

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université A. Mira de Béjaïa  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Électrique

## Mémoire de Fin d'Étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master 2

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Commande des systèmes électriques

## Thème

---

---

Commande par mode glissant d'une  
génératrice asynchrone

---

---

Présenté par :  
Yacine DJEMAA  
Ferhat KERNOU

Encadré par :  
M<sup>r</sup> K. IDJDARENE  
M<sup>r</sup> A. ABERBOUR

<b>Introduction Générale</b>	<b>2</b>
<b>I Généralités sur les systèmes éoliens</b>	<b>4</b>
I.1 Introduction . . . . .	4
I.2 Définition d'une éolienne . . . . .	4
I.3 Principaux composants d'une éolienne . . . . .	5
I.4 Différents types d'éoliennes . . . . .	6
I.4.1 Éoliennes à axe vertical . . . . .	6
I.4.2 Éoliennes à axe horizontal . . . . .	8
I.5 Différents types de connexion des éoliennes . . . . .	9
I.5.1 Les éoliennes connectées au réseau . . . . .	9
I.5.1.1 Éoliennes à vitesse fixe . . . . .	9
I.5.1.2 Éoliennes à vitesse variable . . . . .	10
I.5.1.2.1 Machine asynchrone à cage . . . . .	11
I.5.1.2.2 Machine asynchrone à double alimentation . . . . .	12
I.5.1.2.3 Machine synchrone . . . . .	13
I.5.2 Éolienne autonome . . . . .	14
I.5.2.1 Machine synchrone . . . . .	14
I.5.2.1.1 Machine synchrone à rotor bobiné . . . . .	14
I.5.2.1.2 Machine synchrone à aimants permanents . . . . .	15
I.5.2.2 Machine asynchrone à cage . . . . .	15
I.6 Différentes structures d'une machine asynchrone auto-excitée . . . . .	15

I.6.1	Machine asynchrone auto-excitée par un seul condensateur fixe . . . . .	15
I.6.2	Machine asynchrone auto-excitée par une batterie de condensateurs fixes	16
I.6.3	Machine asynchrone auto-excitée par une batterie de condensateurs fixes avec un système de compensation . . . . .	17
I.6.3.1	Capacités de compensation en série . . . . .	17
I.6.3.2	Batterie de condensateur commandés . . . . .	18
I.7	Configuration avec convertisseur unidirectionnel (redresseur à diodes ou mixte) .	19
I.8	Configuration avec convertisseur bidirectionnel (convertisseur à MLI) . . . . .	20
I.9	Commande d'une génératrice asynchrone . . . . .	20
I.9.1	Commande directe du couple (DTC) . . . . .	20
I.9.2	Commande vectorielle . . . . .	21
I.9.3	Commandes par mode glissant(CMG) . . . . .	22
I.9.3.1	Conception de la commande par mode de glissant . . . . .	22
I.9.3.2	Condition de convergence et d'existence . . . . .	22
I.9.3.3	Calcul de la commande . . . . .	23
I.10	Conclusion . . . . .	23
<b>II</b>	<b>Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écoreuil</b>	<b>24</b>
II.1	Introduction . . . . .	24
II.2	Principe de fonctionnement d'une génératrice asynchrone à cage d'écoreuil . . .	25
II.3	Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écoreuil . . . . .	25
II.3.1	Équations générales de la machine asynchrone à cage d'écoreuil . . . . .	25
II.4	Transformation de Park appliquée à la machine asynchrone à cage d'écoreuil . .	28
II.4.1	Équation électrique d'un enroulement triphasé dans les axes d et q . . . .	28
II.5	Auto-amorçage par un convertisseur statique . . . . .	30
II.5.1	Modèle mathématique de l'auto-amorçage . . . . .	31
II.5.2	Modélisation de convertisseur statique . . . . .	32
II.6	Conclusion . . . . .	35
<b>III</b>	<b>Commande Vectorielle de la Génératrice Asynchrone à cage d'écoreuil</b>	<b>36</b>
III.1	Introduction . . . . .	36
III.2	Principe de la commande vectorielle . . . . .	36

III.3	Description de la commande vectorielle . . . . .	37
III.3.1	Estimation du flux rotorique et de la pulsation statorique . . . . .	38
III.3.2	Détermination des paramètres nécessaires à la commande . . . . .	39
III.3.3	Définition de l'algorithme de commande . . . . .	39
III.4	Résultat de simulation . . . . .	41
III.4.1	Influence de la variation de la vitesse . . . . .	41
III.4.2	Influence de la variation de la charge . . . . .	45
III.5	Conclusion . . . . .	49
<b>IV</b>	<b>Commande par mode glissant</b>	<b>50</b>
IV.1	Introduction . . . . .	50
IV.2	Principe de la commande par mode glissant . . . . .	50
IV.3	Résultats de simulation . . . . .	53
IV.3.1	Influence de la variation de la vitesse . . . . .	53
IV.3.2	Influence de la variation de la charge . . . . .	58
IV.4	Conclusion . . . . .	62
	<b>Conclusion générale</b>	<b>63</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>64</b>
IV.5	Résumé . . . . .	68

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Ces dernières décennies, le besoin en électricité n'a cessé d'augmenter de jour en jour à cause de l'intense industrialisation et la multiplication des appareils électroménagers. Face à cette demande, plusieurs pays ont fait appel aux différents types de centrales électriques. Parmi elles, on trouve les centrales nucléaires qui ont l'avantage de ne pas engendrer de pollution atmosphérique, contrairement aux centrales thermiques, mais l'inconvénient de ce genre de centrale c'est le risque d'accidents nucléaires (comme fut le cas à Fukushima, Japon, 01 mars 2011), le traitement et l'enfouissement des déchets nucléaires sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive [1].

Face à ces inconvénients et de façon à limiter l'emploi de ces centrales qui ont un effet dévastateur sur la nature, certains pays se sont tournés vers de nouvelles formes d'énergies dites "renouvelables". Parmi celles-ci on trouve l'éolien qui est l'énergie d'appoint complémentaire à l'énergie fossile.

La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en génie électrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. Dans ce cadre, le présent mémoire décrit une étude sur l'utilisation des machines de type asynchrone à cage dans un système éolien. Le premier chapitre est consacré à des généralités sur le système éolien. Ces généralités sont suivies par une brève description sur la conversion électromécanique à travers les différents types de génératrices utilisées et les configurations qui leur sont associées. Enfin, on a présenté quelque stratégie de commande de ces machines.

---

Le deuxième chapitre porte sur la modélisation numérique de la machine asynchrone à cage d'écureuil, son auto-amorçage et le convertisseur statique.

Le troisième et le quatrième chapitre, quant à eux, portent sur le modèle numérique, respectivement, des deux régulateurs : le PI et le mode glissant. Puis, on finira par une comparaison entre les résultats obtenus à partir de ces deux commandes.

### I.1 Introduction

L'objectif de ce premier chapitre est de passer en relief les différentes chaînes utilisées dans la conversion de l'énergie éolienne et les stratégies de commande de ces machines, soit dans les systèmes connectés au réseau électrique ou dans les systèmes isolés et autonomes.

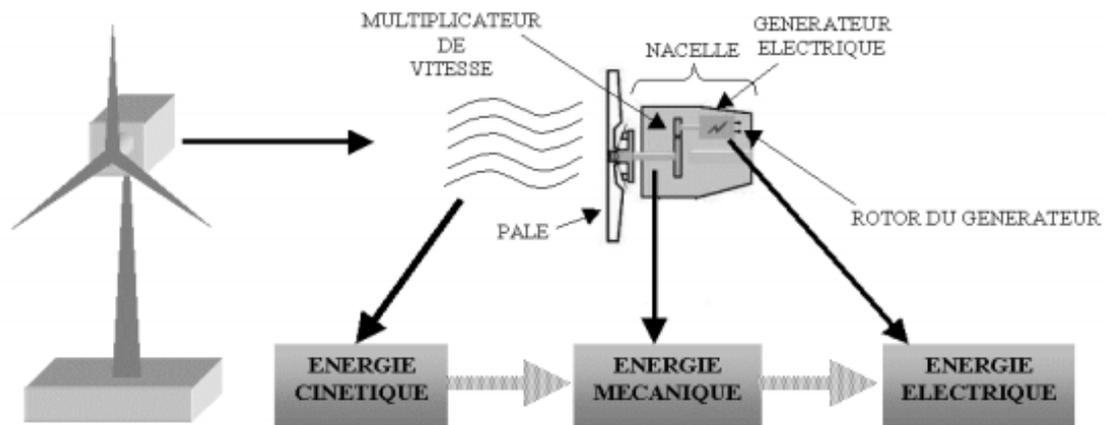
La première partie de ce chapitre est consacrée à des généralités sur le système éolien, la deuxième et troisième partie sont consacrées respectivement à la description de diverses architectures employées dans les systèmes éoliens isolés et autonomes. Pour finir, on présentera quelques stratégies de commande de ces machines.

### I.2 Définition d'une éolienne

L'éolienne comporte une machine électrique tournante en mode génératrice. Un système capable de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Elle est composée d'une manière générale d'un stator et d'un rotor auquel sont fixées les pâles. Sous l'effet de l'intensité du vent les pâles se mettent à tourner suivant le principe d'une aile d'avion. En effet, la différence de pression entre les deux faces d'une pôle crée une force aérodynamique, laquelle met en rotation le rotor de la machine en transformant une certaine partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Cette énergie est par la suite convertie en énergie électrique par la génératrice [2] (Figure I.1).

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

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



**Figure I.1** : Principe de conversion de l'énergie éolienne [2].

L'énergie éolienne est une énergie saine et elle ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [3].

### I.3 Principaux composants d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux :

- Le mât, généralement un tube d'acier, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol.
- La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres de transmission, cardan, Le frein à disque (différent du frein aérodynamique) qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur

qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales. A cela vient s'ajouter le système de refroidissement.

- Le rotor, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3.

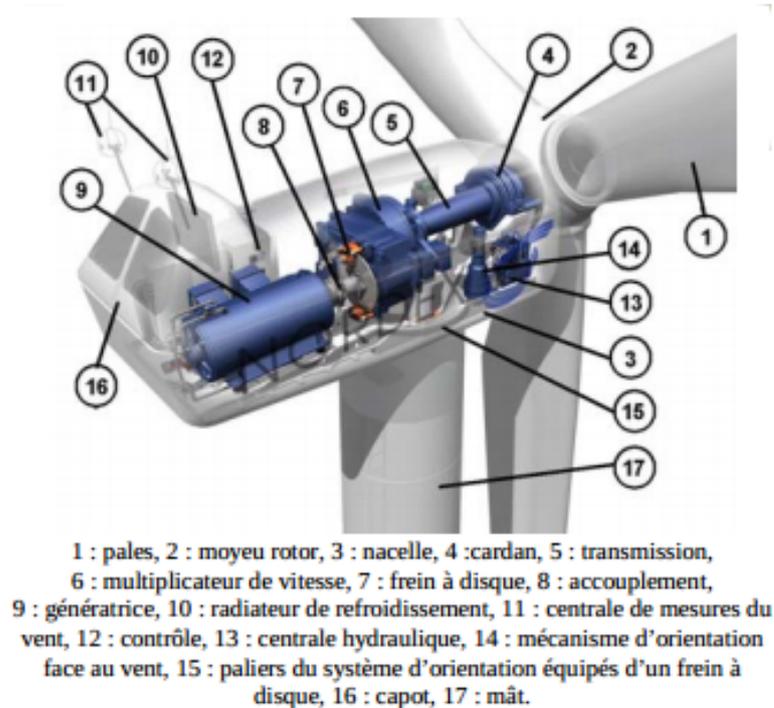


Figure I.2 : Différentes parties d'une éolienne [4].

## I.4 Différents types d'éoliennes

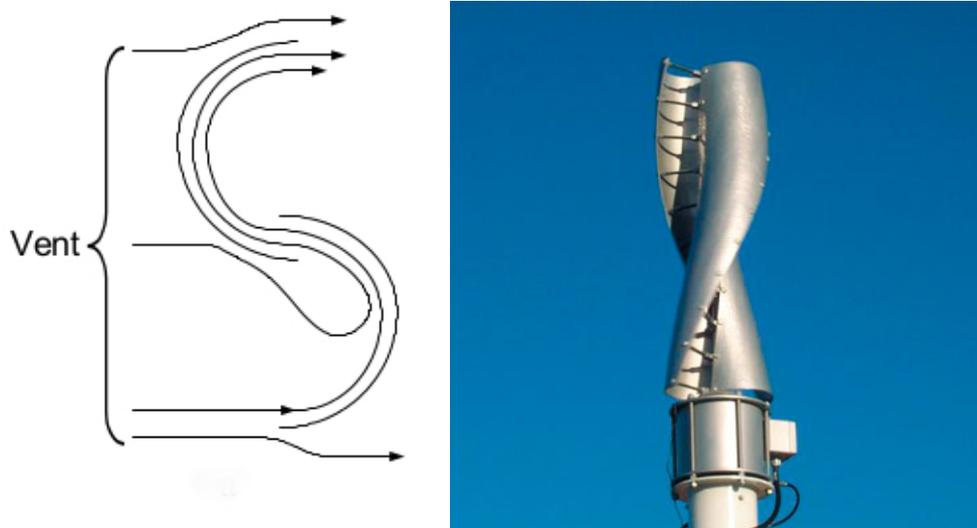
Les éoliennes se divisent en deux grandes familles. Celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

### I.4.1 Éoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement au traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation [5] :

- Le rotor de Savonius (du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement

est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur.



**Figure I.3** : Aéro-générateur à axe vertical (structure de Savonius).

- Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure la plus répandue est celle de Darrieus (ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 30). Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces de direction et d'intensité variable. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Darrieus sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur).

Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées. En effet la présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité. Elles sont de plus exposées à des problèmes d'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent. Enfin la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances élevées.

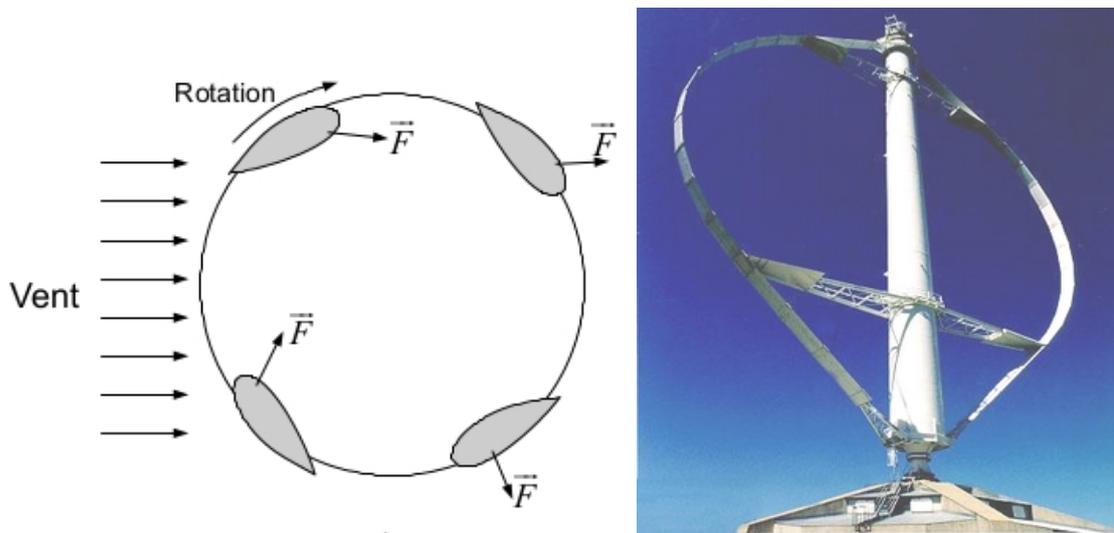


Figure I.4 : Aéro-générateur à axe vertical (structure de Darrieus).

### I.4.2 Éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamique à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [6]. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multi-critères [7]. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal.



**Figure I.5 :** Éolienne à axe horizontal

## I.5 Différents types de connexion des éoliennes

On peut distinguer deux types d'éoliennes, selon la manière dont l'énergie électrique produite par cette dernière est exploitée :

- Éoliennes connectées au réseau.
- Éoliennes autonomes.

### I.5.1 Les éoliennes connectées au réseau

L'injection de l'énergie électrique produite par les éoliennes est réalisé de deux manières différentes : des éoliennes à vitesse fixe constituées par des machines asynchrone à cage d'écureuil et des éoliennes à vitesse variable constituées par des machines asynchrone à double alimentation ou par des machines synchrone.

#### I.5.1.1 Éoliennes à vitesse fixe

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil directement couplée sur le réseau électrique qui impose sa fréquence (50Hz) aux grandeurs statoriques mais pour assurer un fonctionnement stable

du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche de synchronisme car si le glissement devient trop important les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs [2]. Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales (pitch control). Dans ces conditions, pas besoin d'éléments intermédiaires pour assurer la synchronisation des deux systèmes. Toutefois la MAS à cage d'écuriel nécessite de l'énergie réactive afin d'assurer la magnétisation de son rotor. Et pour cause de limiter l'appel d'énergie réactive au réseau, des bancs de capacités lui sont adjoint [8] comme illustré sur la (Figure I.6).

