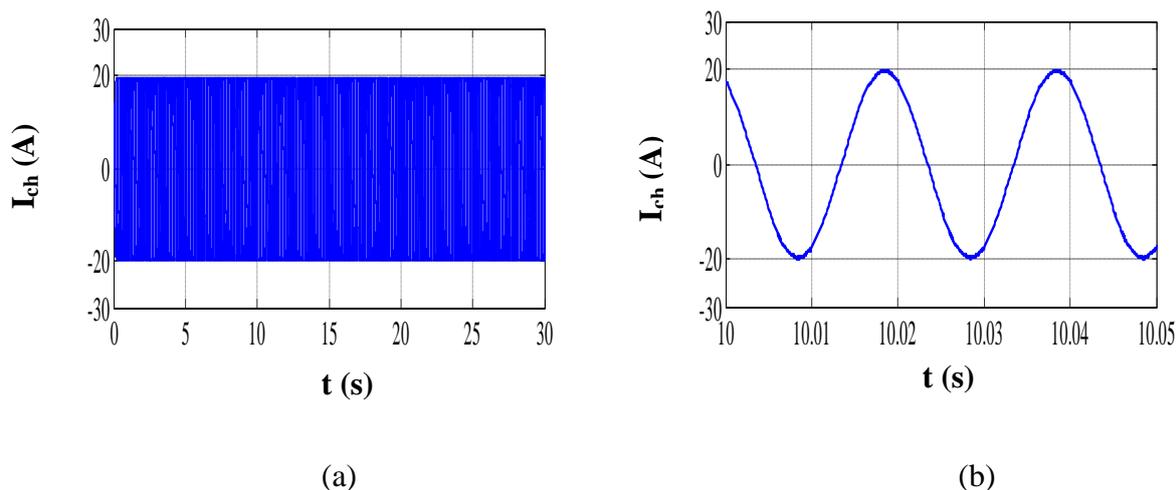


**Fig. IV.6** Couple électromagnétique

Sur les figures (IV.7) et (IV.8), les allures de la tension et du courant d’une phase de la charge montrent que quelque soit la vitesse appliquée à la génératrice, l’amplitude et la fréquence des deux (tension et courant) restent constantes, cela pour une même charge.

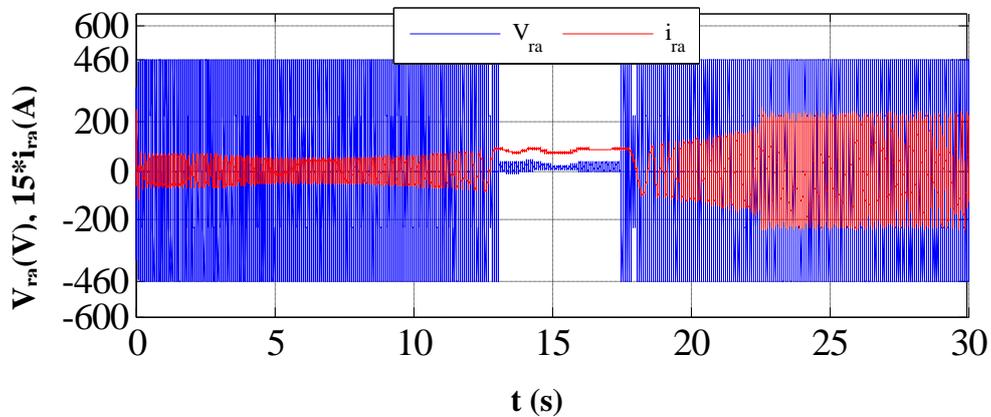


**Fig. IV.7** Tension d’une phase de la charge



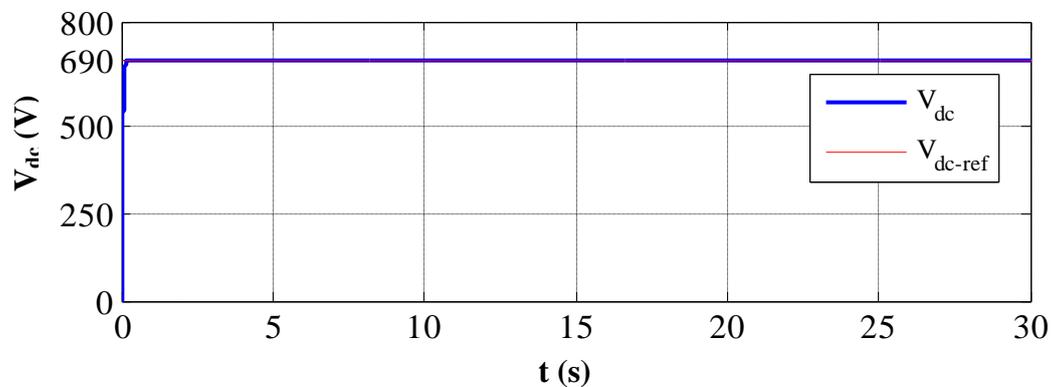
**Fig. IV.8** Courant d’une phase de la charge

La figure (IV.9) illustre l'allure de la tension et du courant rotorique ce qui indique l'amplitude et la fréquence de la tension constant (hypersynchrone et hypersynchrone), ainsi que le courant et la tension sont nulles dans le régime synchronisme.



**Fig. IV.9** L'allure de la tension et le courant rotorique

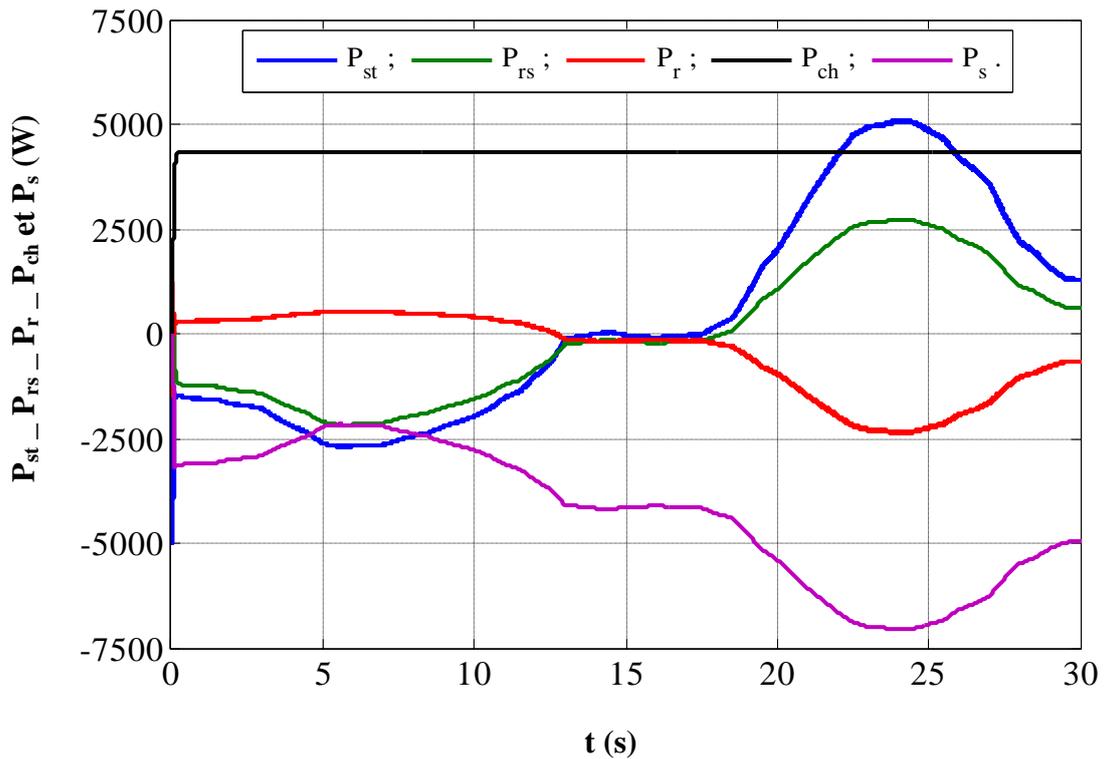
La figure (IV.10) représente l'allure de la tension de bus continu qui suit parfaitement sa consigne, pour les différents régimes de fonctionnement de la machine (ce qui justifié que  $V_{dc}$  n'est pas affectée par la variation de la vitesse).