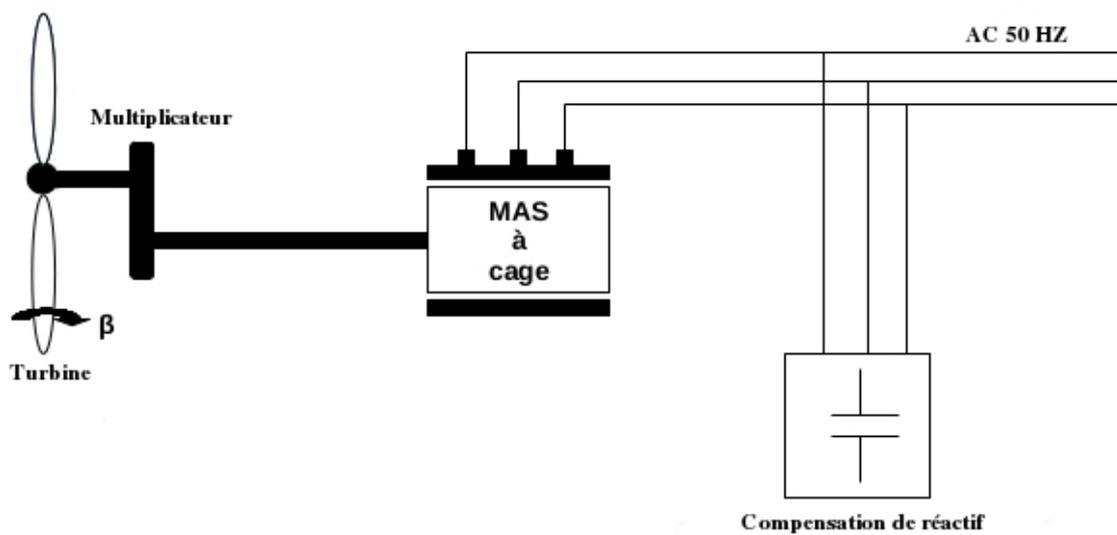


Figure I.6 : Eolienne à vitesse fixe

### I.5.1.2 Éoliennes à vitesse variable

Le système des éoliennes à vitesse fixe semble avoir quelques inconvénients à cause de l'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur asynchrone ce qui nécessite l'ajout des bancs de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée à ce réseau, en ajoutant à ça les caractéristiques aérodynamique dues à l'orientation des pales qui limite la plage de vitesse du vent exploitable. Alors l'intérêt de l'utilisation d'un générateur à vitesse de rotation variable est indéniable car il permettrait d'augmenter la production de puissance électrique, du fait de la possibilité pour le générateur de fonctionner correctement pour une large gamme de vitesses du vent [9].

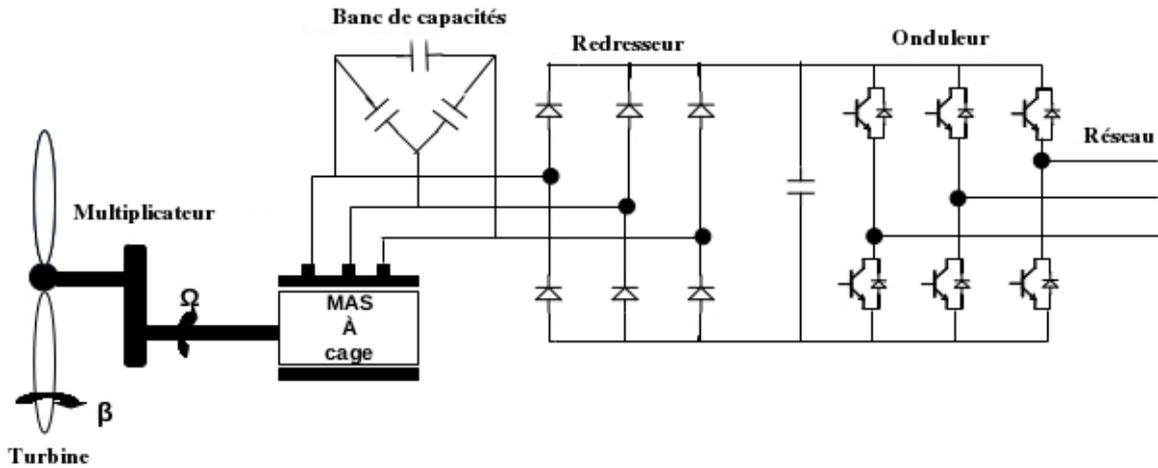
Mais cette connexion nous permet pas d'injecter l'énergie électrique produite directement

au réseau à cause de la différence des fréquences des tensions statoriques par rapport à celle du réseau. Alors un découplage entre la génératrice et le réseau est nécessaire grâce à une interface d'électronique qui est constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue afin de résoudre le problème.

Dans ce mode de connexion au réseau électrique on peut utiliser différents types de machines dont on exposera quelques unes dans ce qui suit.

#### **I.5.1.2.1 Machine asynchrone à cage**

La connexion de la machine asynchrone au réseau d'une éolienne à vitesse variable est assurée par un intermédiaire d'un convertisseur qui se compose d'un redresseur et d'un onduleur. Le dispositif de base est représenté sur la (Figure I.7). En effet, quelque soit la vitesse de rotation de la machine, la tension produite est redressée et transformée en tension continue. Le fonctionnement de l'onduleur est alors classique et une commande adéquate permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau. La puissance nominale de la génératrice détermine alors la puissance maximale que peut fournir l'éolienne. Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés pour la totalité de cette puissance échangée entre la machine et le réseau. Ils représentent donc un coût important, des pertes non négligeables (jusqu'à 3% de la puissance nominale de la machine) et entraînent des perturbations qui nuisent au rendement et à la qualité de l'énergie délivrée. De plus, la présence des capacités est indispensable pour fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine. Cette énergie ne peut pas être fournie par le réseau car le redresseur est unidirectionnel. Il peut être éventuellement remplacé par un redresseur MLI à base d' IGBT, Cette solution alourdit toutefois le dispositif en terme de coût et de complexité de mise en œuvre [2]. L'ensemble de ces inconvénients n'ont pas permis un développement industriel important de ce dispositif.



**Figure I.7 :** Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur-onduleur

#### I.5.1.2.2 Machine asynchrone à double alimentation

D'après la (Figure I.8) on peut comprendre que ce mode de couplage consiste à coupler une éolienne à vitesse variable à partir de son stator et de son rotor comme suit :

- en reliant le réseau directement au stator de la machine. Car les courants statoriques sont à la fréquence du réseau électrique.
- en reliant le réseau au rotor et c'est devenu possible grâce au système balais-bague. Mais le problème qui se pose c'est que les courants rotoriques sont à fréquence variable et donc différente de celle du réseau, alors on est obligé de passer par un convertisseur électronique (redresseur MLI, onduleur MLI) avant d'injecter l'énergie électrique produite au réseau [1].

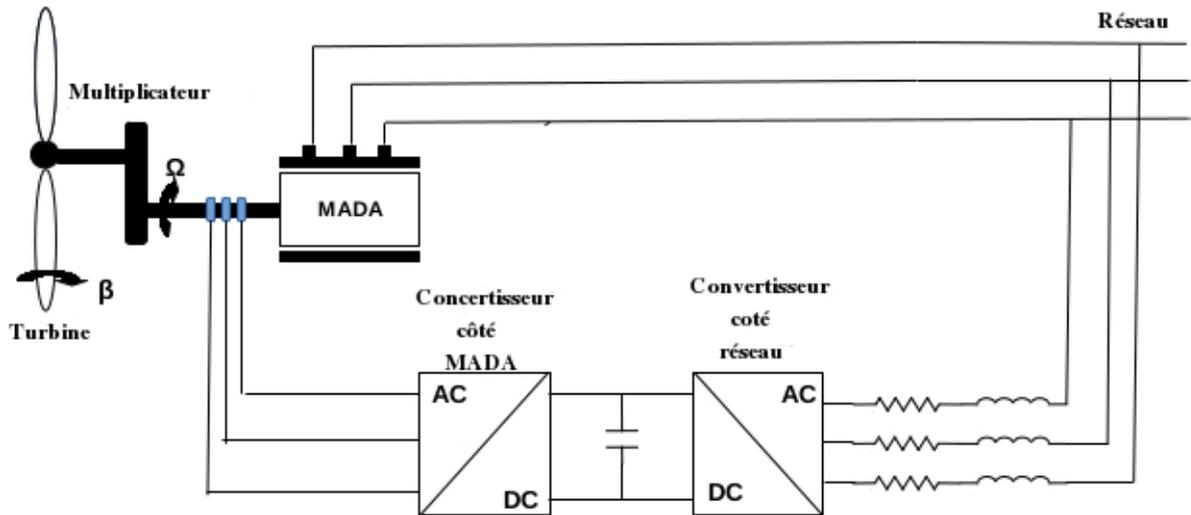


Figure I.8 : Éolienne à vitesse variable basée sur une MADA

### I.5.1.2.3 Machine synchrone

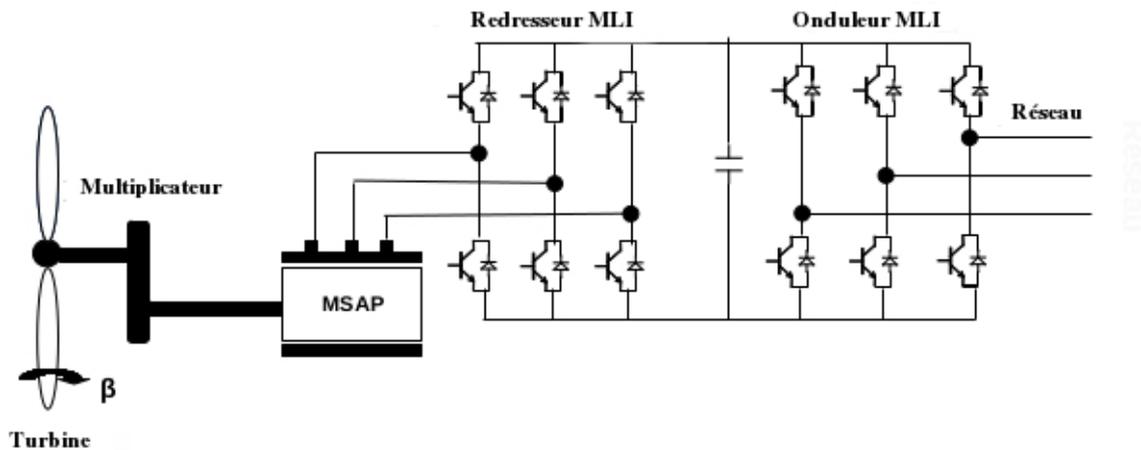
L'une des caractéristiques d'une machine synchrone, si elle possède un nombre de pôles important c'est qu'elle fournit un couple mécanique très important. Pour cette raison elle offre un avantage de se passer du multiplicateur de vitesse [13].

Dans une machine synchrone le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Dans le cas du fonctionnement à vitesse variable les fréquences statoriques sont incompatibles lors des phases de connexion au réseau.

Pour ces raisons, on place systématiquement une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau (Figure I.9) ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation de la vitesse du vent.

Dans le cas de la machine à rotor bobiné, le champ tournant rotorique est créé par un bobinage alimenté en courant continu par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau. Ce mode d'excitation entraîne la présence de contacts glissants au rotor, c'est pourquoi on le remplace souvent par des aimants permanents. Toutefois, certains d'entre eux sont réalisés à l'aide de terres rares et sont par conséquent très coûteux, bien que leur utilisation de plus en plus fréquente tende à faire baisser leur prix. De plus, les variations importantes de couple électromagnétique qui peuvent avoir lieu dans un système éolien risquent d'entraîner une démagnétisation des aimants lorsqu'ils sont constitués de matériaux classiques. Ceci contribue largement à la diminution de la durée de vie de la connexion d'une machine synchrone au

réseau [13].



**Figure I.9 :** Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'un dispositif redresseur MLI- onduleur MLI

## I.5.2 Éolienne autonome

Les éoliennes de petite puissance dont la puissance varie de quelques dizaines de watts à quelques dizaines de kilowatts (kW), sont principalement utilisées dans le cadre d'installations électriques autonomes, c'est à dire d'installations qui ne sont pas raccordées au réseau de distribution d'électricité. Ces systèmes autonomes conviennent particulièrement pour les aménagements dont le besoin en électricité est réduit ou pour les sites dont le raccordement au réseau est impossible, difficile à réaliser ou trop cher.

Dans cette partie, on parlera sur les différentes machines dans ce genre d'éolienne et la manière dont elles sont couplées.

### I.5.2.1 Machine synchrone

#### I.5.2.1.1 Machine synchrone à rotor bobiné

Le circuit d'excitation de l'inducteur demande la présence du réseau et une fourniture de la puissance réactive. Les sites isolés ne sont adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie de condensateurs ou d'une source de tension indépendante. Les systèmes de ce type possèdent aussi leurs défauts. Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier de système des bagues et balais [10].

### **I.5.2.1.2 Machine synchrone à aimants permanents**

La machine à aimants permanents nous permet de résoudre le problème souligné dans le cas des machines à rotor bobiné concernant la nécessité d'une source d'alimentation pour le circuit d'excitation de l'inducteur, alors cette solution porte un avantage essentiel pour les applications éoliennes isolées et autonomes.

### **I.5.2.2 Machine asynchrone à cage**

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en terme d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé [13]. Cela est dû au manque de contacts électriques par balais-collecteurs et d'aimants permanents. La génératrice asynchrone en fonctionnement autonome n'engendre pas sa propre énergie d'excitation. Pour cette raison, il faudra lui apporter cette énergie par une batterie de condensateurs connectés en parallèle au bobinage statorique [11].

Dans ce qui suit, nous donnons une synthèse de quelques systèmes permettant de fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la génératrice asynchrone et de stabiliser sa tension statorique.

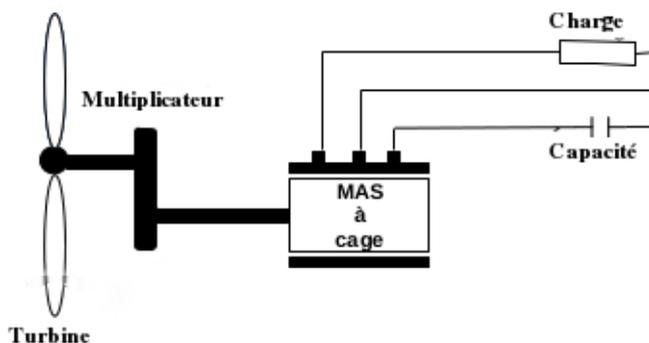
## **I.6 Différentes structures d'une machine asynchrone auto-excité**

L'utilisation de la machine asynchrone à cage connectée à des capacités a l'avantage de la simplicité de mise en œuvre et le faible coût dû à l'absence de convertisseurs statiques [15].

### **I.6.1 Machine asynchrone auto-excitée par un seul condensateur fixe**

Cette configuration consiste à alimenter des charges monophasées. Dans ce cas, une seule capacité est suffisante pour que la génératrice puisse fournir la puissance nécessaire à la charge, ce qui permet de réduire le coût total du système. Cependant, en cas de défaut dans la phase où le condensateur est connecté, ou encore dans le condensateur lui-même, la machine se démagnétise vu l'absence d'une autre source d'énergie réactive. Par ailleurs, cette configuration

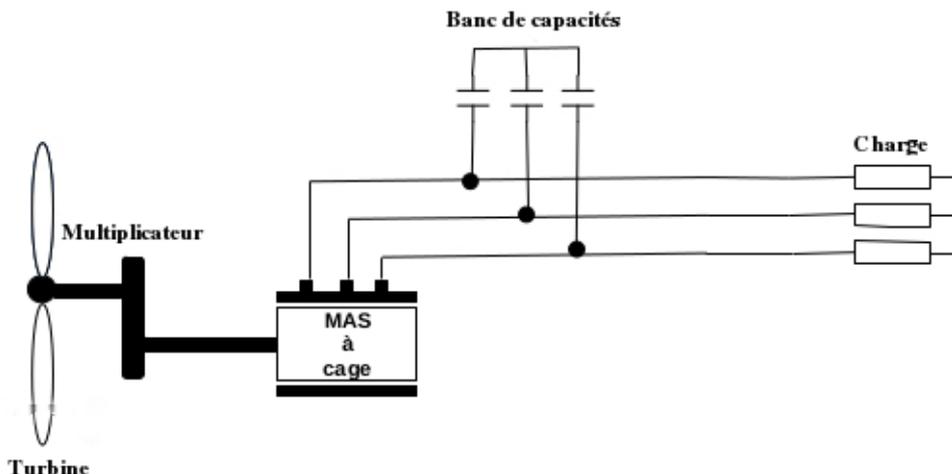
induit forcement des courants statoriques déséquilibrés [12].



**Figure I.10** : Machine asynchrone auto-excitée avec un seul condensateur

### I.6.2 Machine asynchrone auto-excitée par une batterie de condensateurs fixes

Dans cette configuration, les bobinages statoriques de la machine asynchrone sont connectés à un banc de capacité en parallèle à la charge. Cela permet d'assurer plus de sûreté de fonctionnement pour le système de production d'énergie éolienne, que la charge soit monophasé ou triphasé. En cas de défaut dans une phase ou dans un condensateur, le système peut fonctionner mais il y aura une chute de tension due à la diminution de la magnétisation de la génératrice. Cette configuration peut aussi induire des courants statoriques déséquilibrés dans le cas de l'alimentation d'une charge monophasé ou triphasé déséquilibrée.



**Figure I.11** : Machine asynchrone auto-excitée avec une batterie de condensateurs.

### I.6.3 Machine asynchrone auto-excitée par une batterie de condensateurs fixes avec un système de compensation

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

#### I.6.3.1 Capacités de compensation en série

La structure la plus couramment utilisée consiste à connecter, en plus des capacités parallèles, d'autres capacités en série avec la charge [16-18] ou avec le stator de la machine, cette approche permet de diminuer la chute de tension en charge [18], mais elle limite les possibilités d'une régulation continue de la tension sur une large gamme de charges et/ou de vitesses [18-19].

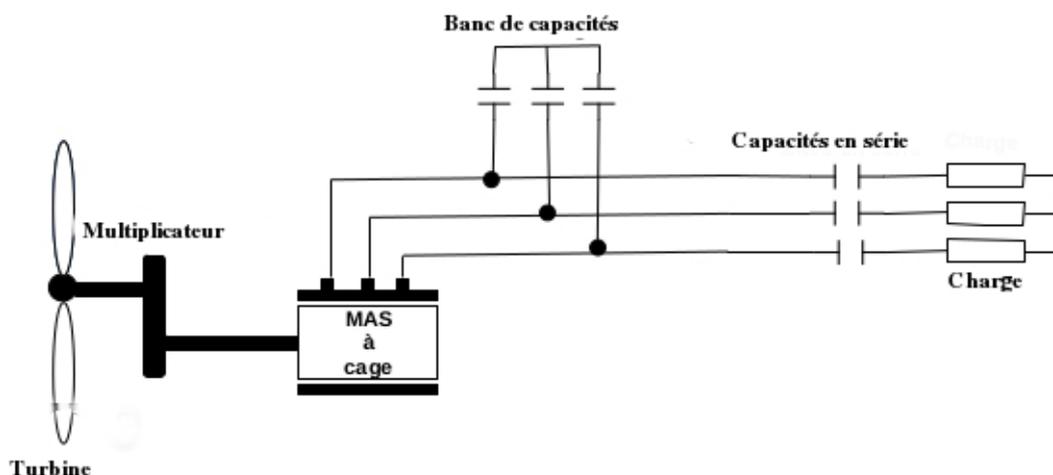


Figure I.12 : Machine asynchrone auto-excitée avec compensation série.