**Fig. IV.10** Tension redressée

- **Transite de puissance entre la batterie de stockage et le système :**

La figure (IV.11), englobe la gestion d'écoulement des puissances misent en jeu, dont on peut l'expliquer par le tableau récapitulatif qui sui, Tableau. (IV. 1) :

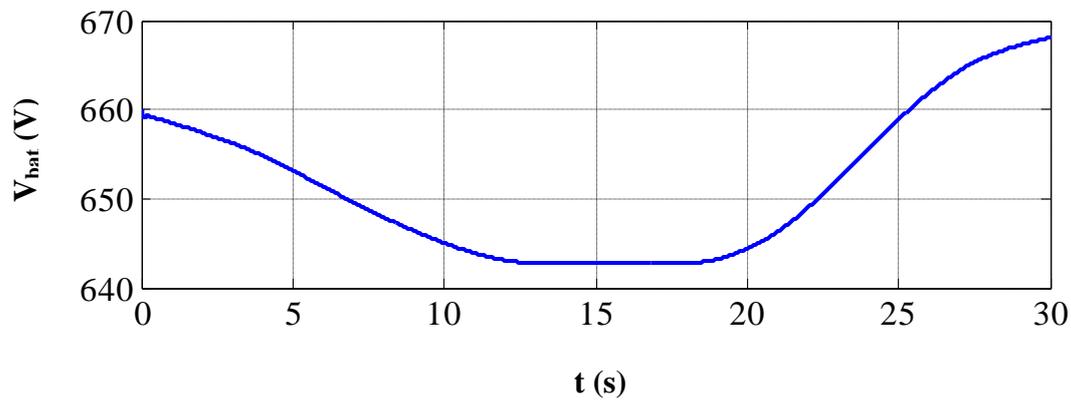


**Fig. IV.11** Les allures des puissances mises en jeu dans le système proposé

Sur la figure (IV.11) les allures des puissances sont présentées, ainsi que la charge et la décharge sont vérifiées sur l'allure de la tension aux bornes de la batterie  $V_{bat}$ , fig (IV.12).

Les régimes L'état du système	Régime hyposynchrone $P_r > 0$ ; [0, 13s]	Régime Synchronisme [13s, 17s]	Régime hypersynchrone [17s, 30s]
Résumé	$ P_{ch}  >  P_s  \Rightarrow$ $P_{rs} < 0$ (sortante de convertisseur vers la charge ; $ P_{rs}  <  P_r  \Rightarrow$ $P_{st} < 0 \Rightarrow$ le déstockage de la batterie.	$ P_{ch}  >  P_s  \Rightarrow$ $P_{rs} < 0$ (sortante de convertisseur vers la charge ; $ P_{rs}  >  P_r  \Rightarrow$ $P_{st} > 0 \Rightarrow$ le stockage de la batterie avec un très faible courant	$ P_{ch}  <  P_s  ; \Rightarrow$ $P_{rs} > 0$ (entrante vers le convertisseur) $ P_{rs}  >  P_r  \Rightarrow$ $P_{st} > 0 \Rightarrow$ le stockage de la batterie

**Tableau. IV.1** Récapitulatif du transit des puissance



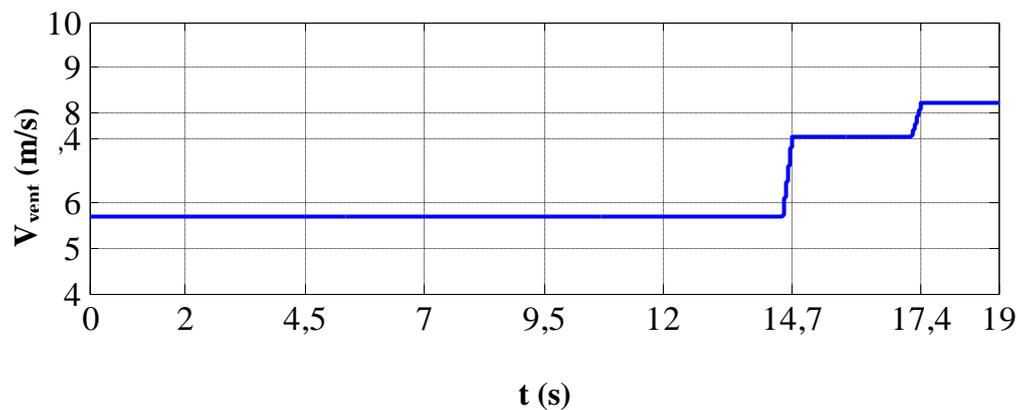
**Fig. IV.12** Tension de la batterie

## B. L'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 cinq puissance de la charges, [ $P_{ch1} = 1363 \text{ W}$ ,  $P_{ch2} = 732 \text{ W}$ ,  $P_{ch3} = 373 \text{ W}$ ,  $P_{ch4} = 4340 \text{ W}$ ,  $P_{ch5} = 8550 \text{ W}$ ]. La valeur de tension de bus continu est fixé à  $V_{dc\_ref} = 690 \text{ V}$ .

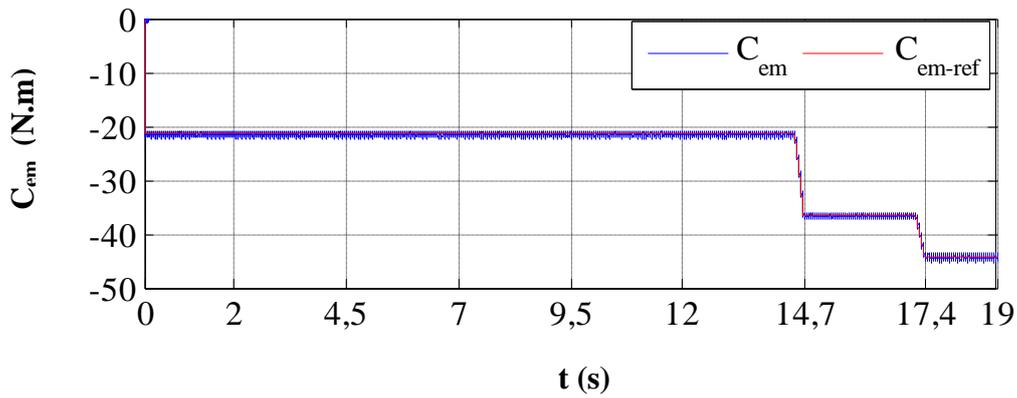
### B.1. Régime hyposynchrone

Commençant par un entraînement sous une vitesse du vent permettant d'avoir le régime hyposynchrone, Fig. (IV. 13), Les résultats de simulation sont illustrés ci-dessous