### I.6.3.2 Batterie de condensateur commandés

Cette configuration est basée sur le contrôle de la capacité d'excitation. Il s'agit d'un dispositif constitué de capacité fixes en parallèle avec des interrupteurs GTO monté en tête bêche. La valeur apparente de la capacité peut être alors ajustée périodiquement par le contrôle du temps tout en étant connectée au circuit.

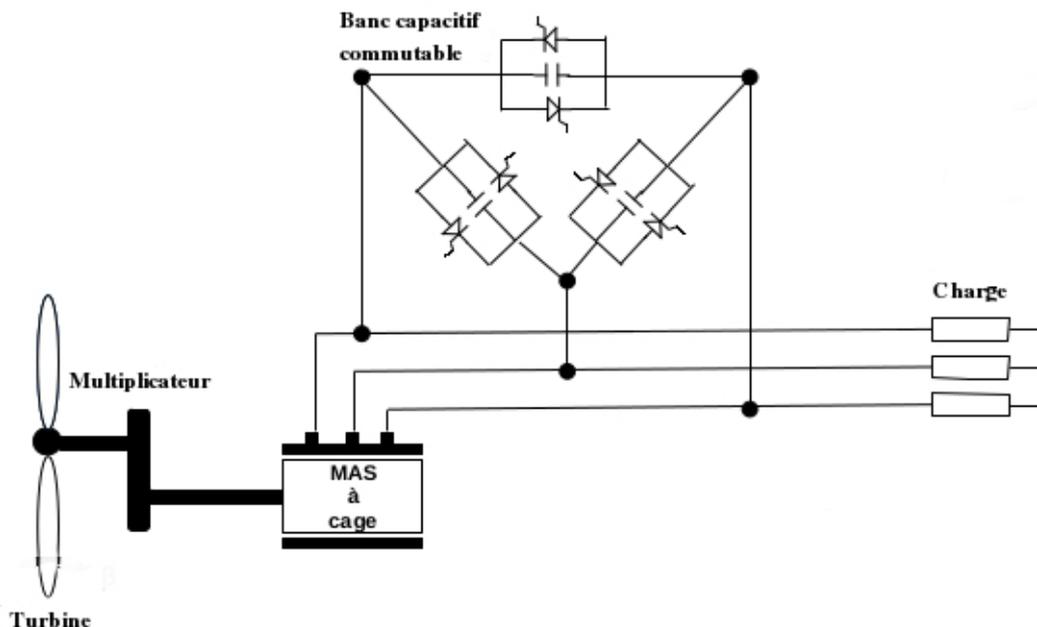
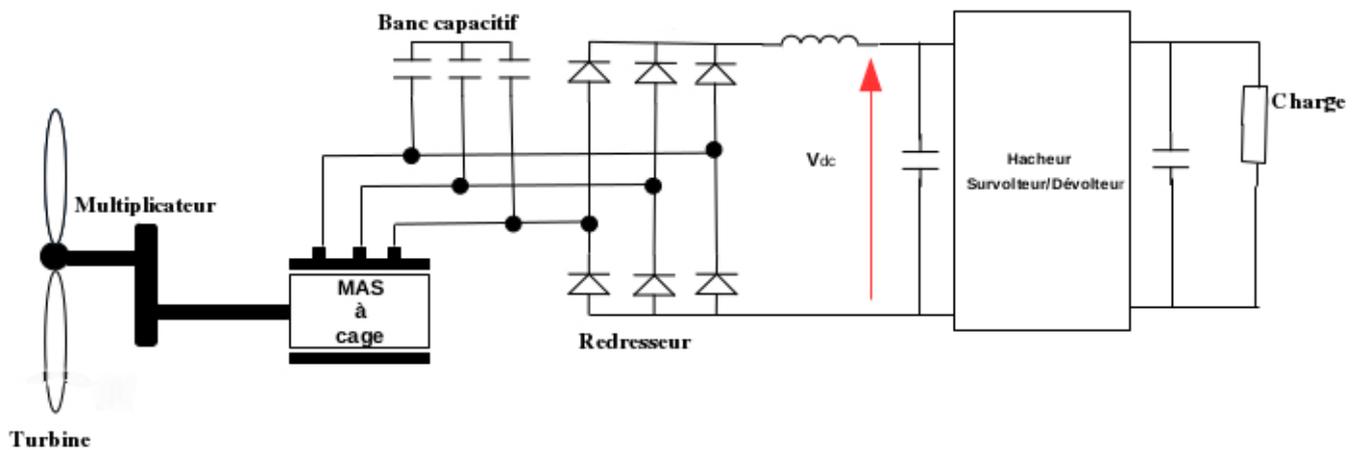


Figure I.13 : Machine asynchrone auto-excitée avec une batterie de condensateurs et gradateur.

Ce dispositif se comporte comme un condensateur variable, de façon à créer une source d'énergie réactive variable permettant d'atténuer les variations de tension lors de la perturbation de la vitesse du vent ou de la charge. Cependant, en cas de décharge totale du dispositif de stockage, il ne peut plus y avoir production d'énergie.

## I.7 Configuration avec convertisseur unidirectionnel (redresseur à diodes ou mixte)

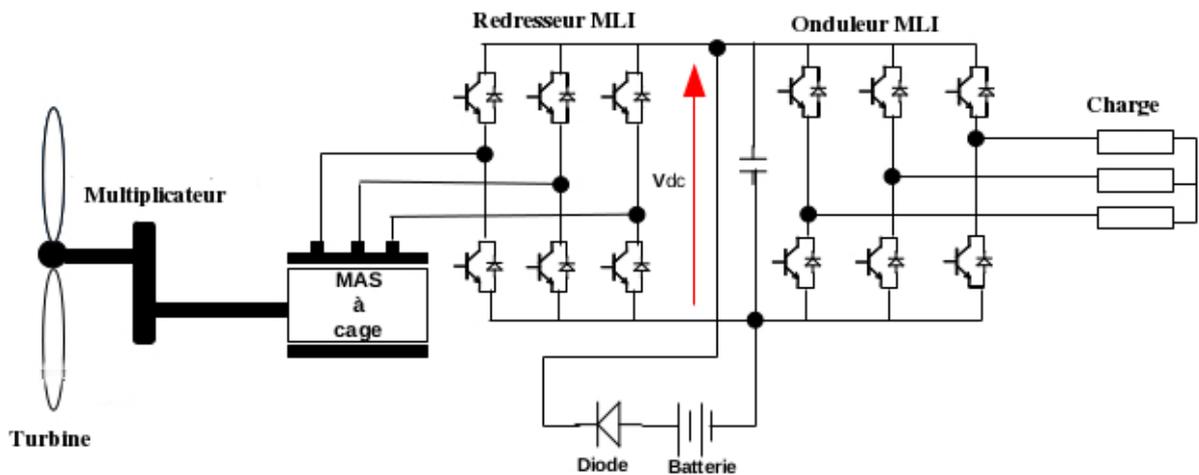
Dans cette configuration (Figure I.14), les convertisseurs d'énergie sont un redresseur de type PD3 et un hacheur de type survolteur/dévolteur. Le but de cette conversion est de maintenir la tension à une valeur constante aux bornes de la charge et ceci lorsque le système est placé dans un environnement dynamique où la vitesse et la charge changent. On peut réaliser ce maintien en agissant sur le rapport cyclique du signal commandant l'interrupteur du convertisseur DC-DC à la valeur adéquate [11]. Mais il ne permet pas de contrôler la magnétisation de la machine et son coût global reste élevé à cause des capacités pour la magnétisation et l'utilisation de deux convertisseurs et un système de filtrage.



**Figure I.14 :** Machine asynchrone connectée à une éolienne autonome par l'intermédiaire d'un ensemble de pont à diodes et hacheur

## I.8 Configuration avec convertisseur bidirectionnel (convertisseur à MLI)

La structure représentée dans la (Figure I.15) est constituée d'une génératrice asynchrone connectée à un redresseur et un onduleur de tension à MLI. Cette configuration permet le contrôle, par une commande adaptée, de la magnétisation et de la tension à la sortie de la génératrice asynchrone lorsque la vitesse du rotor et la charge électrique sont variables.



**Figure I.15 :** Machine asynchrone connectée à une éolienne autonome par l'intermédiaire d'un convertisseur MLI

L'insertion de convertisseurs statiques, entre la génératrice et sa charge, permet d'avoir de nouveaux degrés de liberté. Ces derniers, utilisés dans le cas d'une commande adaptée aboutissent à une exploitation de l'éolienne. Pour notre cas d'étude et dans la suite du manuscrit, on a choisi cette configuration.

## I.9 Commande d'une génératrice asynchrone

### I.9.1 Commande directe du couple (DTC)

La commande directe du couple (DTC) a pour objectif la régulation directe du couple de la machine, par l'application des différents vecteurs de tensions de l'onduleur. Les variables contrôlées sont le flux statorique et le couple électromagnétique qui sont habituellement com-

mandés par des régulateurs à hystérésis. Il s'agit de maintenir ces deux grandeurs instantanées à l'intérieur d'une bande autour de la valeur désirée. La sortie de ces régulateurs détermine le vecteur optimal de tension de l'onduleur à appliquer à chaque instant de commutation [20].

En revanche, le flux et le couple de la machine doivent être estimés ou observés. La synthèse de tels estimateurs n'est pas évident et constitue une difficulté pour la mise en œuvre de cette commande [21].

## I.9.2 Commande vectorielle

La commande par orientation de flux se base sur l'idée de ramener le comportement de la machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu.

Alors le principe de cette méthode c'est d'aboutir à un modèle simple de la machine asynchrone qui rend compte de la commande séparée de la grandeur flux  $\Phi$  et de la grandeur courant  $I$ , générateur du couple.

Il s'agira donc de retrouver la quadrature entre  $I$  et le flux, naturellement découplés pour une machine à courant continu (courant d'excitation producteur de flux, et courant induit producteur de couple). La difficulté va résider justement dans le fait que, pour une machine à induction, il est difficile de distinguer le courant producteur du couple du courant producteur de flux, fortement couplés. La méthode du flux orienté consiste à choisir un système d'axes  $(d,q)$ , repère tournant biphasé orienté sur  $\Phi_r$  (flux rotorique) [22-24] ou  $\Phi_s$  (flux statorique) [25] et ainsi réaliser le découplage entre couple et le flux.

L'objectif de la commande est de contrôler la tension du bus continu à la sortie du redresseur  $V_{dc}$ . La mise en œuvre de la commande nécessite d'estimer le flux rotorique la mesure du couple électromagnétique et le calcul de la pulsation statorique.

Les lois de commande classique de type PI donnent de bons résultats dans le cas des systèmes linéaires à paramètres constants. Ces lois peuvent être sensible aux variations des paramètres du système et aux perturbations. Alors on doit faire appel à des lois de commande qui sont insensibles aux variations de paramètres, aux perturbations. Parmi ces lois on peut citer la commande par logique floue [26,27] et la commande par mode glissant [28-30].

Dans notre cas d'étude on s'intéresse à la commande par mode glissant.

### I.9.3 Commandes par mode glissant(CMG)

La commande par mode glissant a connu un essor considérable durant les dernières décennies. Ceci est dû principalement à la propriété de convergence rapide, ainsi, que la grande robustesse par rapport aux incertitudes de modélisation et aux perturbations extérieures.

L'intérêt de la commande par mode glissement c'est qu'elle nous permet de commander des systèmes à structure variable. Elle consiste à amener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une commutation appropriée autour de celle-ci jusqu'au point d'équilibre, d'où le phénomène de glissement [30].

#### I.9.3.1 Conception de la commande par mode de glissant

La structure de la commande par mode glissant comporte deux parties : une partie continue représentant la dynamique du système durant le mode de glissement, et une autre discontinue représentant la dynamique du système durant le mode de convergence. Cette dernière est importante dans la commande non linéaire, car elle a pour rôle d'éliminer les effets d'imprécisions et des perturbations sur le modèle.

La conception de la commande peut être effectuée en trois étapes principales très dépendantes l'une de l'autre :

- L'établissement des conditions d'existence.
- Détermination de la loi de commande.

#### I.9.3.2 Condition de convergence et d'existence

Les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment de la perturbation. Il existe deux considérations pour assurer le mode de convergence.

- La fonction discrète de commutation :

C'est la première condition de convergence, elle est proposée et étudiée par EMILYANOV et UTKIN . Il s'agit de donner à la surface une dynamique convergente vers zéro.

Elle est donnée par :

$$S(\dot{x}).S(x) < 0$$

- La fonction de LYAPUNOV :

La fonction de LYAPUNOV est une fonction scalaire positive ( $V(x) > 0$ ) pour les

variables d'état du système. La loi de commande doit faire décroître cette fonction ( $V(\dot{x}) < 0$ ). L'idée est de choisir une fonction scalaire  $S(x)$  pour garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence.

### I.9.3.3 Calcul de la commande

Lorsque le régime glissant est atteint, la dynamique du système est indépendante de la loi de commande qui n'a pour but que de maintenir les conditions de glissement (l'attractivité de la surface), c'est pour cette raison que la surface est déterminée indépendamment de la commande.

Maintenant, il reste à déterminer la commande nécessaire pour attirer la trajectoire d'état vers la surface et ensuite vers son point d'équilibre en maintenant les conditions d'existence du mode de glissement. Dans ce cas, la structure d'un contrôleur par mode de glissement est constituée de deux parties, une concernant la linéarisation exacte ( $u_{eq}$ ) et l'autre stabilisante ( $u_n$ ).

$$u = u_{eq} + u_n \quad (\text{I.1})$$

$u_{eq}$  elle sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement  $S(x) = 0$ . La commande équivalente est déduite, en considérant que la dérivée de la surface est nulle  $\dot{S}(x) = 0$ .

Elle peut être aussi interprétée autrement comme étant une valeur moyenne que prend la commande lors de la commutation rapide entre les valeurs  $u_{min}$  et  $u_{max}$ .

La commande discrète  $u_n$  est déterminée pour vérifier la condition de convergence en dépit de l'imprécision sur les paramètres du modèle du système.

## I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, on a passé en relief les systèmes éoliens, leur fonctionnement, leur composition et les différents qui en existe. Puis, on a présenté les machines électriques et leurs convertisseurs associés. Finalement, on a cité brièvement quelques techniques de commande de ces dernières. A travers l'étude faite au cours de ce chapitre on a opté pour la machine asynchrone à cage vu de ses avantages. On a conclu aussi que la meilleure configuration est celle avec convertisseur bidirectionnel.

## CHAPITRE II

# MODÉLISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE À CAGE

## D'ÉCUREUIL

### II.1 Introduction

En général les machines sont connues par leurs enroulements et leurs géométries propres trop complexe, pour se prêter à une analyse tenant compte de leurs configurations exactes, on doit donc développer pour chaque type un modèle dont le comportement soit le plus proche possible du système réel.

La modélisation des machines électriques est une phase primordiale pour l'observation et l'analyse des différentes évolutions de ses grandeurs électromécaniques d'une part et d'autre part pour l'élaboration des lois de commande.

Pour obtenir le modèle d'un système, trois tâches doivent être accomplies :

- Choisir le modèle.
- Déterminer ses paramètres.
- Et en fin, vérifier sa validité.

Ce chapitre comportera deux parties. La première partie donnera un modèle mathématique de la machine asynchrone à cage dans le repère triphasé puis biphasé selon la transformation de Park.

## II.2 Principe de fonctionnement d'une génératrice asynchrone à cage d'écureuil

La machine asynchrone, connue également sous le nom de machine à induction, est constituée d'un stator qui est formé d'une carcasse ferromagnétique qui contient trois enroulements électriques. C'est la partie fixe du moteur. Et un rotor C'est l'élément en rotation qui transmet la puissance mécanique. Il se trouve au centre du moteur sous forme d'une cage d'écureuil d'où son nom : machine à cage d'écureuil qui est soumise au champ magnétique créé par le stator.

## II.3 Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil

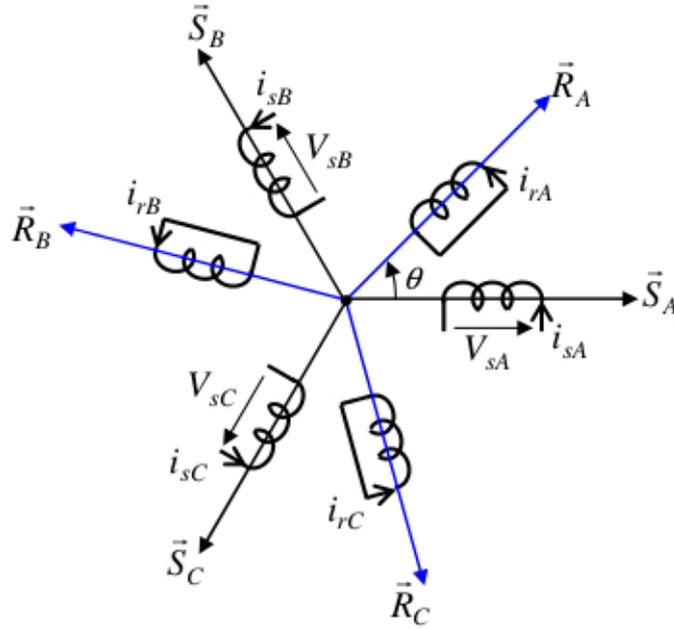
### II.3.1 Équations générales de la machine asynchrone à cage d'écureuil

Afin de mieux étudier notre machine on est obligé de décrire notre système réel sous forme des équations mathématiques qui va nous permettre de créer un modèle prêt à l'étude, mais le problème avec les modèles réels c'est leur complexité, alors on doit poser quelques hypothèses simplificatrices [31] :

- entrefer constant,
- effet des encoches négligé,
- distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer,
- circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante,
- pertes ferromagnétiques négligeables,
- l'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte.

Parmi les conséquences importantes des hypothèses, on peut citer :

- l'additivité des flux,
- la constance des inductances propres,
- la loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statiques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.



**Figure II.1** : Représentation des enroulements de la machine dans l'espace électrique.

Pour écrire les équations mathématiques de la machine on se basera sur la représentation illustrée sur la figure (II.1) qui représente les six enroulements de la machine dans l'espace électrique, l'angle  $\theta$  repère l'axe de la phase rotorique de référence  $\vec{R}_A$  par rapport à l'axe fixe de la phase statorique de référence  $\vec{S}_A$ . En désignant par :

s, r : indices respectifs du stator et du rotor,

p : nombre de paires de pôles,

$R_s, l_s$  : résistance et inductance propre d'une phase statorique,

$M_s$  : coefficient de mutuelle inductance entre deux phases du stator,

$M_r$  : coefficient de mutuelle inductance entre deux phases du rotor,

$M_{sr}$  : maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor ; il est obtenu lorsque les axes sont alignés,

$V_{sABC}$  : tensions des trois phases statoriques,

$i_{sABC}$  : courants qui traversent les trois phases statoriques,

$V_{rABC}$  : tensions aux trois phases rotorique,

$i_{rABC}$  : courants qui traversent les trois phases rotorique,

$\phi_{sABC}$  : flux totaux à travers ses enroulements statoriques,

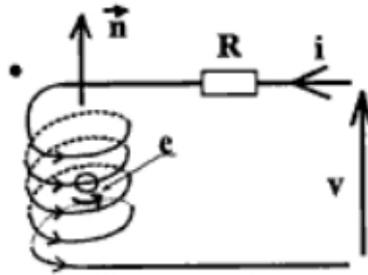
$\phi_{rABC}$  : flux totaux à travers ses enroulements rotoriques,

$\theta$  : angle électrique entre  $\vec{R}_A$  et  $\vec{S}_A$ ,

Application de la loi de Faraday à la machine asynchrone à cage d'écureuil :

La représentation de l'un des six enroulements statoriques ou rotorique de la machine est illustrée à la figure (II.2). En appliquant la loi des mailles on aura la relation suivante :

$$V = Ri + \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{II.1})$$



**Figure II.2 :** Modèle d'une phase avec force électromotrice

On déduit pour l'ensemble des phases.

statorique :

$$\begin{bmatrix} V_{sA} \\ V_{sB} \\ V_{sC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sA} \\ i_{sB} \\ i_{sC} \end{bmatrix} + (d/dt) \begin{bmatrix} \phi_{sA} \\ \phi_{sB} \\ \phi_{sC} \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

ou :

$$[V_{sABC}] = [R_s][i_{sABC}] + (d/dt)[\phi_{sABC}] \quad (\text{II.3})$$

et rotorique :

$$\begin{bmatrix} V_{rA} \\ V_{rB} \\ V_{rC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rA} \\ i_{rB} \\ i_{rC} \end{bmatrix} + (d/dt) \begin{bmatrix} \phi_{rA} \\ \phi_{rB} \\ \phi_{rC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

ou :

$$[V_{rABC}] = [R_r][i_{rABC}] + (d/dt)[\phi_{rABC}] = [0] \quad (\text{II.5})$$

Une matrice des inductances  $[L(\theta)]$  établit la relation entre les flux et les courants ; dont la moitié dépend du temp, par l'intermédiaire de  $\theta$  (position de rotor par rapport au stator).

La matrice des flux réels fait apparaître quatre sous-matrices d'induction :

$$\begin{bmatrix} \phi_{sABC} \\ \phi_{rABC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sABC} \\ i_{rABC} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

En remplaçant l'équation (II.6) dans (II.3) et (II.5) on obtient les équations suivantes :

$$[V_{sABC}] = [R_s][i_{sABC}] + (d/dt)[L_s][i_{sABC}] + [M_{sr}][i_{rABC}] \quad (\text{II.7})$$

$$[V_{rABC}] = [R_r][i_{rABC}] + (d/dt)[M_{rs}][i_{sABC}] + [L_r][i_{rABC}] \quad (\text{II.8})$$

## II.4 Transformation de Park appliquée à la machine asynchrone à cage d'écureuil

### II.4.1 Équation électrique d'un enroulement triphasé dans les axes d et q

Le passage du système triphasé au système biphasé est assuré par la matrice de passage directe et inverse :

$$[V_{dq0}] = [P][V_{ABC}] \quad (\text{II.9})$$

$$[V_{ABS}] = [P]^{-1}[V_{dq0}] \quad (\text{II.10})$$

tel-que :

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

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

$$[V_{ABC}] = [R][i_{ABC}] + (d/dt)[\phi_{ABC}] \quad (\text{II.13})$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

La transformation [P] est appliquée à l'équation (II.13) :

$$[P]^{-1}[V_{dqo}] = [R][P]^{-1}[i_{dqo}] + (d/dt)[[P]^{-1}[\phi_{dqo}]] \quad (\text{II.15})$$

En multipliant l'équation (II.15) par [P] on aura :

$$[V_{dqo}] = [R][i_{dqo}] + (d/dt)[\phi_{dqo}] + [P](d[P]^{-1}/dt)[\phi_{dqo}] \quad (\text{II.16})$$

On démontre que :

$$[P](d[P]^{-1}/dt) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} (d\Psi/dt) \quad (\text{II.17})$$

On obtient finalement le système des équations de Park qui constitue ainsi un modèle électrique dynamique pour l'enroulement diphasé équivalent :

$$V_d = ri_d + (d\phi_d/dt) - (d\Psi/dt)\phi_q \quad (\text{II.18})$$

$$V_q = ri_q + (d\phi_q/dt) + (d\Psi/dt)\phi_d \quad (\text{II.19})$$

$$V_o = ri_o + (d\phi_o/dt) \quad (\text{II.20})$$

Dans notre cas le  $\Psi$  est remplacé soit par  $\theta_s$  pour le stator, ou par  $\theta_r$  pour le rotor. On désigne par :

$\theta_s$  : l'angle électrique  $(\vec{S}_A, \vec{O}_d)$ .

$\theta_r$  : l'angle électrique  $(\vec{R}_A, \vec{O}_d)$ .

En supposant le système parfaitement équilibré, les équations (II.20) qui correspondent aux composantes homopolaires, sont identiquement nulles.

Suite à l'hypothèse de linéarité des matériaux, les flux statoriques et rotoriques s'expriment dans le repère de Park, en fonction des courants, par la relation matricielle suivante [31] :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

Avec :

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

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

$l_s$  : Inductance de fuite statorique.

$l_r$  : Inductance de fuite rotorique.

$M$  : Mutuelle inductance

L'expression du couple électromagnétique est la suivante :

$$C_{em} = p.M.(i_{rd}.i_{sq} - i_{rq}.i_{sd}) \quad (\text{II.22})$$

Qui peut s'écrire aussi :

$$C_{em} = p.\frac{M}{L_r}.\phi_{rd}.i_{sq} - \phi_{rq}.i_{sd} \quad (\text{II.23})$$

## II.5 Auto-amorçage par un convertisseur statique

Dans cette partie on exposera le modèle mathématique de l'auto-amorçage par un convertisseur statique qui nous permet à la fois de laisser passer l'énergie réactive et de maintenir constante la tension continue à sa sortie.

La commande du convertisseur induit deux degrés de liberté. Cela pourrait être l'amplitude

de la tension continue et la fréquence de référence imposée au fondamental des grandeurs statoriques.

Cependant, le système ne peut s'amorcer seul puisqu'à l'instant de la mise sous tension, aucune énergie réactive n'est disponible. On utilise alors la réversibilité du convertisseur en connectant une batterie du côté continu qui fournit le réactif durant la phase d'amorçage. Une diode découple la batterie du redresseur dès que la tension générée en sortie du redresseur est supérieure à celle côté batterie.

Dans ce qui suit, nous introduisons une synthèse de la modélisation du système d'auto-amorçage avec un convertisseur à MLI.

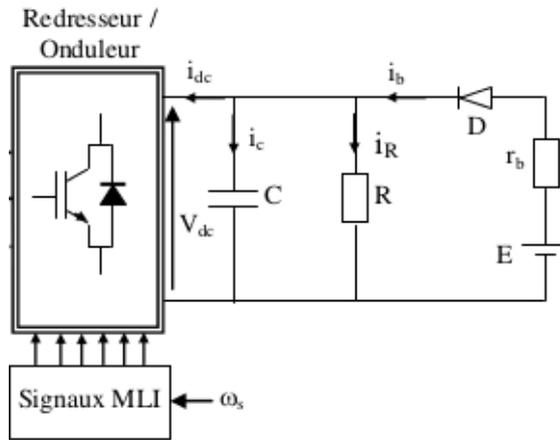


Figure II.3 : Auto-amorçage par un convertisseur à MLI

### II.5.1 Modèle mathématique de l'auto-amorçage

pour décrire les équations de l'auto-amorçage. Deux cas de figure sont à considérer :

— Lorsque la diode est passante, on peut écrire les équations suivantes :

$$i_{dc} = i_b - i_R - i_c \quad (\text{II.24})$$

$$\Rightarrow i_{dc} = \frac{E - V_{dc}}{r_b} - C \frac{dV_{dc}}{dt} - \frac{V_{dc}}{R} \quad (\text{II.25})$$

$$\Rightarrow C \frac{dV_{dc}}{dt} = -i_{dc} + \frac{E - V_{dc}}{r_b} - \frac{V_{dc}}{R} \quad (\text{II.26})$$

Par conséquent, la tension redressée  $V_{dc}$  est donnée par la relation suivante :

$$V_{dc} = \int \frac{1}{C} \left[ -i_{dc} + \frac{E - V_{dc}}{r_b} - \frac{V_{dc}}{R} \right] dt \quad (\text{II.27})$$

— Lorsque la diode se bloque :

$$i_{dc} = -i_C - i_R \quad (\text{II.28})$$

$$\Rightarrow i_{dc} = -C \frac{dV_{dc}}{dt} - \frac{V_{dc}}{R} \quad (\text{II.29})$$

$$\Rightarrow \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} \left[ -i_{dc} - \frac{V_{dc}}{R} \right] \quad (\text{II.30})$$

Dans ce cas, la tension redressée  $V_{dc}$  est donnée par la relation suivante :

$$V_{dc} = \int \frac{1}{C} \left[ -i_{dc} - \frac{V_{dc}}{R} \right] dt \quad (\text{II.31})$$

La diode est bloquée lorsque  $V_{dc} \geq E$

Avec :

$R$  : représente la résistance vue du côté continu.

$r_b$  : la résistance interne de la batterie.

$E$  : Tension aux bornes de la batterie.

$V_{dc}$  : Tension redressée.

$i_{dc}$  : Courant redressé.

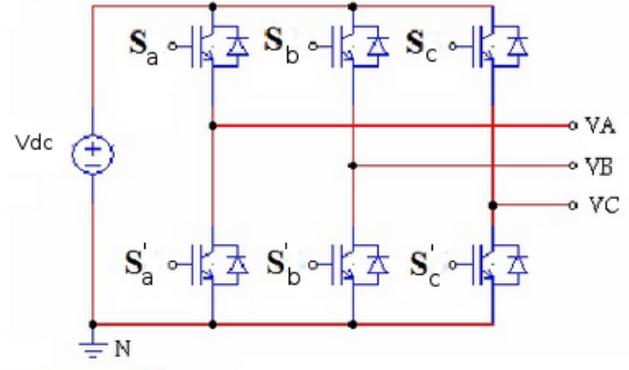
$i_c$  : Courant dans la capacité.

$i_R$  : Courant dans la charge résistive.

## II.5.2 Modélisation de convertisseur statique

### Modèle de l'onduleur

L'onduleur triphasé est illustré par son circuit de puissance dans la figure (II.4). On distingue d'une part les tensions de branche  $V_{AN}$ ,  $V_{BN}$ ,  $V_{CN}$  mesurées par rapport à la borne négative de la tension continue  $V_{dc}$ , d'autre part, il y a les tensions de phases  $V_{AN}$ ,  $V_{BN}$  et  $V_{CN}$  mesurées par rapport à un point neutre flottant N. Dans le circuit de puissance de l'onduleur triphasé, il est à noter que les états des interrupteurs d'un même bras sont complémentaires.



**Figure II.4 :** Circuit de fonctionnement de l'onduleur triphasé

En utilisant ces états des interrupteurs, nous pouvons obtenir les tensions de branche de sortie de l'onduleur mesurées par rapport à la borne négative de la tension du côté continu comme suit :

$$V_{AN} = S_a \cdot V_{dc} \quad (\text{II.32})$$

$$V_{BN} = S_b \cdot V_{dc} \quad (\text{II.33})$$

$$V_{CN} = S_c \cdot V_{dc} \quad (\text{II.34})$$

Où  $S_a$ ,  $S_b$  et  $S_c$  désignent les états des interrupteurs par un bras A, B et C respectivement.

— Les tensions composées :

$$V_{AB} = V_{AN} + V_{NB} = V_{AN} - V_{BN} = (S_a - S_b)V_{dc} \quad (\text{II.35})$$

$$V_{BC} = V_{BN} + V_{NC} = V_{BN} - V_{CN} = (S_b - S_c)V_{dc} \quad (\text{II.36})$$

$$V_{CA} = V_{CN} + V_{NA} = V_{CN} - V_{AN} = (S_c - S_a)V_{dc} \quad (\text{II.37})$$

— Les tension simples :

Les tensions simples s'obtiennent par différence de deux tensions composées :

$$V_{AB} - V_{CA} = V_{AN} - V_{BN} - V_{CN} + V_{AN} = 3V_{AN}$$

$$\Rightarrow 2V_{AN} - V_{BN} - V_{CN} = 3V_{AN}$$

Donc :

$$V_{AN} = \frac{1}{3}(2V_{AN} - V_{BN} - V_{CN}) \quad (\text{II.38})$$

De la même manière on obtient :

$$V_{BN} = \frac{1}{3}(2V_{BN} - V_{AN} - V_{CN}) \quad (\text{II.39})$$

$$V_{CN} = \frac{1}{3}(2V_{CN} - V_{AN} - V_{BN}) \quad (\text{II.40})$$

En remplaçant les équations (II.32), (II.33), (II.34) dans (II.38), (II.39), (II.40) respectivement on aura :

$$V_{AN} = \frac{1}{3}V_{dc}(2S_a - S_b - S_c) \quad (\text{II.41})$$

$$V_{BN} = \frac{1}{3}V_{dc}(2S_b - S_a - S_c) \quad (\text{II.42})$$

$$V_{CN} = \frac{1}{3}V_{dc}(2S_c - S_a - S_b) \quad (\text{II.43})$$

On pose :  $V_{AN} = V_{sa}$ ,  $V_{BN} = V_{sb}$ ,  $V_{CN} = V_{sc}$ .

On aura au final les equations de l'onduleur :

$$V_{sa} = \frac{1}{3}V_{dc}(2S_a - S_b - S_c) \quad (\text{II.44})$$

$$V_{sb} = \frac{1}{3}V_{dc}(2S_b - S_a - S_c) \quad (\text{II.45})$$

$$V_{sc} = \frac{1}{3}V_{dc}(2S_c - S_a - S_b) \quad (\text{II.46})$$

### Modèle de redresseur :

On peut exprimer le courant  $i_{dc}$  en fonction des interrupteurs et les courants  $i_{sabc}$  comme suivant :

$$i_{dc} = S_a i_{sa} + S_b i_{sb} + S_c i_{sc} \quad (\text{II.47})$$

## II.6 Conclusion

Ce second chapitre a été dédié à la modélisation numérique de la machine asynchrone à cage d'écureuil où on a présenté son principe de fonctionnement et sa modélisation. Après avoir appliqué la transformation de Park, on a élaboré le modèle de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil et par la suite élaboré un modèle mathématique de l'auto-amorçage par un convertisseur statique. On a conclu qu'après introduction une synthèse de la modélisation du système d'auto-amorçage avec convertisseur MLI le problème de l'excitation de la machine est résolu.

## CHAPITRE III

# COMMANDE VECTORIELLE DE LA GÉNÉRATRICE

## ASYNCHRONE À CAGE D'ÉCUREUIL

### III.1 Introduction

La production de l'énergie électrique par les éoliennes a pour un seul objectif c'est de générer une tension de valeur efficace et fréquence fixes quelque soit la vitesse du vent et/ou la charge connectée.

Pour arriver à atteindre notre objectif qui est de maintenir la tension constante à la sortie du redresseur, il existe plusieurs techniques de commande afin de pouvoir résoudre le problème. Dans ce chapitre on s'intéressera à la commande classique qui consiste à ramener le comportement de la génératrice asynchrone à cage d'écoreuil à un comportement similaire à celui de la machine à courant continu qui est considéré comme étant la machine la plus simple à commander, où nous allons détailler la méthode de commande vectorielle. Les principes de commande conventionnels seront brièvement résumés. Les principes avancés de la commande de la machine asynchrone à cage seront discutés en comparant leurs avantages et leurs inconvénients.

### III.2 Principe de la commande vectorielle

La difficulté majeure rencontrée dans la commande d'une machine asynchrone à cage d'écoreuil réside dans le fait que le couple et le flux sont des variables fortement couplées et que toute action sur l'une se répercute sur l'autre.

Cette difficulté peut être surmontée en appliquant la méthode de la commande vectorielle, qui permet la commande séparée le couple et le flux. La machine asynchrone à cage d'écureuil est alors commandée comme une machine à courant continu à excitation indépendante.

Le régulateur calcule alors à partir de la consigne, le flux et le couple nécessaire, desquels on déduit les courants requis. Typiquement, la commande vectorielle sert à maintenir le courant à la valeur demandée.

### III.3 Description de la commande vectorielle

Pour réaliser le découplage entre le flux et le couple, on doit faire appel aux équations présentées dans le repère  $\ll dq \gg$  développé dans le chapitre (II) telle que ce repère possède une caractéristique qu'on peut l'orienter selon notre besoin.

Dans notre cas on procédera à la commande vectoriel par orientation de flux rotorique qui est la plus utilisée, elle donne de meilleurs résultats que les méthodes basées sur l'orientation du flux statorique ou d'entrefer [32]. Dans ce cas, on choisit l'orientation du repère tel-que :  $\phi_{rd} = \phi_r$  et  $\phi_{rq} = 0$ . Cela signifie que le flux  $\phi_r$  est aligné en permanence avec l'axe  $\ll d \gg$ .