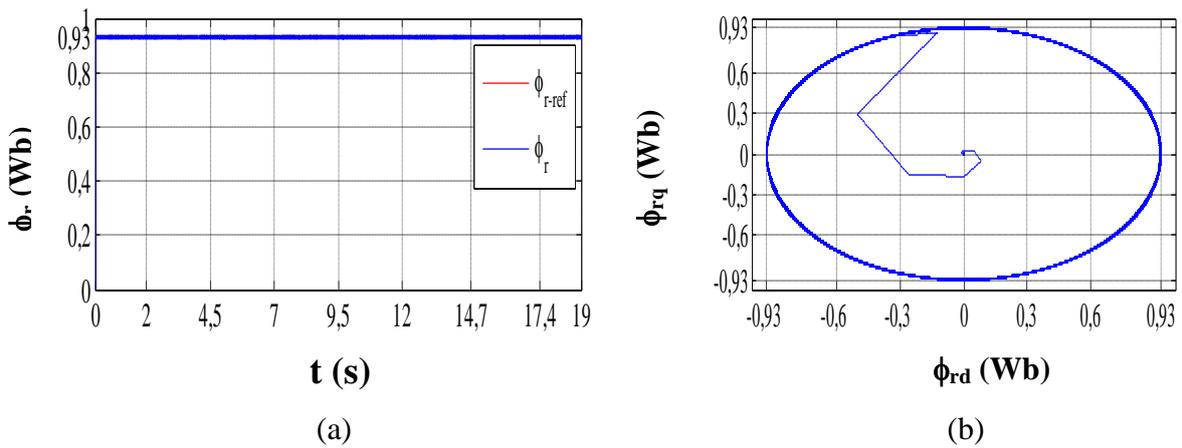


**Fig. IV.13** Vitesse de vent

La figure (IV.14) et (IV.15) montrent que le couple électromagnétique et le flux rotorique suit parfaitement leurs références indépendamment de la charge, ce qui justifié qu'ils sont insensible aux variations de la charge.

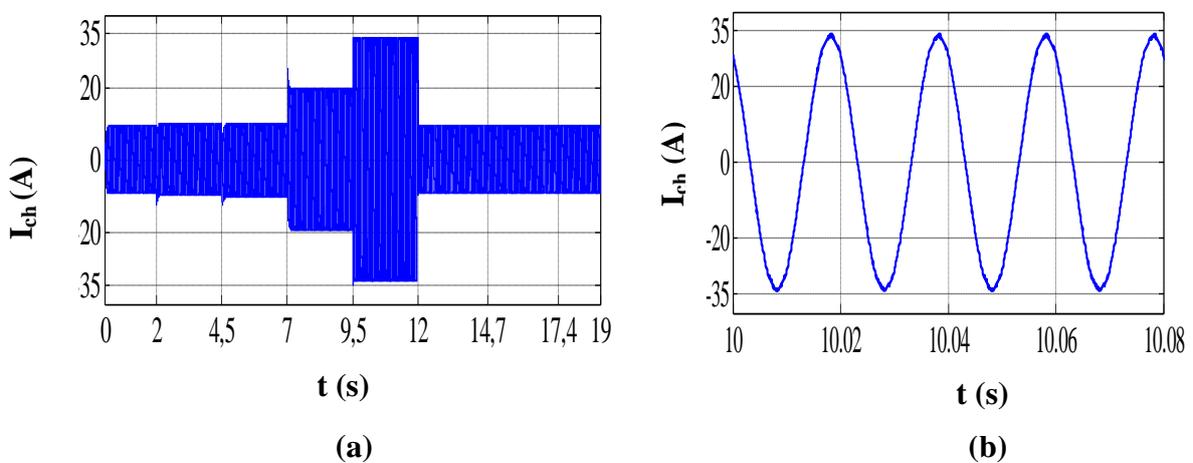


**Fig. IV.14** Couple électromagnétique

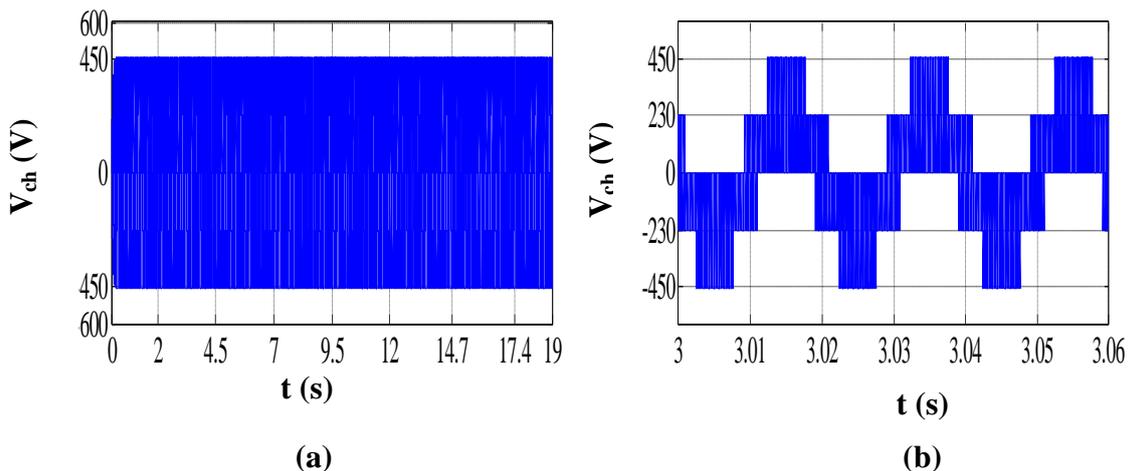


**Fig. IV.15** Trajectoire du flux rotorique estimé

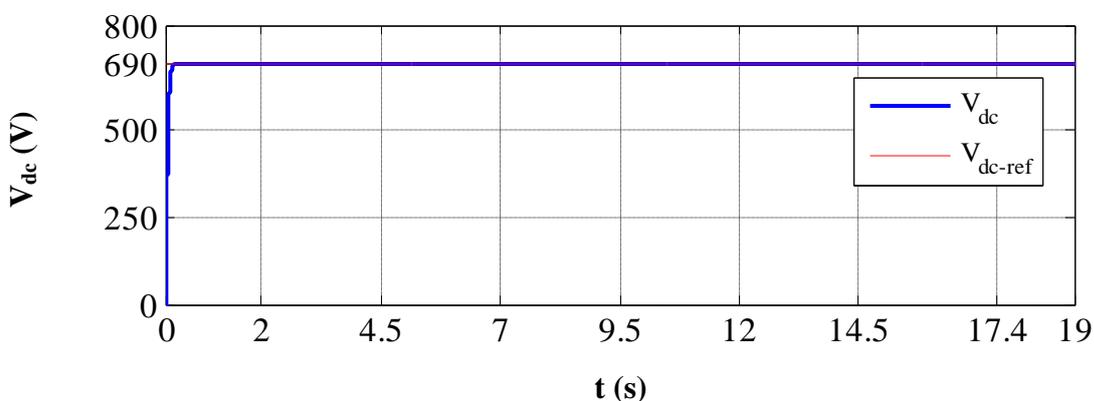
Les figures (IV.16) et (IV.117), respectivement, montrent les allures du courant et de la tension d'une phase de la charge, ce qui illustrent que l'amplitude du courant dépend de la variation de la charge, mais la fréquence ne subit pas de perturbation (reste constant) quelque soit la valeur de la charge connectée. Ce qui est vérifié dans les différents modes de fonctionnement de la génératrice.