Lorsque le champ rotorique est orienté, le comportement de la machine asynchrone à cage d'écureuil est décrit par les équations ci-après. Partant des équations (II.18), (II.19) nous obtenons :

$$V_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_s \phi_{sq} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} \quad (\text{III.1})$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s \phi_{sd} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} \quad (\text{III.2})$$

$$0 = R_r i_{rd} - \omega_r \phi_{rq} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} \quad (\text{III.3})$$

$$0 = R_r i_{rq} + \omega_r \phi_{rd} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} \quad (\text{III.4})$$

Nous rappelons aussi, ci-dessous, les relations entre les différents flux et les courants de la machine asynchrone à cage d'écureuil, en partant de l'équation (II.21) :

$$\phi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \quad (\text{III.5})$$

$$\phi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \quad (\text{III.6})$$

$$\phi_{rd} = M i_{sd} + L_r i_{rd} \quad (\text{III.7})$$

$$\phi_{rq} = M i_{sq} + L_r i_{rq} \quad (\text{III.8})$$

En supposant que la commande maintien :  $\phi_{rd} = \phi_r = \text{constante}$  et  $\phi_{rq} = 0$ , alors les dérivées temporelles des flux sont nulles en régime permanent  $\frac{d\phi_{rd}}{dt} = \frac{d\phi_r}{dt} = 0$  et  $\frac{d\phi_{rq}}{dt} = 0$ .

À partir de la relation (III.3), on obtient :

$$\frac{d\phi_r}{dt} = -R_r i_{rd} \quad (\text{III.9})$$

Ce qui implique que le courant  $i_{rd}$  est également nul en régime permanent. Par ailleurs, l'équation (III.4) permet d'exprimer le flux en fonction du courant et de la pulsation rotorique sous la forme suivante :

$$\phi_r = -\frac{R_r i_{rq}}{\omega_r} \quad (\text{III.10})$$

La relation (III.10) correspond en fait à la condition de calage du référentiel d'axes d et q dans le repère rotorique. Elle donne la valeur que doit avoir  $\phi_r$  en fonction de  $i_{rq}$  (avec  $\frac{d\phi_{rq}}{dt} = 0$  et  $i_{rd} = 0$ ) pour que le flux rotorique reste orienté.

On peut, à partir des relations (III.7) et (III.8), exprimer les courants  $i_{rd}$  et  $i_{rq}$  comme suit :

$$i_{rd} = \frac{\phi_r - M i_{sd}}{L_r} \quad (\text{III.11})$$

$$i_{rq} = -\frac{M i_{sq}}{L_r} \quad (\text{III.12})$$

Le repère orienté impose  $\phi_{rq} = 0$ . Connaissant le courant  $i_{sq}$ , l'expression du couple électromagnétique donné par la relation (II.23) devient alors :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_r} \phi_r i_{sq} \quad (\text{III.13})$$

Pour mettre en œuvre la stratégie de commande, il faut pouvoir estimer  $\phi_r$  et  $\omega_s$  pour l'application de la transformation de Park.

### III.3.1 Estimation du flux rotorique et de la pulsation statorique

Dans la relation (III.9), on remplace  $i_{rd}$  par sa valeur exprimée en (III.11), il devient :

$$\phi_r = \frac{M i_{sd}}{1 + \tau_r S} \quad (\text{III.14})$$

avec :

- $\tau_r$  : constante de temps rotorique.
- $S$  : opérateur de dérivation.

La connaissance de  $\omega_s$  permet d'assurer la validité des équations car le référentiel  $\ll dq \gg$  doit suivre constamment le champ tournant. Pour cela, on se sert de la relation angulaire interne  $\omega_s = \omega_r + p\Omega$ . La vitesse de rotation de la machine est mesurée. Par contre, il faut estimer la vitesse du champ rotorique. Dans l'équation (III.10), on remplace  $i_{rq}$  par sa valeur donnée en (III.12). Ce qui donne :

$$\omega_r = \frac{M i_{sq}}{\tau_r \phi_r} \quad (\text{III.15})$$

on obtient finalement :

$$\omega_s = \frac{M i_{sq}}{\tau_r \phi_r} + p\Omega \quad (\text{III.16})$$

### III.3.2 Détermination des paramètres nécessaires à la commande

La commande nécessite la connaissance de différents paramètres de la machine asynchrone à cage supposée non saturée ( $M$ ,  $L_s$ ,  $\tau_s$  et  $\tau_r$ ).

Le flux rotorique de référence est choisi afin de placer la machine dans un état de magnétisation proche de celui de son point de fonctionnement nominal. On choisit dans notre cas de maintenir le flux rotorique suivant l'axe d à la valeur de référence. Pour notre machine, en prenant  $\phi_{r-ref}$  0.7 Wb , les résultats sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} M = 0.10474H \\ \tau_s = 0.10611s \\ \tau_r = 0.08462s \\ \sigma = 0.11949 \end{array} \right.$$

### III.3.3 Définition de l'algorithme de commande

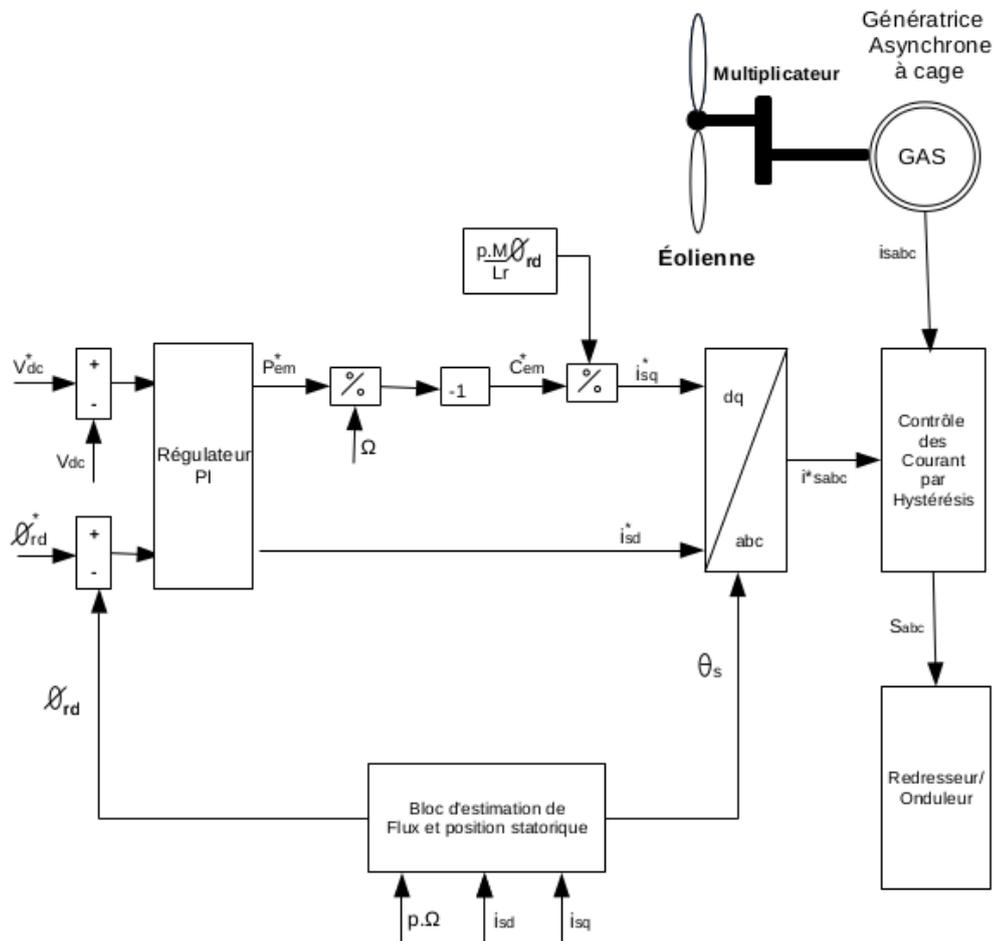
D'après les différentes équation établies au paragraphe suivant, le flux peut être contrôlé par  $i_{sd}$ . Une fois celui ci maintenu à sa référence, le couple est alors directement proportionnel à  $i_{sq}$ .

Dans le cas du fonctionnement considéré dans nos travaux, c'est la tension «  $V_{dc}$  » à la sortie du redresseur qui doit être contrôlée et maintenue constante. Partant de la tension «  $V_{dc}$  » à

contrôler et du courant  $i_{dc}$  'mesuré' à la sortie du redresseur, on peut exprimer la puissance débitée sur la charge :  $V_{dc-ref} \cdot i_{dc} = P_{ref}$ .

En négligeant les pertes, on peut confondre cette puissance avec la puissance électromagnétique dont l'expression est  $P_{ele} = C_{em} \cdot \Omega$ . On peut alors exprimer le couple électromagnétique comme étant :  $C_{em} = \frac{P_{ref}}{\Omega}$ .

De ce fait, le contrôle de «  $V_{dc}$  » peut se faire par l'intermédiaire de celui du couple électromagnétique. Il est à noter que les conventions utilisées, la valeur du courant  $i_{dc}$  est donc négative. Ceci implique que la puissance de référence, et par suite le couple de référence, ont également des valeurs négatives.



**Figure III.1 :** Schéma du principe de la commande vectorielle à flux orienté

La figure (III.1) résume l'ensemble de la structure de commande en boucle fermée. Les courants  $i_{sq}$  et  $i_{sd}$  sont régulés en valeurs instantanées. La tension «  $V_{dc}$  » est régulée en valeur moyenne et sa valeur de référence  $V_{dc-ref}$  est prise égale à 465V. L'essai de simulation est réalisé avec une batterie de 12V et de résistance interne de  $0.1\Omega$ . La capacité de filtrage en

sortie redresseur est fixée à  $1000 \mu F$ .

## III.4 Résultat de simulation

Dans notre cas deux tests de simulation sont effectués afin d'évaluer les performances de la commande. Le premier permettra de tester l'influence de variations de la vitesse. Le second montre l'impact des variations de charge sur l'évolution de la tension à la sortie du redresseur.

### III.4.1 Influence de la variation de la vitesse

Dans ce paragraphe, nous présentons les résultats de simulation obtenus pour une vitesse d'entraînement variable. Dans un premier temps, la génératrice est entraînée à la vitesse de synchronisme (750tr/mn). A l'instant  $t=2s$ , la vitesse est augmentée de +10% puis à l'instant  $t=4s$ , elle est diminuée pour atteindre 10% de moins par rapport à celle du synchronisme.

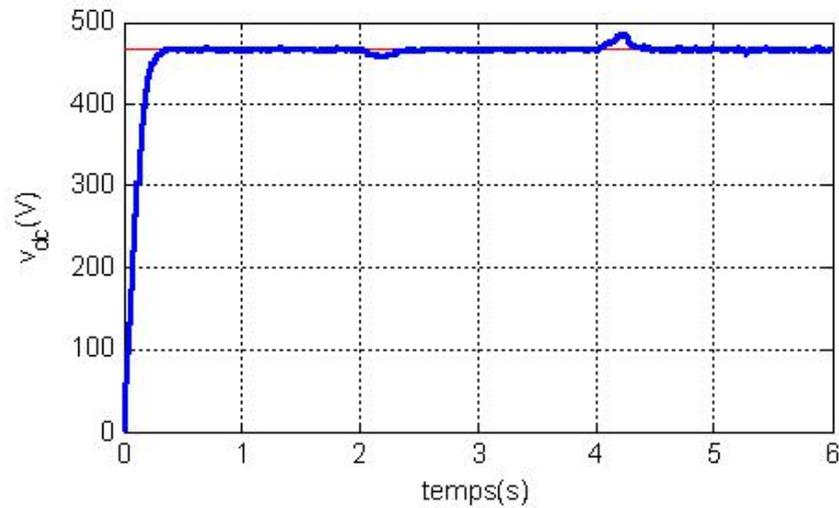
Les résultats obtenus en appliquant la commande vectorielle sont présentés sur les figures ci-dessous. D'après ces résultats on remarque que la tension redressée s'écarte légèrement de la valeur de référence quand la vitesse varie, mais elle restent néanmoins largement en dessous de 5%.

Pour une valeur du flux de référence rotorique  $\phi_{r-ref} = 0.7wb$ , la figure (III.3) montre que le flux rotorique suit bien la référence malgré la variation de la vitesses et ce qui s'explique d'après l'équation (III.14) on remarque que le flux est indépendant de la vitesse d'entraînement.

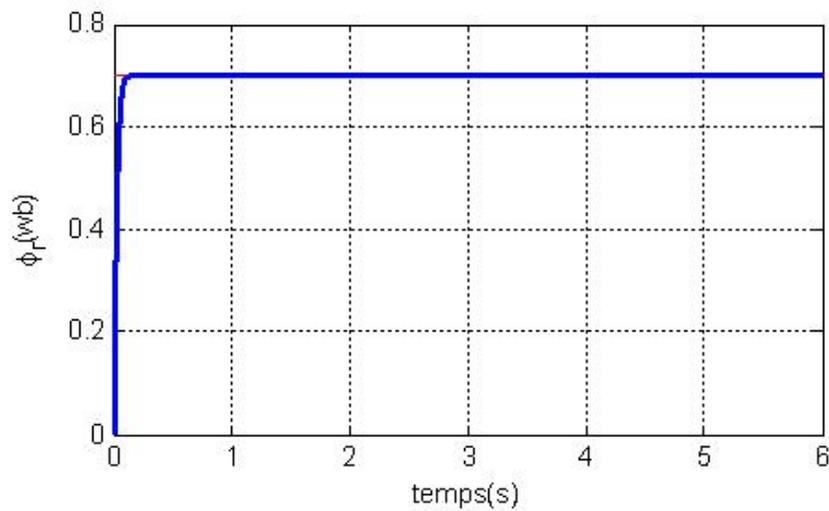
Sur la figure (III.4) sont représentées les allures des courants suivant les deux axes d et q. Concernant l'évolution du courant  $i_{sd}$  on constate au début un pic et puis son évolution devient similaire à celle du flux alors que le courant  $i_{sq}$  est à l'inverse de  $i_{sd}$ , son évolution dépend des variation de la vitesse cela est tout à fait cohérent étant donné que l'équation (III.16) explique ce comportement. Alors l'équation (III.13) explique l'allure du couple montré sur la figure (III.5) telle que ce dernier dépend que de  $i_{sq}$ , donc le comportement du couple est identique à celui du courant  $i_{sq}$ .

La figure (III.7) montre un zoom des allures temporelles des courants statoriques, ces derniers sont évidemment sinusoïdaux, alors que la figure (III.6) montre l'allure du courant statorique d'une phase et on remarque que la transition se fait d'une manière moins brute. Ceci est tout à fait normal de par les variations graduelles simultanées de  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$  qui répondent

aux variations du flux et du couple. Sur les figure(III.8) et (III.9) on a présente les allures des courants de charge ( $i_{ch}$ ) et redresse ( $i_{dc}$ ).



**Figure III.2** : Tension redressée



**Figure III.3** : Flux rotorique

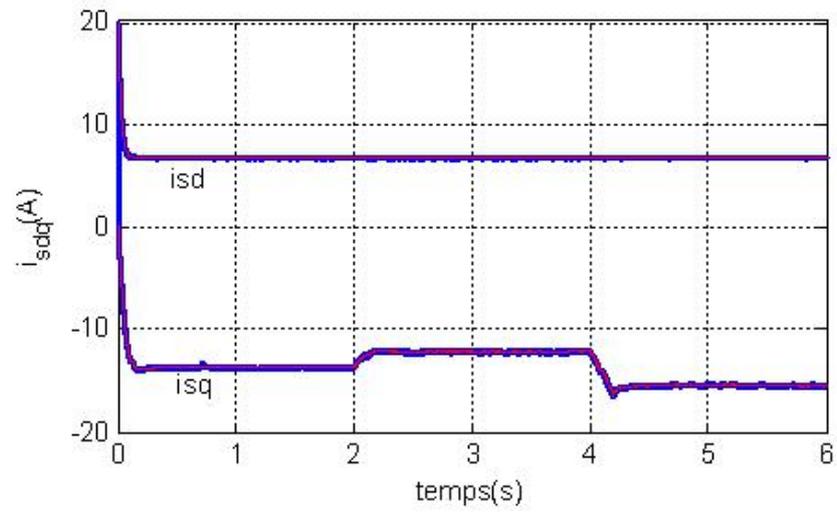


Figure III.4 : courants  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$

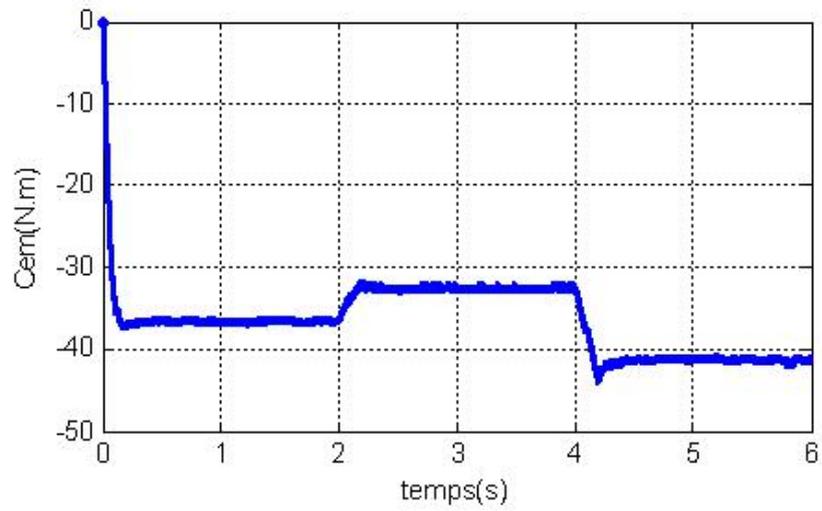
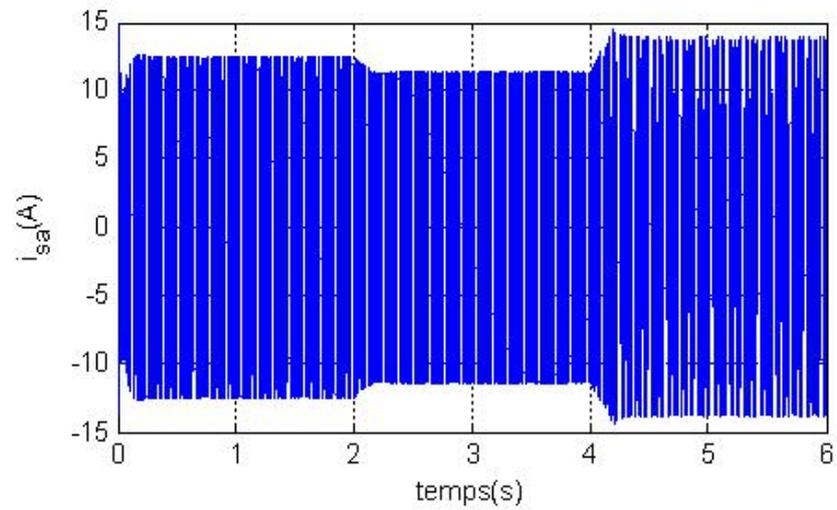
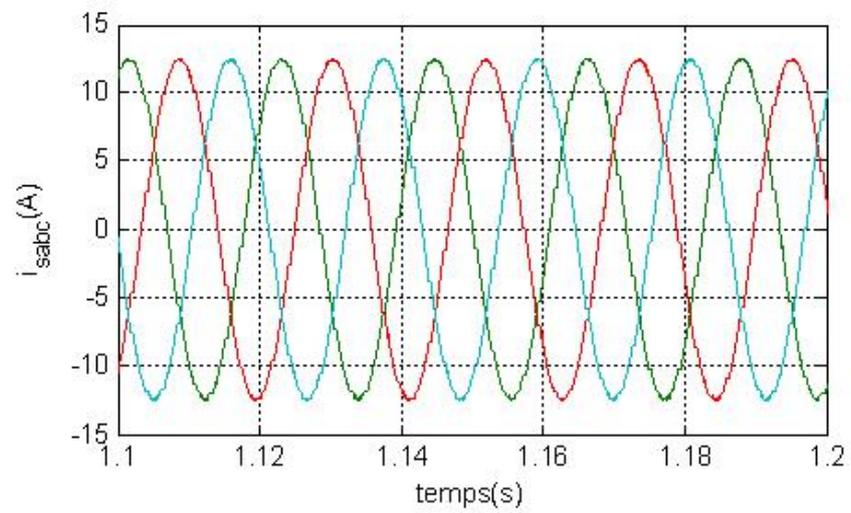