**Fig. IV.16** Courant d'une phase de la charge



**Fig. IV.17** Allure de tension de la charge

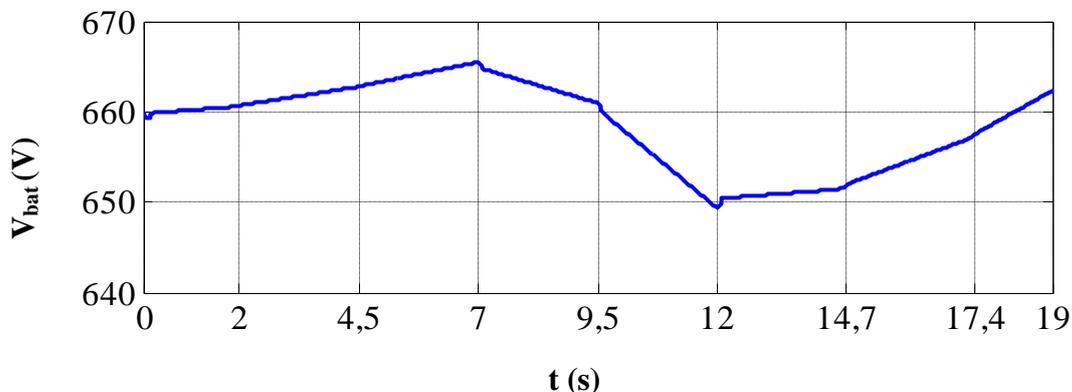


**Fig. IV.18** Allure de la tension redressée

La figure (IV.18) présente l’allure de la tension de bus continu ( $V_{dc}$ ) qui est constante. Cette constatation est valable pour les trois régimes de fonctionnement de la MADA.

- **Transite de puissance entre la batterie de stockage et le système :**

Les figures (IV.19) et (IV.20), respectivement montrent l’allure de la tension aux bornes de la batterie de stockage et les allures des puissances mises en jeu dans le système proposé.



**Fig. IV.19** L’allure de la tension aux bornes de la batterie de stockage



### B.2. Régime synchronisme

Afin de confirmer le régime de fonctionnement synchrone de la génératrice, nous représentons l'allure du courant rotorique qui a une fréquence nulle ce qui justifié la nature continue de ce courant, fig (IV.21).

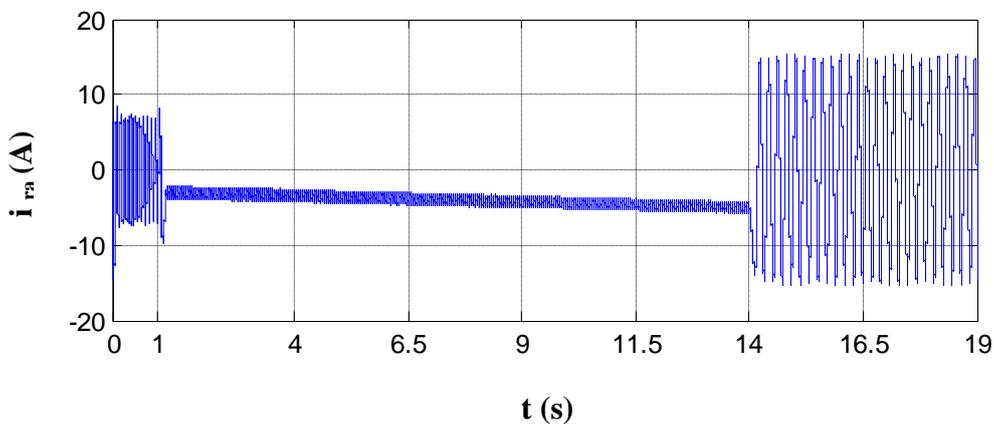


Fig. IV.21 Allure de courant de phase

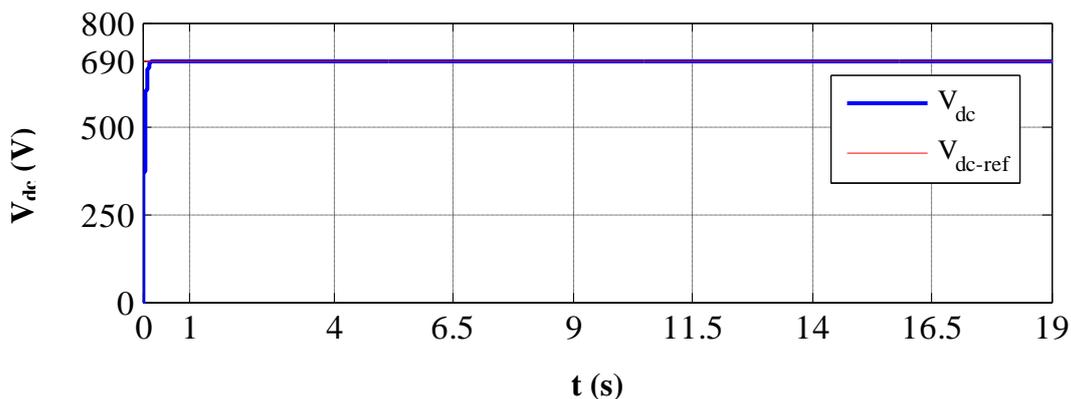


Fig.IV.22 Allure de la tension redressée

L'évolution de la tension du bus continu est représentée par la figure (IV.22).

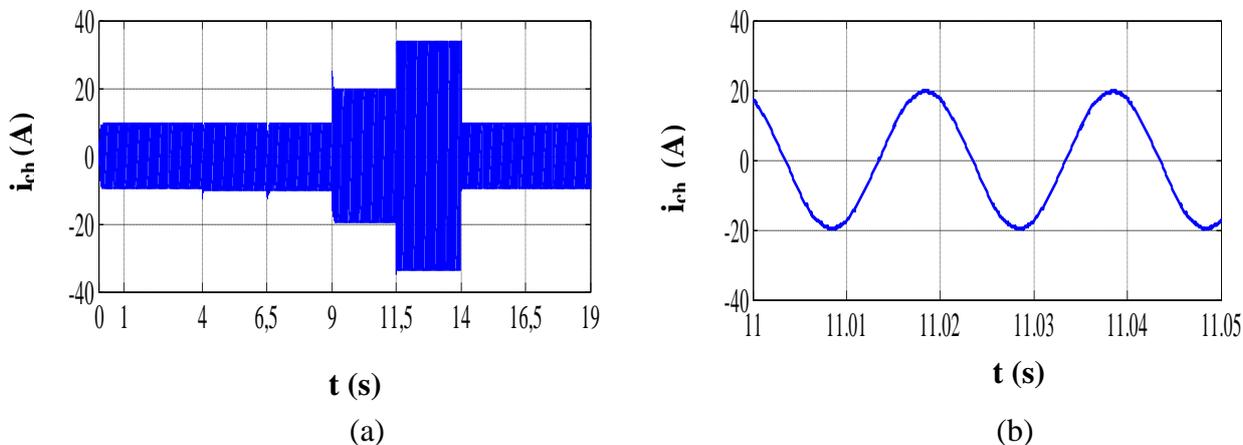


Fig. IV.23 Courant d'une phase de la charge

Les allures du courant et de la tension de la charge sont illustrées sur les figures (IV.23) et (IV.24), respectivement.

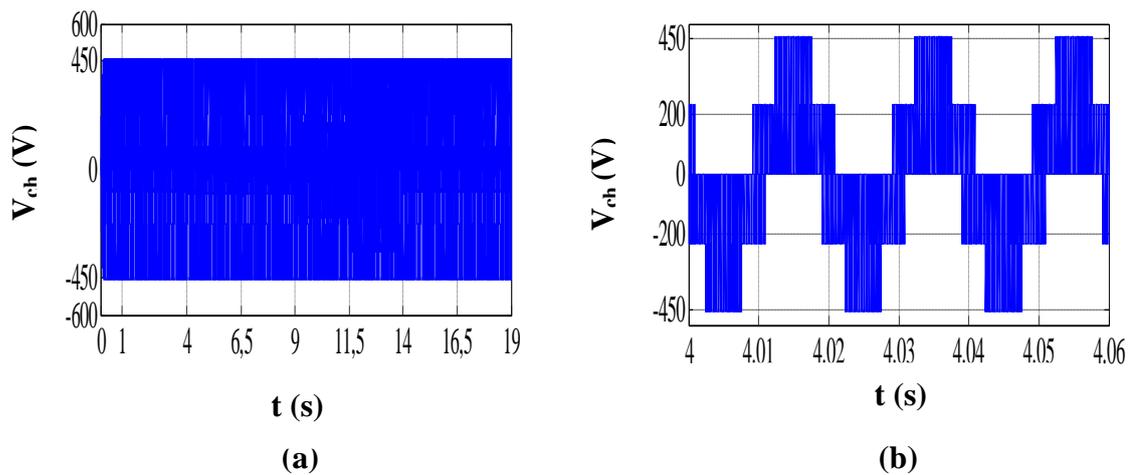
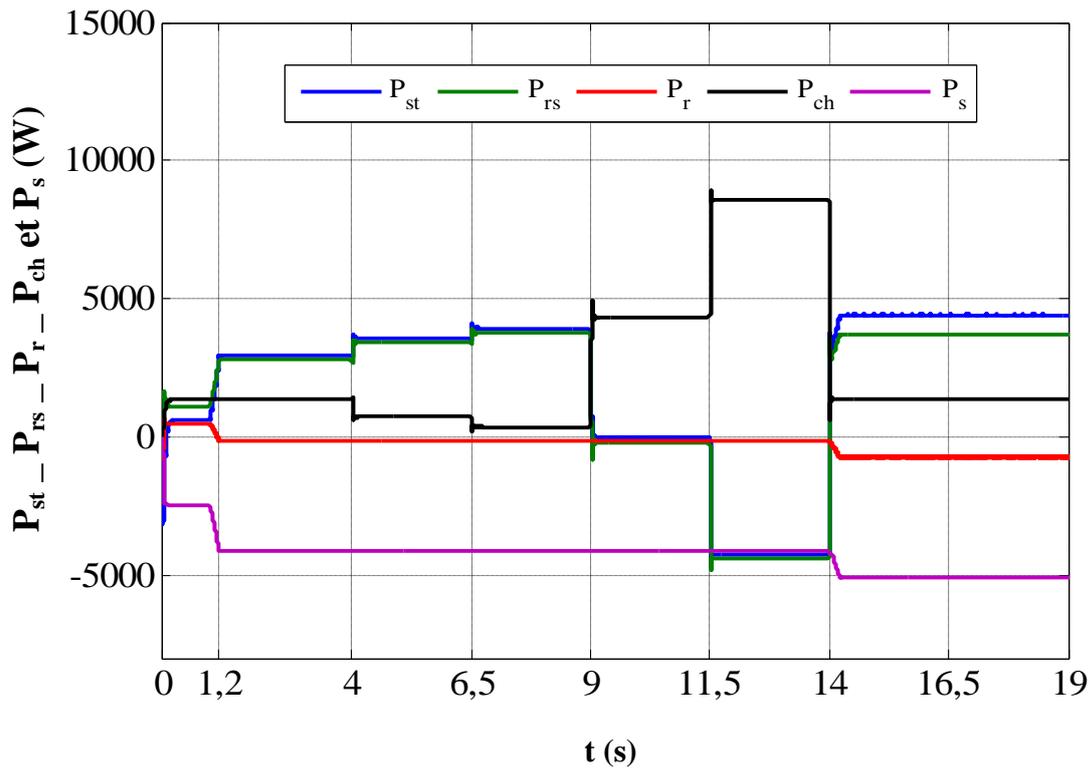


Fig. IV.24 Allure de tension de la charge

• **Transite de puissance entre la batterie de stockage et le système :**

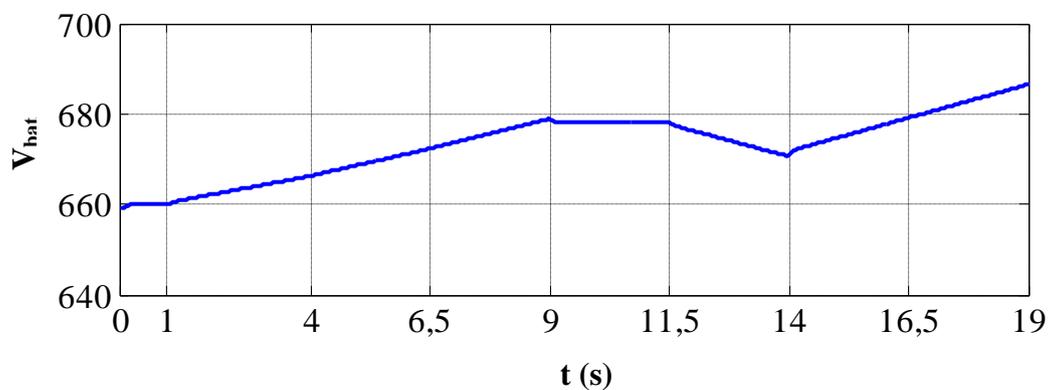
Les régimes L'état du système	Régime synchrone [1,2, 14]				
	$P_s$ (W)	-4145	-4145	-4145	-4145
$P_{ch}$ (W)	1363	732	373	4340	8550
$P_{rs}$ (W)	2782	3413	3792	-195	-4405
$P_r$ (W)	-161	-161	-161	-161	-161
$P_{st}$ (W)	2943	3574	3933	-34	-4244
Résumé	$ P_{ch}  <  P_s $ ; $P_{rs} > 0$ (entrante vers le convertisseur); $ P_r  <  P_{rs} $ ; $P_{st} > 0 \Rightarrow$ le stockage de la batterie.		$ P_{ch}  >  P_s $ ; $P_{rs} < 0$ (sortante de convertisseur vers la charge) ; $ P_r  <  P_{rs} $ ; $P_{st} < 0 \Rightarrow$ le déstockage de la batterie.		$ P_{ch}  >  P_s $ ; $P_{rs} < 0$ (sortante de convertisseur vers la charge) ; $ P_r  <  P_{rs} $ ; $P_{st} < 0 \Rightarrow$ le déstockage de la batterie.