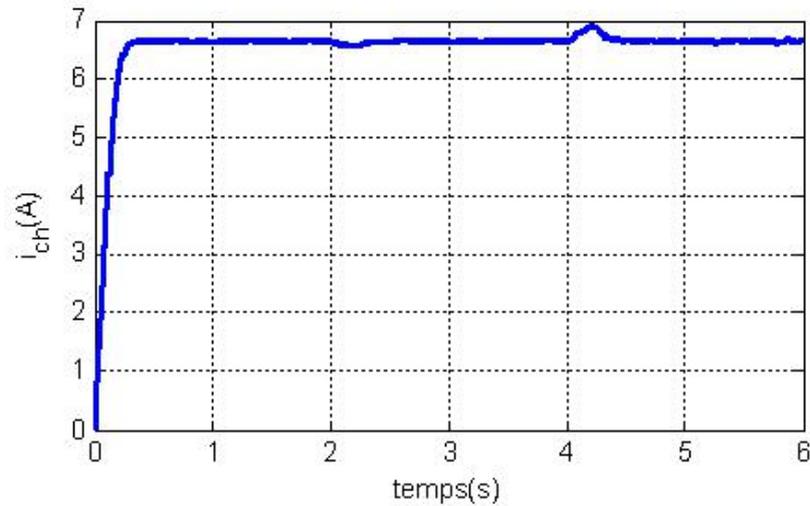
Figure III.5 : Couple électromagnétique



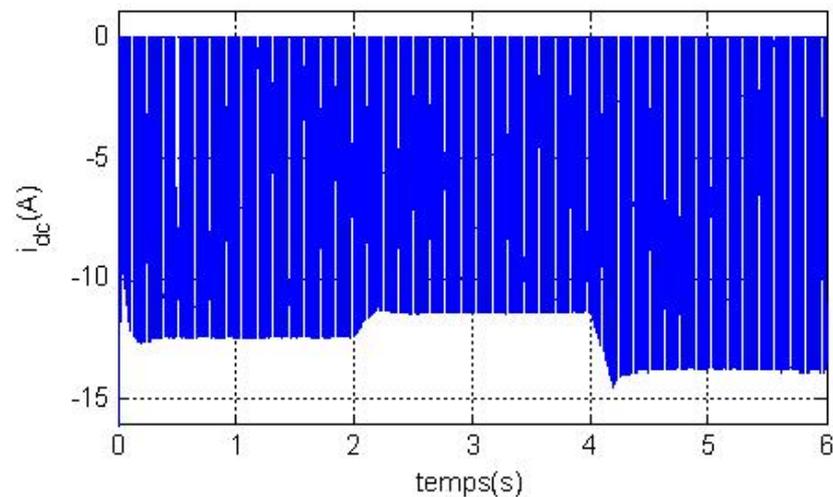
**Figure III.6 :** Courant statorique d'une phase



**Figure III.7 :** Courants statoriques des trois phases



**Figure III.8** : Courant de charge

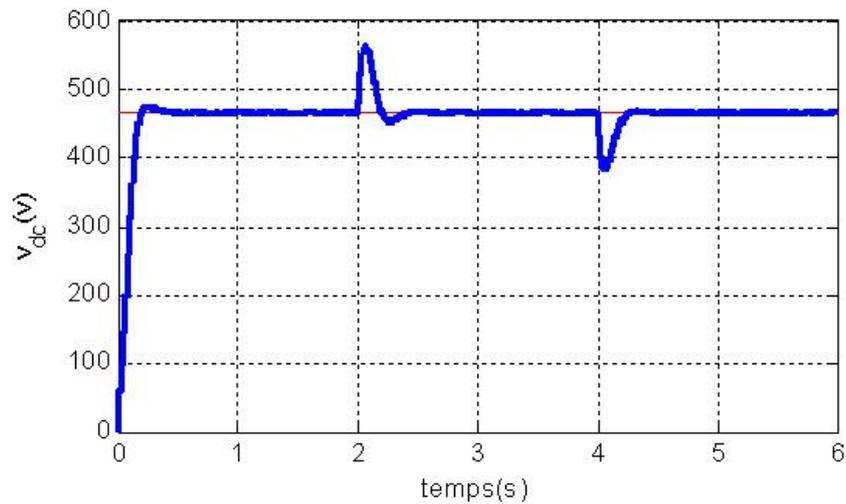


**Figure III.9** : Courant redressée

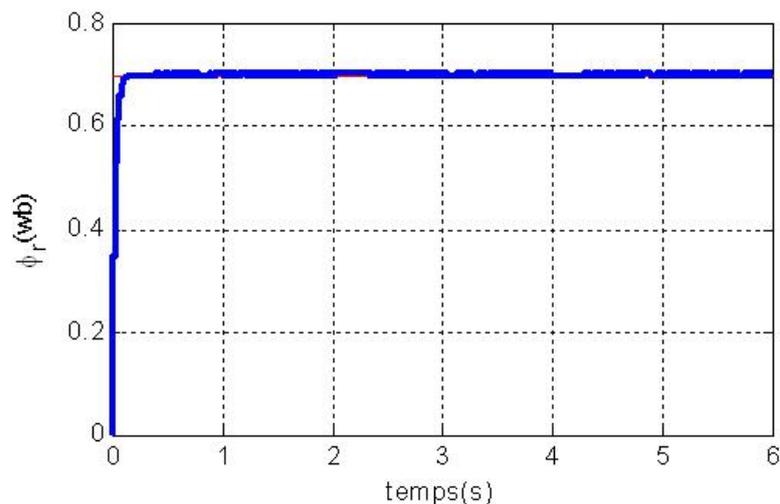
### III.4.2 Influence de la variation de la charge

Dans cette étude, on testera les performances de la commande vectorielle pour des variations de charge. Dans ce qui suit, nous montrons les résultats obtenus lorsque la génératrice est entraînée à la vitesse de synchronisme avec une valeur de la tension redressée  $V_{dc-ref}$  égale à 465V. Les simulations sont menées pour une charge initiale  $R = 70\Omega$ . À  $t = 2s$  la résistance augmente à une valeur de  $140\Omega$  puis à  $t = 4s$ , la résistance est ramenée de nouveau à  $70\Omega$ . Les résultats obtenus sont présentés ci-dessous.

On remarque que le flux rotorique (figure (III.11)), régulé par le courant  $i_{sd}$  (figure (III.12)), est totalement insensible à la variation de la charge. Par contre, cette variation affecte nettement la tension redressée avec des dépassements avoisinants les 20% (figure (III.10)) qu'on trouve excessif par rapport aux résultats obtenus dans le cas de la variation de la vitesse, une variation de charge affecte la valeur de la puissance demandée, directement liée à la tension  $V_{dc}$ , et donc la composante du courant statorique  $i_{sq}$  (figure (III.12)) et le couple électromagnétique (figure (III.13)).



**Figure III.10** : Tension redressée



**Figure III.11** : Flux rotorique

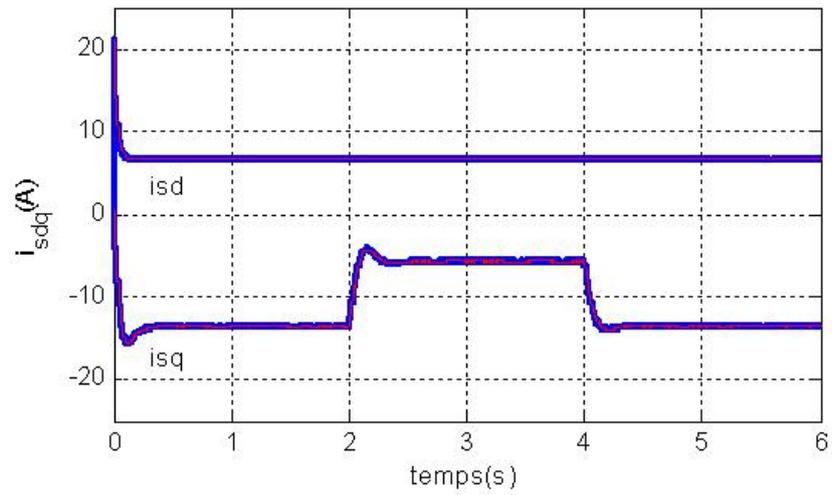


Figure III.12 : Courants  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$

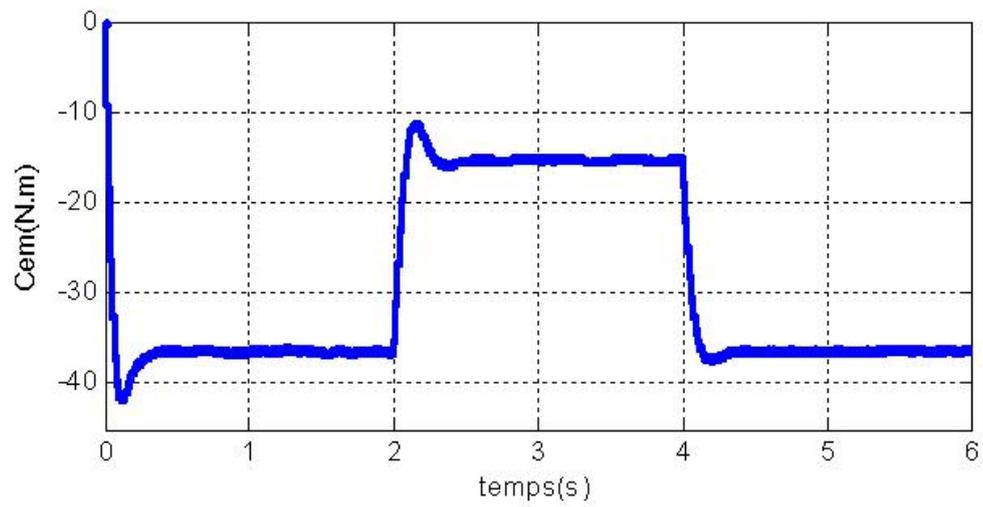
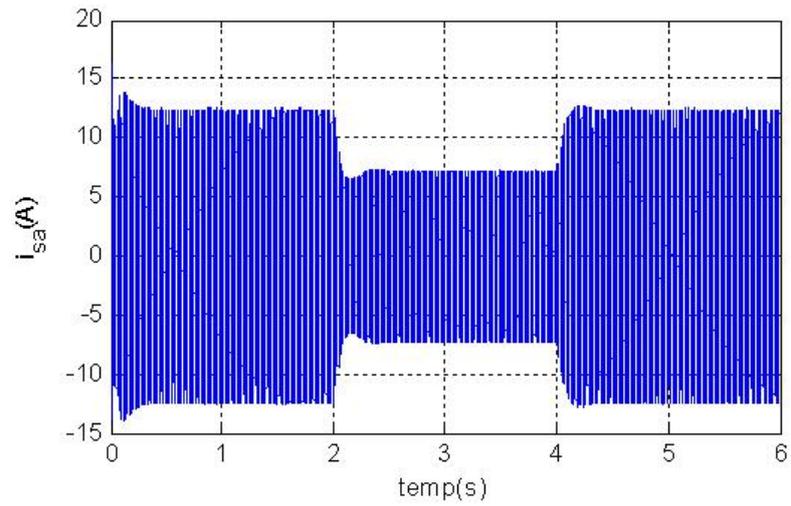
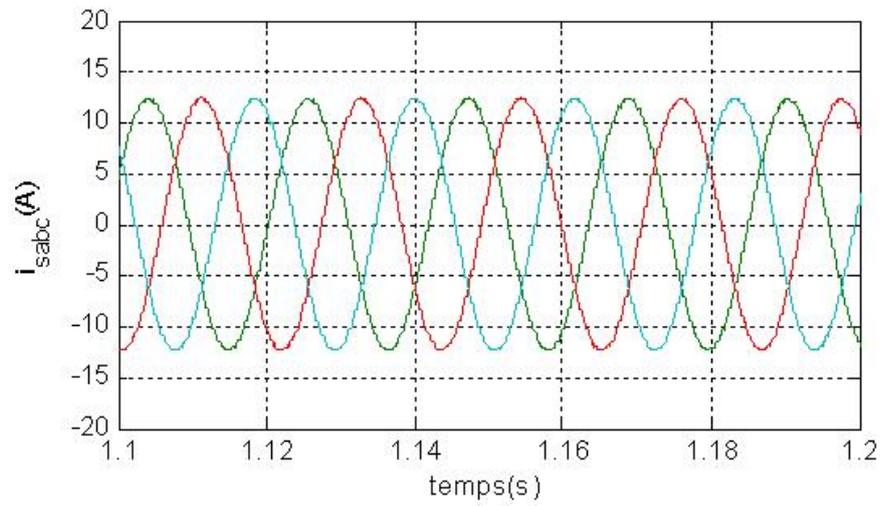


Figure III.13 : Couple électromagnétique



**Figure III.14 :** Courant statorique d'une phase



**Figure III.15 :** Courants statoriques des trois phases

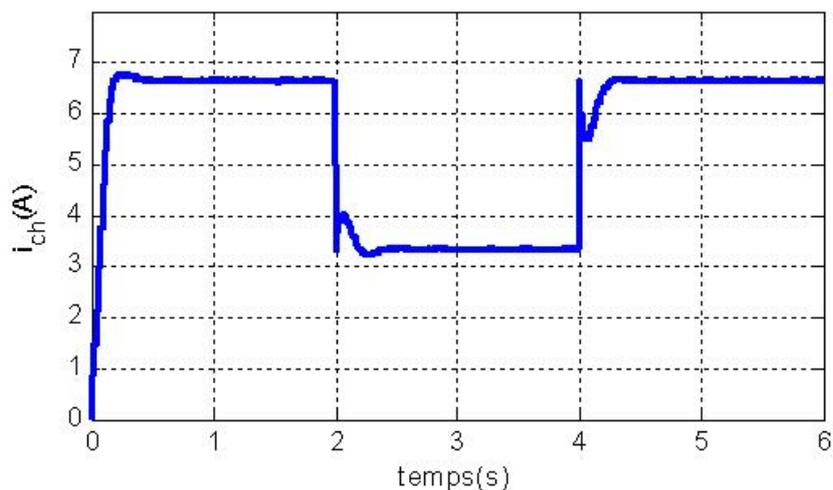


Figure III.16 : Courant de charge

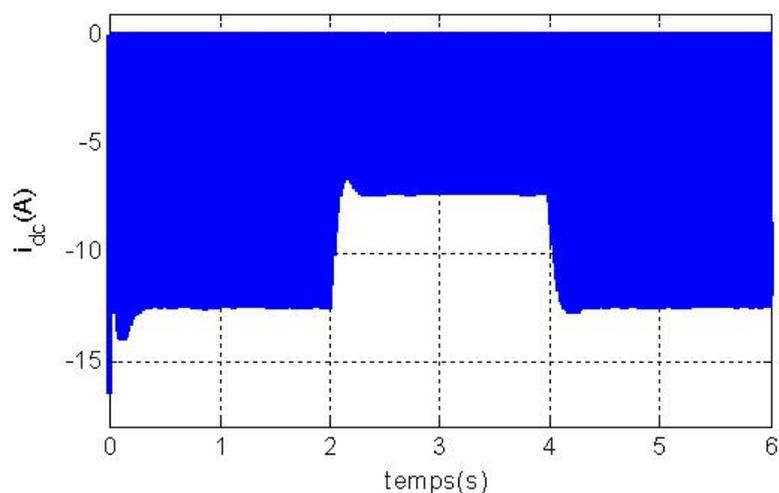


Figure III.17 : Courant redressé

## III.5 Conclusion

Dans ce chapitre on a étudié l'influence de la variation de la vitesse et de la charge, en appliquant la commande vectorielle sur la génératrice asynchrone à cage d'écuréuil. On a d'abord présenté le principe de cette commande et sa description. Puis, on a élaboré et appliqué le modèle de la commande vectorielle. Enfin, on a présenté et discuté les résultats de la simulation. On a conclu que cette dernière est peu sensible à la variation de la vitesse contrairement à la variation de la charge où elle est très influencée.

### IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous appliquant la commande par mode de glissement peut être appliquée au contrôle de la génératrice asynchrone à cage. Pour cela, nous présentons tout d'abord le principe de la commande par mode glissant, nous abordons ensuite la conception de l'algorithme de commande avec ces différentes étapes, et nous allons enfin montrer les avantages apportés par ce type de réglage par rapport à ceux obtenus par les régulateurs classiques PI, après illustration et visualisation des résultats de simulation.

### IV.2 Principe de la commande par mode glissant

Le principe de la commande par mode glissant consiste à forcer notre système à avoir un type de comportement bien choisi. Pour parvenir à ce résultat, on introduit une surface de commutation qui permet de remplacer un système d'ordre  $n$  par un système d'ordre plus faible. Le principe de fonctionnement de la commande par mode glissant consiste, d'abord, à attirer les états du système dans une région convenablement sélectionnée afin d'atteindre l'état désiré, puis à concevoir une loi de commande qui maintient toujours le système dans cette région. Les étapes pour développer la commande en mode glissant sont comme suit :

- Détermination de la surface de commutation
- Détermination de la commande à partir de la surface de commutation.

## Surface de régulation du courant $i_{dc}$ :

La surface de régulation du courant  $i_{dc}$  est de la forme suivante :

$$S_{V_{dc}} = V_{dc}^* - V_{dc}$$

À partir du chapitre (II) on a :

$$\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C}(-i_{dc} - i_{ch}) \quad (\text{IV.1})$$

En dérivant la surface  $S_{V_{dc}}$ , on obtient :

$$\dot{S}_{V_{dc}} = \dot{V}_{dc}^* - \dot{V}_{dc} \quad (\text{IV.2})$$

En introduisant l'équation (IV.1) dans (IV.2), on aura :

$$\dot{S}_{V_{dc}} = \dot{V}_{dc}^* - \frac{1}{C}(-i_{dc} - i_{ch}) \quad (\text{IV.3})$$

En remplaçant le courant  $i_{dc}$  par le courant de commande  $i_{dc}^* = i_{dc}^{eq} + i_{dc}^n$  dans l'équation (4.3), on trouve :

$$\dot{S}_{V_{dc}} = \dot{V}_{dc}^* - \frac{1}{C}(-i_{dc}^{eq} - i_{dc}^n - i_{ch}) \quad (\text{IV.4})$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, on a  $S_{V_{dc}} = 0$  et par conséquent  $\dot{S}_{V_{dc}} = 0$  et  $i_{dc}^n = 0$ , d'où on tire la formule de la commande équivalente à partir de la relation :

$$i_{dc}^{eq} = -CV_{dc}^* - i_{ch} \quad (\text{IV.5})$$

Durant le mode de convergence, la condition  $S_{V_{dc}}\dot{S}_{V_{dc}} < 0$  doit être vérifiée. En remplaçant (IV.5) dans (IV.4), on obtient :

$$\dot{S}_{V_{dc}} = \frac{1}{C}i_{dc}^n \quad (\text{IV.6})$$

Donc :

$$i_{dc}^n = K\dot{S}_{V_{dc}} \quad (\text{IV.7})$$

## Surface de régulation du flux rotorique :

Pour la régulation du flux rotorique on a l'équation de la surface de glissement suivante :

$$S_{\phi_r} = \phi_r^* - \phi_r \quad (\text{IV.8})$$

D'où :

$$\dot{S}_{\phi_r} = \dot{\phi}_r^* - \dot{\phi}_r \quad (\text{IV.9})$$

Sachant que :

$$\dot{\phi}_r = \frac{M}{\tau_r} i_{sd} - \frac{1}{\tau_r} \phi_r \quad (\text{IV.10})$$

En introduisant l'équation (IV.10) dans (IV.9), on aura :

$$\dot{S}_{\phi_r} = \dot{\phi}_r^* - \frac{M}{\tau_r} i_{sd} + \frac{1}{\tau_r} \phi_r \quad (\text{IV.11})$$

En introduisant le courant de commande  $i_{sd}^* = i_{sd}^{eq} + i_{sd}^n$  dans l'équation (IV.11), on aura :

$$\dot{S}_{\phi_r} = \dot{\phi}_r^* - \frac{M}{\tau_r} (i_{sd}^{eq} + i_{sd}^n) + \frac{1}{\tau_r} \phi_r \quad (\text{IV.12})$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, on a  $S_{\phi_r} = 0$  et par suite  $\dot{S}_{\phi_r} = 0$  et  $i_{sd}^n = 0$ , d'où on tire  $i_{sd}^{eq}$  de la relation (IV.11) :

$$i_{sd}^{eq} = \left( \dot{\phi}_r^* + \frac{1}{\tau_r} \right) \frac{\tau_r}{M} \quad (\text{IV.13})$$

Durant le mode de convergence, la condition  $S_{\phi_r} \dot{S}_{\phi_r} < 0$  doit être vérifiée. En substituant (IV.13) dans (IV.12), on obtient :

$$i_{sd}^n = K \dot{S}_{\phi_r} \quad (\text{IV.14})$$

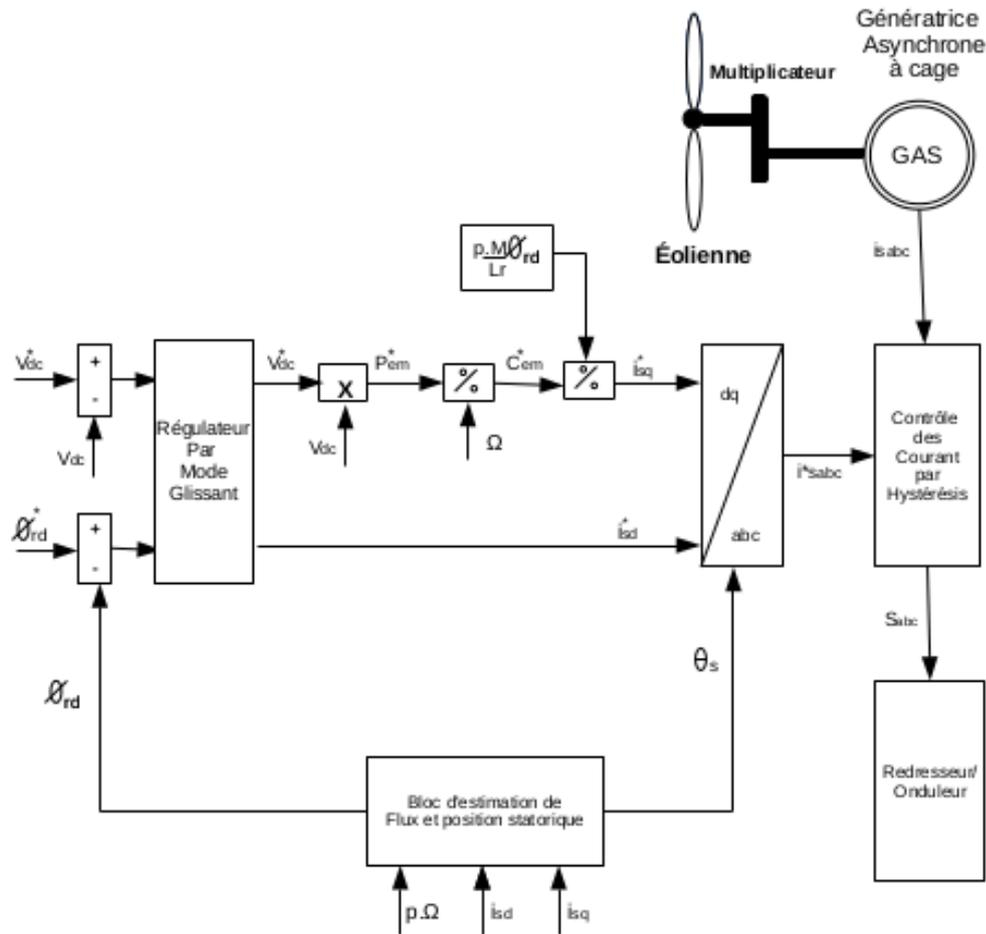


Figure IV.1 : Schéma du principe de la commande par mode glissant

## IV.3 Résultats de simulation

Afin de pouvoir comparer entre les deux stratégies de commande (commande vectorielle et le mode glissant) et de tirer une conclusion sur les performances de chacune d'elles, on a fait subir au système étudié par mode glissant les mêmes variations de la charge et de la vitesse d'entraînement appliquer au système commandé par la commande vectorielle.

### IV.3.1 Influence de la variation de la vitesse

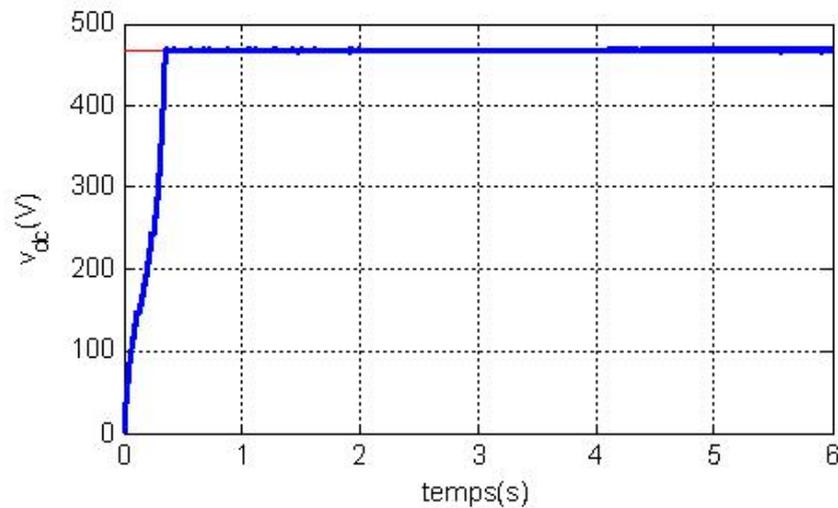
En fonction de la variation de la vitesse d'entraînement, Les différents résultats sont donnés dans les figures ci-dessous.

Avec cette stratégie de commande on constate que les tensions et le flux rotorique sont bien contrôlés comme le montre les figures (IV.2) et (IV.3) et sont insensibles aux variations de la vitesse contrairement à la commande par le PI où on trouve que la tension  $v_{dc}$  est sensible aux

variations de la vitesse.

Sur la figure (IV.4) où sont présentées les allures des courants  $i_{sq}$  et  $i_{sd}$ , on observe que les deux courants sont régulés indépendamment l'un de l'autre, concernant l'évolution de  $i_{sd}$ , au début on constate un dépassement et après il se stabilise et devient similaire à celle du flux, mais par contre  $i_{sq}$  il est un peu sensible aux variations de la vitesse car il dépend de la vitesse d'entraînement, et donc le couple (figure (IV.5)) est aussi affecté par cette perturbation, étant donné la régulation du couple est assuré par le courant  $i_{sq}$ .

La figure (IV.6) montre le courant statorique d'une phase  $i_{sa}$ , on constate un pic à l'instant (0.11s) respectivement avant de se stabiliser et cela est dû au pic du courant  $i_{sq}$ , alors que la figure (IV.7) montre un zoom des allures statoriques et on remarque qu'ils sont sinusoïdaux mais il y a des harmoniques qui sont présentes causées par le phénomène de Chating.



**Figure IV.2** : Tension redressée

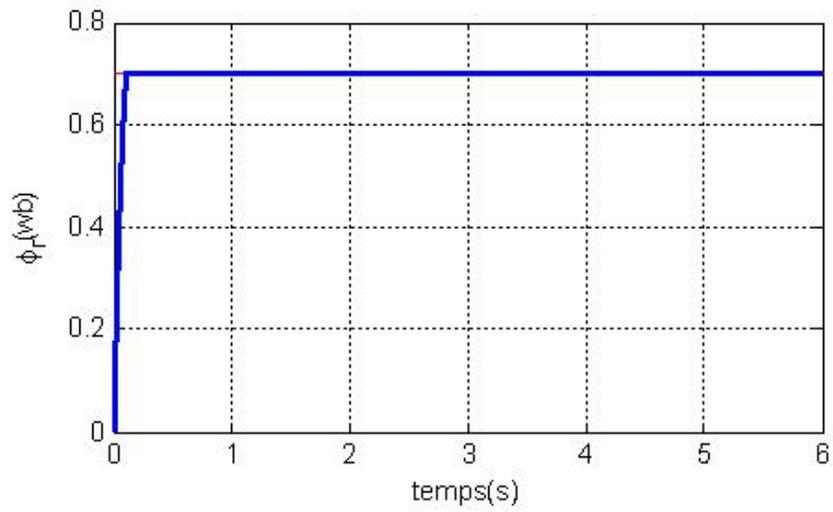


Figure IV.3 : Flux rotorique

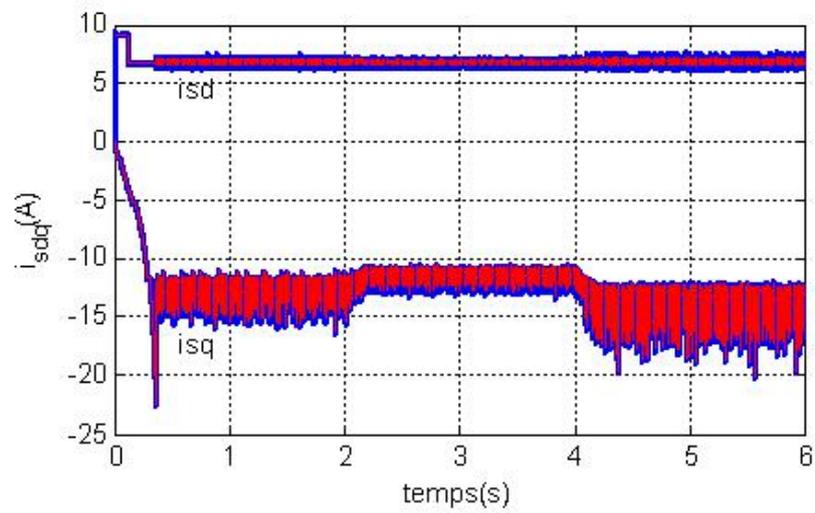
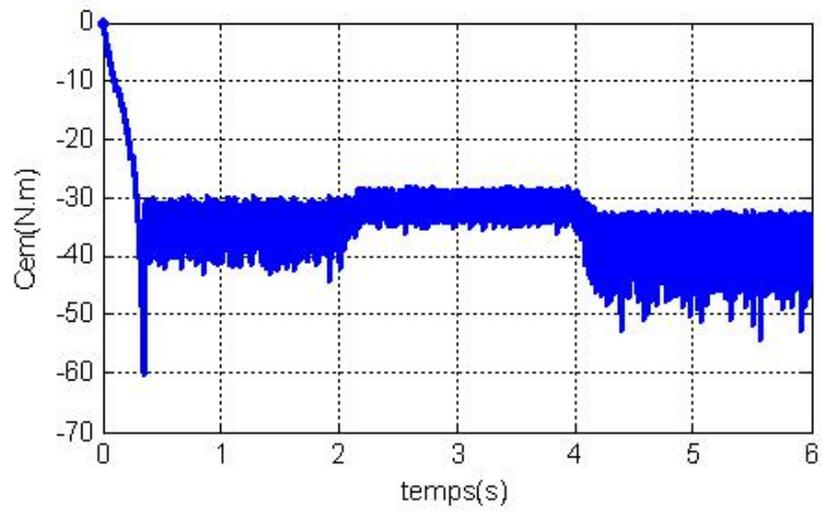
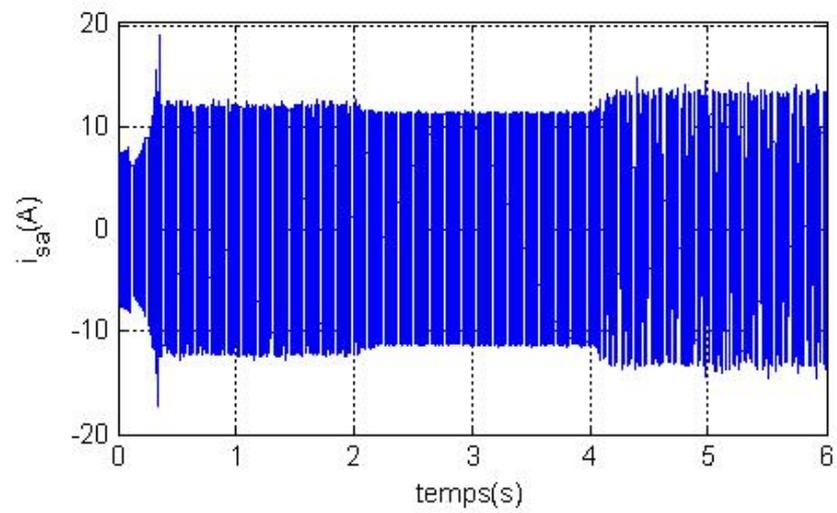


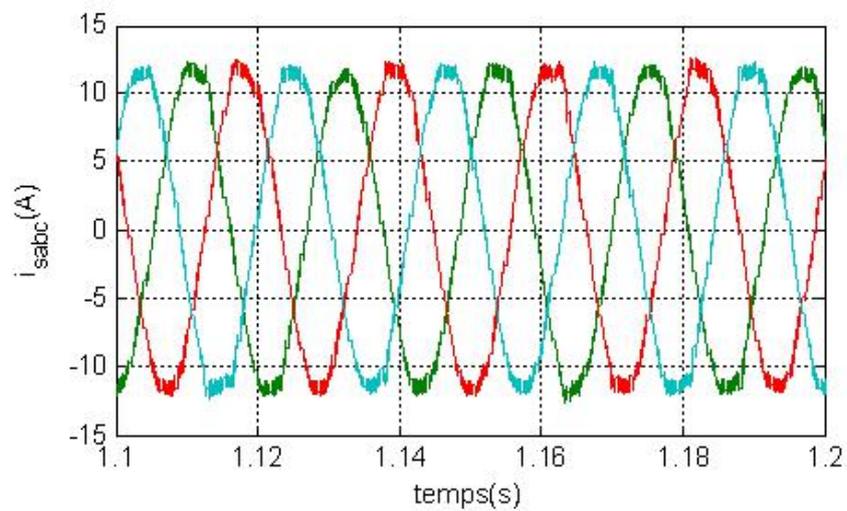
Figure IV.4 : Courants  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$



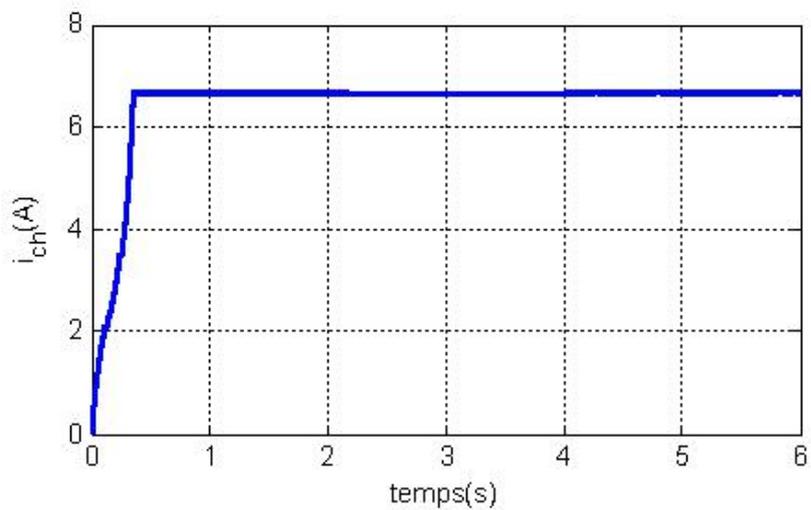
**Figure IV.5 :** Couple électromagnétique