Tableau. IV.3 Récapitulatif du transite des puissances



**Fig. IV.25** Les allures des puissances mises en jeu dans le système proposé

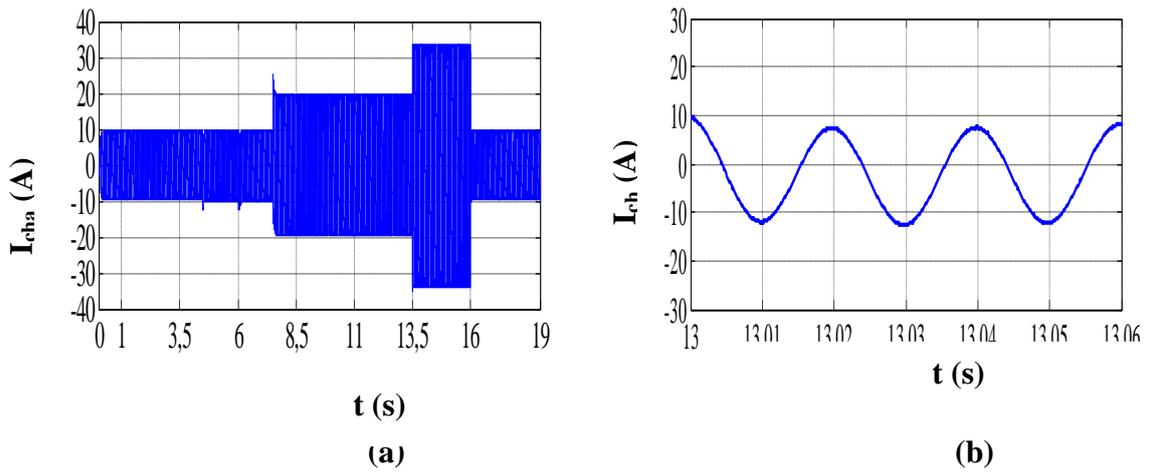
Les figures (IV.25) et (IV.26), respectivement illustre Les allures des puissances mises en jeu dans le système proposé ainsi que la tension de la batterie.



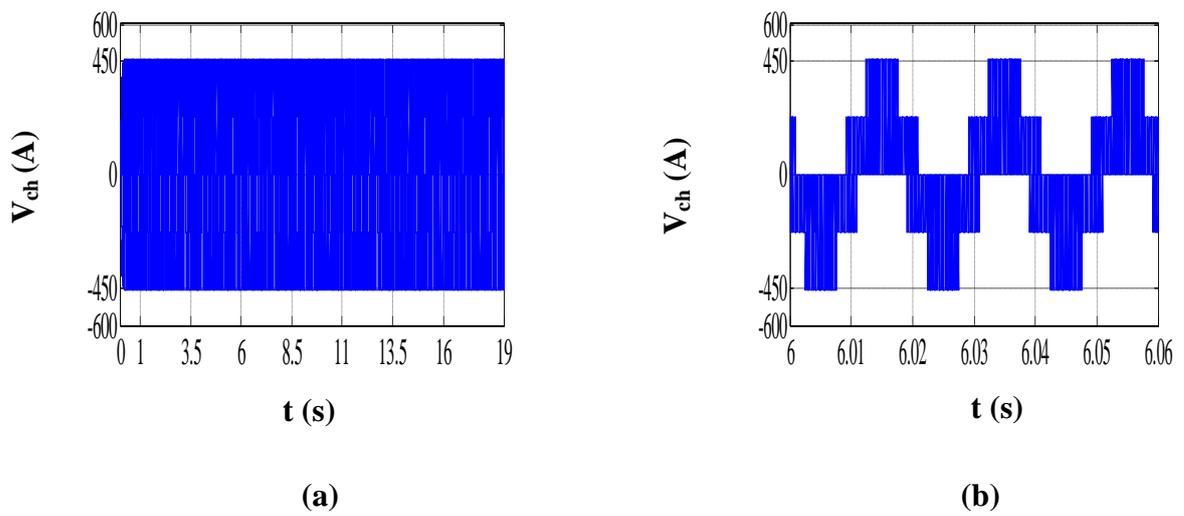
**Fig. IV.26** Allure de tension de la batterie

### B.3. Régime hypersynchrone

Le régime de fonctionnement hypersynchrone est confirmé par le signe négatif de la puissance rotorique  $P_r < 0$ .

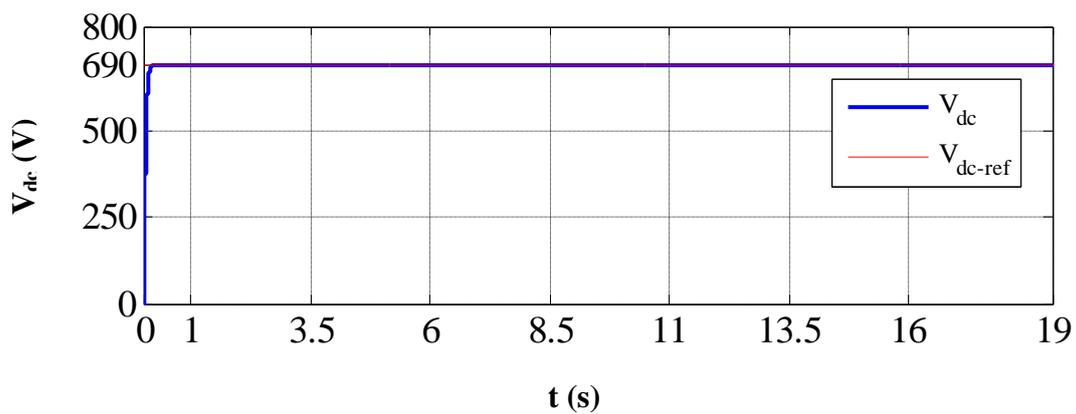


**Fig. IV.27** Courant d'une phase de la charge



**Fig. IV.28** Tension d'une phase de la charge

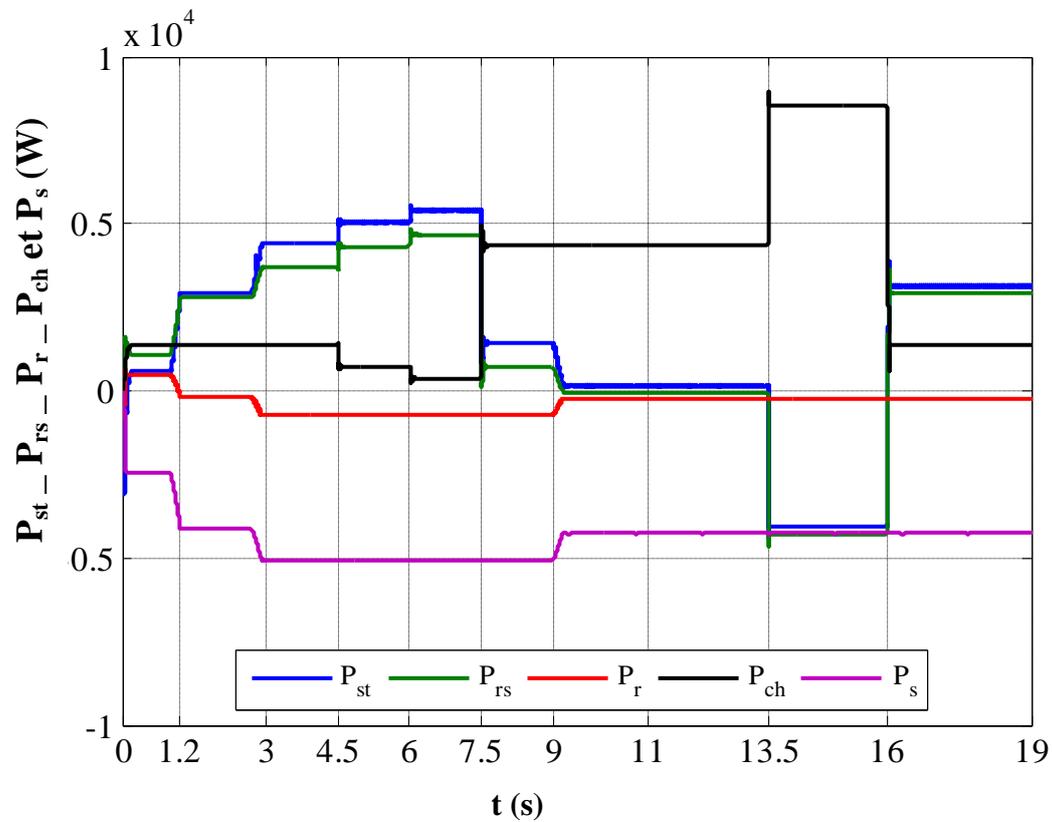
Sur les figures (IV.27) et (IV.28), respectivement, le courant et la tension de charge sont représentés. Ainsi que l'évolution de la tension  $V_{dc}$  est montrée sur la figure (IV.29).



**Fig. IV.29** Allure de la tension redressée

- **Transite de puissance entre la batterie de stockage et le système :**

La figure (IV.30) illustre les allures des puissances mises en jeu dans le système proposé.



**Fig. IV.30** Les allures des puissances mises en jeu dans le système proposé

Les régimes	Régime hypersynchrone [3, 19]						
l'état de système							
$P_s$ (W)	-5055	-5055	-5055	-5055	-4267	-4267	-4267
$P_{ch}$ (W)	1363	732	373	4340	4340	8550	1363
$P_{rs}$ (W)	3692	4323	4682	715	-73	-4283	2904
$P_r$ (W)	-724	-724	-724	-724	-231	-231	-231
$P_{st}$ (W)	4416	5047	5406	1439	158	-4052	3135
Résumé	$ P_{ch}  <  P_s $ ; $P_{rs} > 0$ (entrante vers le convertisseur); $ P_r  <  P_{rs}  \Rightarrow P_{st} > 0 \Rightarrow$ le stockage de la batterie.			$ P_{ch}  >  P_s $ ; $P_{rs} < 0$ (sortante de convertisseur Vers la charge); $ P_r  <  P_{rs} $ ; $P_{st} > 0 \Rightarrow$ le stockage de la batterie.		$ P_{ch}  >  P_s $ ; $P_{rs} < 0$ (sortant e de convertisseur vers la charge) $ P_r  <  P_{rs} $ ; $P_{st} < 0 \Rightarrow$ le déstockage de la batterie.	$ P_{ch}  <  P_s $ ; $P_{rs} < 0$ (sortante de la charge vers le convertisseur); $ P_r  <  P_{rs} $ ; $P_{st} > 0 \Rightarrow$ le stockage de la batterie.

Tableau. IV.4 Récapitulatif du transite des puissance

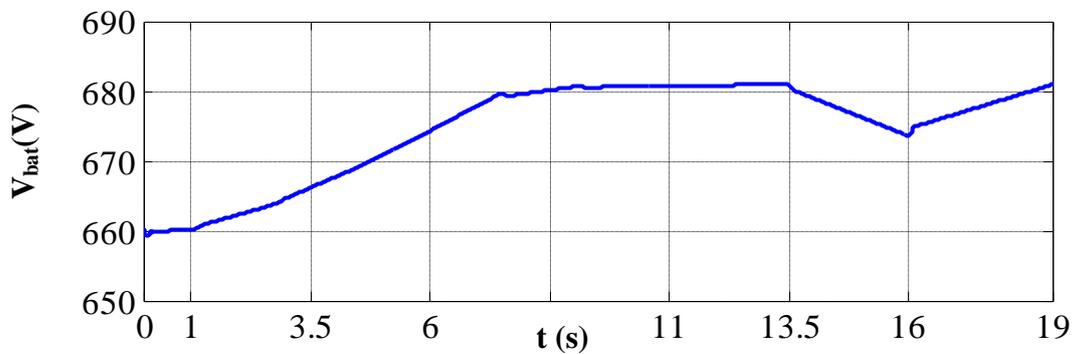


Fig. IV.31 Tension de la batterie

L'évaluation de la tension de la batterie est représentée par la figure (IV.31).

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats obtenus par la commande DTC appliquée à la génératrice asynchrone à double alimentation, dans ses différents modes de fonctionnement (hyposynchrone, synchrone et hypersynchrone) qui dépendent de la valeur et du signe de glissement, ce qui est reflété par le signe de la puissance active rotorique pour (l'hyposynchrone et l'hypersynchrone). Par contre le synchronisme est justifié par la fréquence nulle des courant rotorique.

Les résultats obtenus montrent une bonne poursuite des consignes pour les différentes grandeurs ainsi que de bonne performances concernant le transit des puissances dans le système étudié.

## Conclusion générale

L'objectif de ce travail est l'étude de la chaîne de conversion basé sur une machine asynchrone à double alimentation à vitesse variable associée à un système de stockage d'énergie qui débite sur une charge autonome.

Pour se placer dans le contexte général du travail et de choisir le système global à contrôler, il était important d'élaborer un document de synthèse illustrant les concepts fondamentaux d'une chaîne de conversion éolienne. Pour cela, le premier chapitre est consacré à la présentation de l'état de l'art des différents modes de production éolienne, type de générateur ainsi l'intérêt que peut apporter la machine asynchrone à double alimentation par rapport aux autres machines, tout en mentionnant l'une des possibilités d'un système de stockage pour un aérogénérateur en fonctionnement autonome.

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 est consacré à la présentation du principe du contrôle direct du couple et à l'implantation de la commande du système global (Aérogénérateur associé avec un système de stockage). Le contrôle du système global est basé sur deux réglages; le premier concerne le générateur avec son système d'alimentation commandé par la technique CDC. Par contre le second vise à gérer le sens d'écoulement de puissance entre la production- la charge et le système de stockage, tout en réglant la tension de bus continu par un hacheur Abaisseur-Elevateur (Buck-Boost).

La commande du système est alors introduite et les algorithmes sont établis pour le fonctionnement optimal du générateur autonome, ainsi que le contrôle du sens d'écoulement de puissance entre les trois parties est étudié, et les résultats de simulations ont été donnés.

Les résultats ont montré, d'une manière générale une poursuite parfaite des consignes pour les différentes grandeurs imposées tout en gardant une meilleure précision du contrôle ainsi que de bonnes performances, ce qui est reflété par une très bonne régulation du couple et du flux de la machine ainsi que de l'amplitude de la tension de bus continu gérée par le hacheur (Buck-Boost),

tout en précisant le bon comportement par rapport à la fréquence et la tension de sortie (aux bornes de la charge). Qui ont des valeurs fixes quel que soit la nature et la valeur de la charge connectée, un bon contrôle du transit de puissance entre la génératrice, la charge et le système de stockage est présentée.

Enfin, en analysant les différents résultats obtenus, le fonctionnement optimal d'un aérogénérateur autonome nécessite l'association d'un système de stockage permettant une bonne gestion de transit de puissance, ainsi l'application de la commande DTC proposée aboutit globalement, à des meilleures performances.

Comme perspectives nous envisageons:

- L'établissement d'un modèle non linéaire de la MADA prenant en compte la saturation magnétique ;
- Elaborer d'autres types de commande non linéaire ;
- Etude d'une centrale de production de l'énergie électrique hybride (éolienne + solaire).
- L'application d'un système de gestion de stockage.

- [**Abb 11**] L. Abbassen, « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque », Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université de Tizi- Ouzou, 2011.
- [**Abd 07**] A. Abdelli, « Optimisation multicritère d'une chine éolienne passive », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse France, 2007.
- [**Abd 97**] R. Abdessamed, « modelisation des machines électriques », Presse de l'Université de Batna, 1997.
- [**Ack 02**] T. Ackermann, L. Söder an, « Overview of wind energy-status Renewable and sustainable energy reviews », vol. 6, pp.67 - 128, 2002.
- [**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 complet à mode glissant », Mémoire de Magister de l'Université A. Mira Bejaia, 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.
- [**Ber 02**] M .Bernard, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, X. Roboam, S. Astier, B. Dakyo, C. Nichita, « État de l'art dans les aérogénérateurs électriques », Conférence en France, 2002.
- [**Bon 98**] J. Bonal G. Séguier, « Entraînements électriques à vitesse variable», volume 2 Edition, la voisier, France 1998.
- [**Boy 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, France, 2006.
- [**Cam 03**] H. Camblong, « Minimisation de l'Impact des Perturbations d'Origine Eolienne dans la Génération d'Electricité par des Aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, France, 2003.
- [**Can 00**] C. Canudas, « Modélisation, contrôle vectoriel et DTC, Commande des machine asynchrone », Edition 1, Hermès Science Europe, 2000.
- [**Cha 02**] L. Chang, « Systèmes de conversion de l'énergie éolienne », IEEE Canadian review - Summer / Eté 2002, pp. 1-5.
- [**Cha 90**] Chatlin, « Machine électrique », Presses Polytechnique Normandes, France, 1990.
- [**Che 10**] N. Cherifa, « Conversion d'énergie produit par des générateurs éoliens », Mémoire de Magister en Electrotechnique l'Université de Constantine, 2010.

- [Car 95] J. Caron, .T. Hautier, « Modélisation et commande de la machine asynchrone », Edition TECHNIP, France, 1995.
- [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, Lille, France, 2007.
- [Den 06] R. Denis, « Simulation of a Doubly Fed Induction Generator used in an Autonomous Variable Speed Hydro Turbine with Maximum Power Point Tracking Control», Portoroz, Slovenia EPE- PEMC, 2006.
- [Dio 99] A. Diop, « Contribution au développement d'un simulateur électromécanique d'aérogénérateur », Thèse de Doctorat, Université du Havre, France, 1999.
- [Dun 98] P. Dunsy, « L'énergie éolienne : choix stratégique pour une qoute-part québécoire », Rapport d'expert pour le groupement National des Conseils Régionaux de l'environnement Mai 1998.
- [Dri 05] S. Drid, « Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'une machine à induction, double alimentée à flux orienté avec optimisation de la structure d'alimentation : Théorie et Expérimentation » ; Thèse de Doctorat, Université de Batna, 2005.
- [El-Aim 02] S. El Aimani, B. François et B. Robyns, « Modélisation de générateurs éoliens à vitesse variable connectés a un bus continu commun » FIER, Tome II, Tétouane, Maroc, 8-10 Mai 2002, pp. 356-362.
- [El-Aim 04] S. El Aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau moyenne tension », Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille (ECL) Cohabité avec l'Université des Sciences et Technologie de Lille 1 (USTL), Lille, France, 2004.
- [Elb 06] A. Elbacha, M. T. Lamchichi, M. Cherkaoui, « Contrôle direct de couple d'une machine asynchrone, système de régulation de vitesse avec antiemballement», Physical and Chemical News, ISSN 1114-3800, 2006, pp.128-134.
- [Gal 06] R. Galindo, «Two families of sliding Mode Controllers for a Doubly – Fed Induction Generator in a Generation System », Proceedings IEEE Conference, 2006.
- [Ham 08] I. Hamzaoui, « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur », Mémoire de Magistère, ENP, Janvier 2008.
- [Har 10] N. Harfia, « Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens », Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine, Algérie, 2010.
- [Idj 10] K. Idjdarene, « Contribution à l'étude et la commande de génératrice asynchrone à cage dédiées à des centrales électrique éolienne autonomes », Thèse de Doctorat en cotutelle entre l'Université A. Mira de Bejaia (Algérie) et l'Université Lille 1 (France), 2010.

- [Iva 04] M. Ivan, «Modélisation et réalisation d'une chaîne de conversion éolienne petite puissance », journées des Doctorants, Université de Montpellier, France, 2004.
- [Khe 07] L. Khettache, « Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimentée, Mémoire de Magister Université de Batna 2007.
- [Lav 04] N. Laverdure, D. Roye, S. Bacha, R. Belhomme, « Technologie des systèmes éolienne intégration dans les réseaux électrique », Revenue 3ie, n°39, pp .14-25, Décembre 2004.
- [Lar 05] J. Larouche, « électronique de puissance », Edition Dunod, France 2005.
- [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, Lille, France, 2004.
- [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.
- [Mai 04] D. Daizi, « Commande direct du couple d'un moteur synchrone à reluctance variable par dsp », Mémoire d'Ingénieur en Génie électrique, 2004.
- [Mar 97] J. Martin, « Energies éoliennes », Techniques de l'Ingénieur, Traite de Génie énergétique vol. 85851-88521,1997
- [Men 04] I. Meny, « Modélisation et réalisation d'une chaîne de conversion éolienne petite puissance», Laboratoire d'Electronique de Montpellier (LEM), 2004.
- [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, Toulouse, France, 2005.
- [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.
- [Pen 01] R. Pena .R. Cardenas, R. Blasco, G .Asher ,J .claire, « A cage Induction Generator Using Back to Back PWM converters for variable speed Grid connected Wind Energy systemI » n dustial Electronics society.IECON'01. The 27<sup>th</sup> Annual conference of the IEEE volume 2.29 Nov-2 Décembre, 2001 Page(s):1376 vol.2, 2001.
- [Pen 96] R. Pena , J.C. 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 », IEE Proc-Electr, Power Appl, vol 143, No 5, September 1996.
- [Poi 03] F. Poitier, « Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne », Thèse de Doctorat, Université de Nantes, décembre 2003.

[Pol 05] H. Polinder, Sjoerd W. H de Haan, maxime R. Dubois, G. Johannes, « Basic opération principales and electrical conversion systems of wind turbines », Epe journal, vol.15 n°4 Décembre 2005, pp.43- 50.

[Rek 04] D. Rekioua, T. Rekioua et S. Alloune, « Switching Strategies in Direct Torque Control of Induction Machine: Modelling and Simulation », International Conference Modelling and Simulation (MS'2004), Lyon, France, 4-7 Juillet 2004, pp. 313-321.

[Rek 07] D. Rekioua, D. Aouzellag, S. Taraft, « Etude des performances de la MADA dans une éolienne à vitesse variable connectée au réseau », ICRE'07 University of Bejaia, 2007 ; pp 1-6

[Rob 06] C. Robyns, A. Davigny, C. Saudemont, A. Ansel, V. Courtecuisse, B. François, S. Plume, J. Deuse, « Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie » actes des journées 2006 de la section élektrotechnique du club EEA.

[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 (APEC'03), Eighteenth Annual IEEE, vol. 2, Miami Beach, 9-13 Fevrier 2003, pp. 846-852.

[Sin 10] A. Tchapo Singo, « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », Thèse de Doctorat l'Université Henri Poincaré, Nancy-I Soutenue publiquement 2010.

[Tou 99] A. Tounzi, « Utilisation de l'énergie éolienne dans la production de l'électricité », Journées du club EEA, 28-29 Janvier, 1999, Paris, France, pp. 1-14.

[Zol 97] M. R. Zoldghadri, «Contrôle direct de couple des actionneurs asynchrone », Thèse Doctorat de l'Institut Nationale Polytechnique de Grenoble, France, 1997.

#### Sites web

[Rob 13] B. Robyns (responsable) et S. Labrique (réalisation), site: [www.e-lee.net](http://www.e-lee.net), « composante classiques d'une éolienne », consulté février 2013.

[Win 13] Site: [www.Windpower.dk](http://www.Windpower.dk) – Site Web sur l'énergie éolienne au Danemark, consulté février 2013.