**Figure IV.6 :** Courant statorique d'une phase



**Figure IV.7 :** Courants statoriques des trois phases



**Figure IV.8 :** Courant de charge

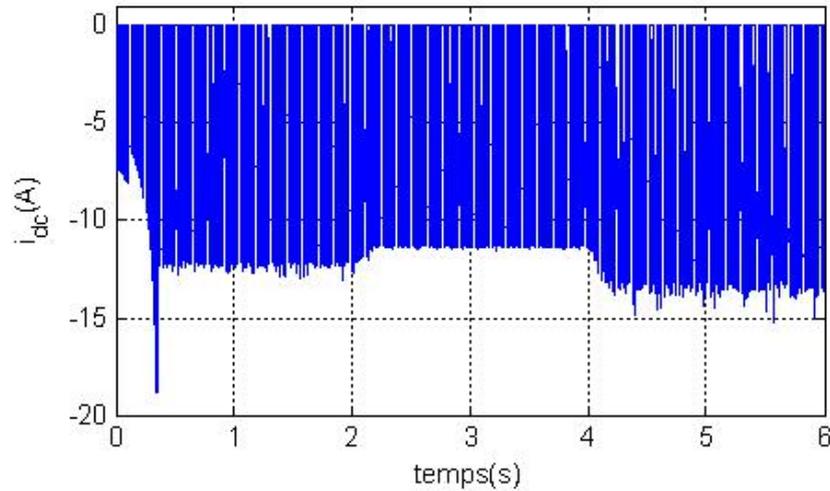


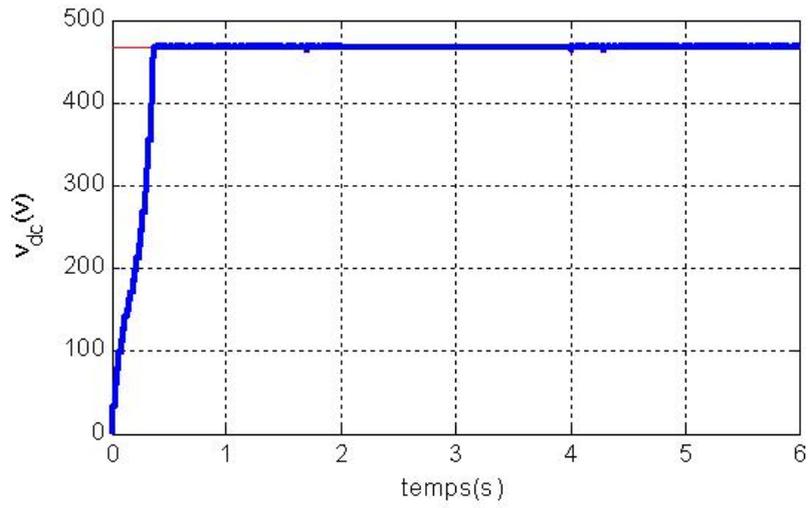
Figure IV.9 : Courant redressé

### IV.3.2 Influence de la variation de la charge

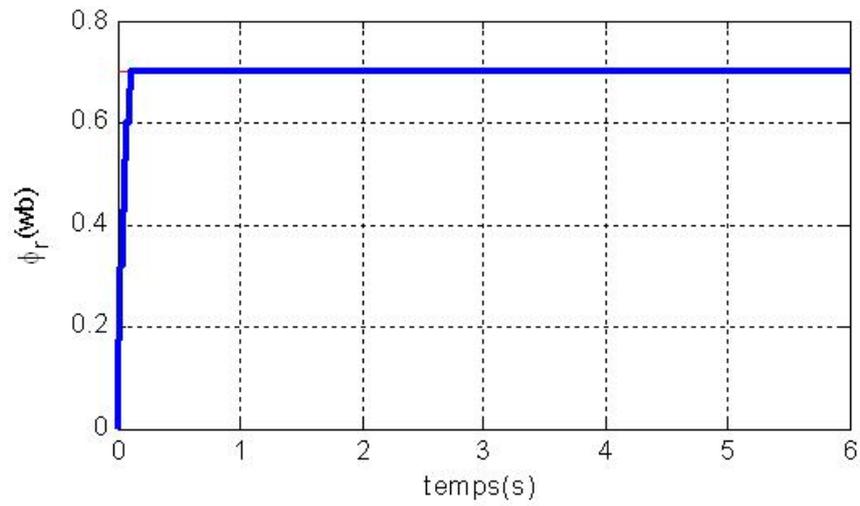
Les performances lors des variations de la charge ont également été testées avec la commande par mode glissant. Le même cas que celui de la commande PI a été étudié, i.e. la valeur de  $R$  est initialement égale à  $70\Omega$ , à  $t = 2s$  la résistance augmente à  $R = 140\Omega$  puis à  $t = 4s$ , la résistance est ramenée à sa valeur initiale  $R = 70\Omega$ . La génératrice est entraînée à la vitesse de synchronisme, la valeur de référence du flux rotorique  $\phi_{r-réf}$  est prise égale à  $0.7Wb$  et celle de la tension redressée  $V_{dc-réf}$  est égale à  $465V$ .

Les différents résultats sont présentés ci-dessous.

Contrairement à la commande vectorielle on constate que la tension redressée (figure(IV.10)) est bien contrôlée et qu'elle est insensible aux variations de la charge, contrairement au flux rotorique (figures (IV.11)) on trouve qu'il est identique à celui de la commande vectorielle et qu'ils sont totalement insensibles aux variations de la charge. Enfin, la variation du courant statorique dépend des variations des courants  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$ .



**Figure IV.10** : Tension redressée



**Figure IV.11** : Flux rotorique

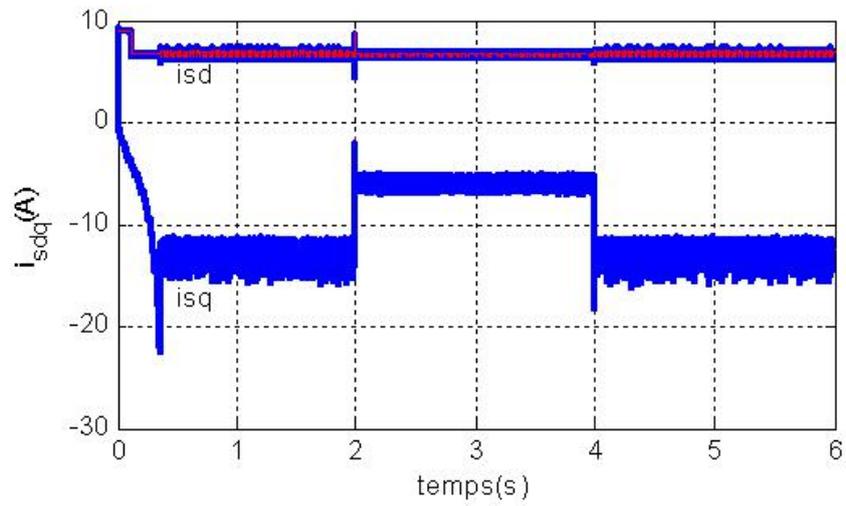


Figure IV.12 : Courants  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$

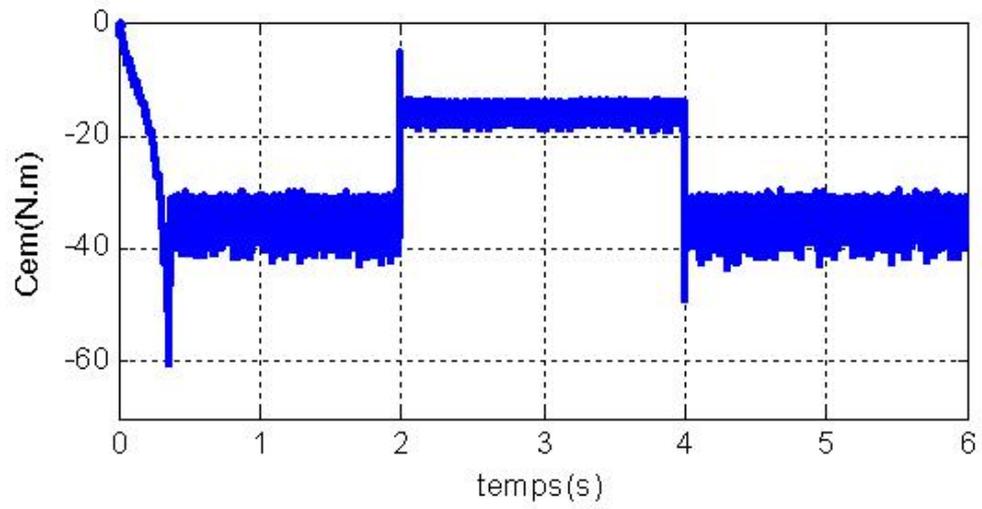
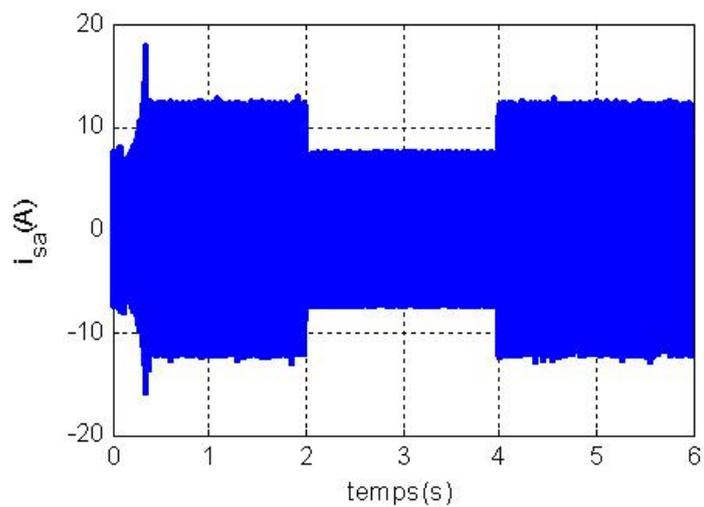
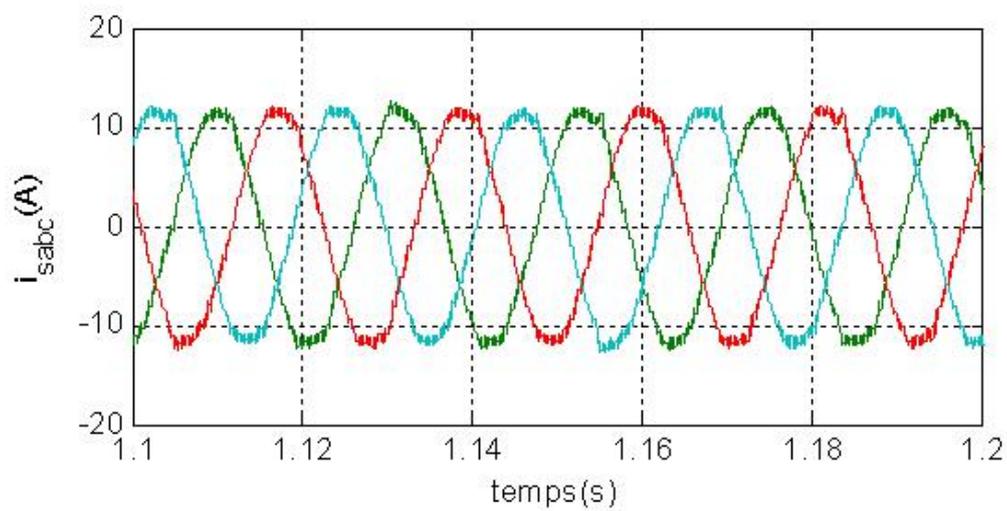


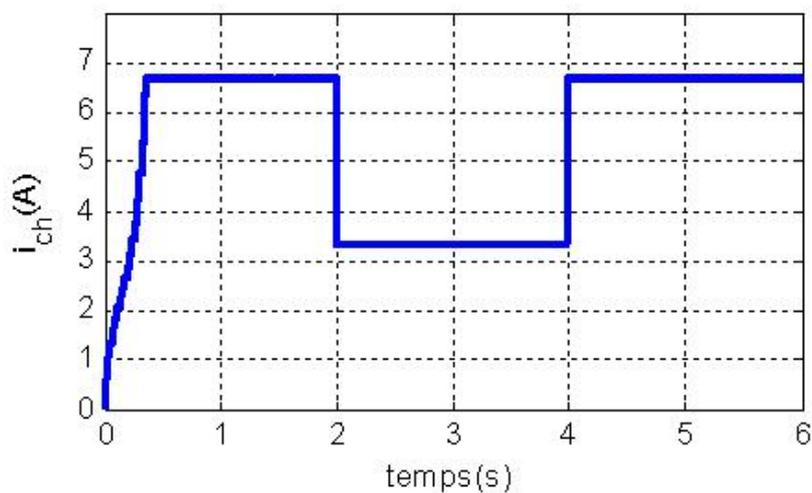
Figure IV.13 : Couple électromagnétique



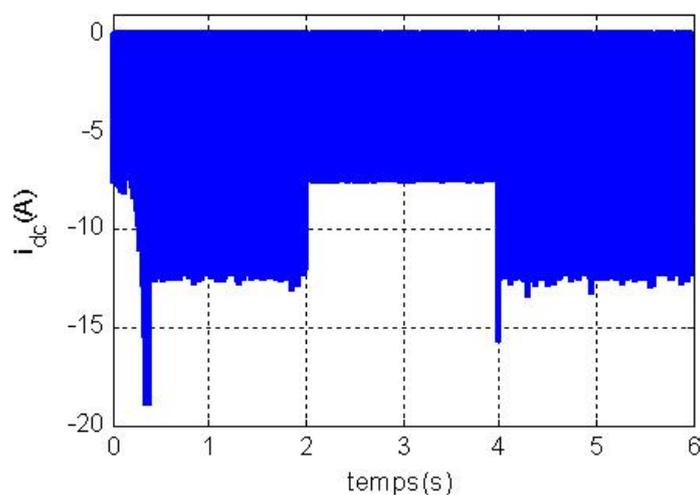
**Figure IV.14** : Courant statorique d'une phases



**Figure IV.15** : Courants statoriques des trois phases



**Figure IV.16** : Courant de charge



**Figure IV.17** : Courant redressé

## IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre on a étudié l'influence de la variation de la vitesse et de la charge, en appliquant la commande par mode glissant sur la génératrice asynchrone à cage d'écuréuil. On a d'abord présenté le principe de cette commande et sa description. Puis, on a élaboré et appliqué le modèle de la commande par mode glissant. Enfin, on a présenté et discuté les résultats de la simulation. On a conclu que la commande par mode glissant est insensible et robuste vis-à-vis de la variation de la charge et de la vitesse.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de ce mémoire était d'étudier les éoliennes autonomes, dans le cas de l'alimentation des sites isolés. Plus précisément, maintenir la tension à la sortie du redresseur MLI constante vis-à-vis de la variation de la vitesse d'entraînement et de la charge.

Face à cet objectif, nous avons réalisé une étude consistant à établir deux commandes (commande vectorielle, commande par mode glissant), afin d'établir un bilan sur les performances de ces commandes. On a fait subir aux deux commandes les mêmes contraintes afin de comparer entre elles.

Les deux techniques de commande appliquées dans le cas de l'influence de la variation de la vitesse et de la charge ont montré une bonne régulation de la tension redressée et du flux ainsi qu'une bonne robustesse vis-à-vis de ces variations. Globalement, les résultats obtenus par la commande par mode glissant en terme de régulation de la tension redressée sont meilleurs que ceux obtenus par le commande vectorielle. Surtout lors des tests de variation de la charge.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. Mavoungou - " Étude des systèmes éoliens raccordés au réseau électrique a l'aide de convertisseurs multiniveaux ", Mémoire de master, École de Technologie Supérieure, Montréal, Canada, 2014.
- [2] F. Poitiers - " Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne - Machine asynchrone à cage autonome - Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau ", Thèse de doctorat, Université de Nantes, France, 2003.
- [3] P.W. Carlin, A.S. Laxson, E.B. Muljadi - " The history and state of art of variable-speed wind turbine technology ", NREL/TP-500-28607, USA, 2001.
- [4] B. Multon, G. Robin, O. Gergaud, H. Ben Ahmed - " Le génie électrique dans le vent : recherches dans le domaine de la génération éolienne ", congrès Jeunes Chercheurs en Génie Électrique, Saint Nazaire, France. 10p. <hal-00674684>, 2003.
- [5] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi - " Eoliennes ", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. BM 4 640 1 - BM 4 640 21, France.
- [6] O. De Vries - " On the theory of the horizontal axis wind turbine ", Annu. Rev. Fluid. Mech, 15, pp. 77-96, USA, 1983.
- [7] J.L. Menet, L.C. Valdès, B. Ménart - "A comparative calculation of the wind turbines capacities on the basis of the L- criterion", Renewable Energy, pp. 491-506, 2001
- [8] A. Davigny - " Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie ", Thèse de doctorat, Université Lille 1, France, 2007.
- [9] P. Leconte - " Techniques de l'ingénieur " BM 4 640 18, France.

- [10] A. Mirecki - " Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance ", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2005.
- [11] M. L. Elhafyani, S. Zouggar, A. Aziz et M. Benkaddour - " Conception et modélisation d'un système éolien contrôlé par un régulateur de tension ", Colloque International Sur les Énergies Renouvelables (CER'2007), Oujda, Maroc, 2007, pp. 1-5.
- [12] K. Idjdarene - " Contribution à l'Étude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes ", Thèse de doctorat, en cotutelle avec Université de Béjaia (Algérie) et Université de Lille 1 (France), 2010.
- [13] A. Boyette - " Contrôle – commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne ", Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, France, 2006.
- [14] G. Buche - " Commande vectorielle de machine asynchrone en environnement temps réel matlab /stimulink", Mémoire d'ingénieur, Conservatoire National des art et Métiers, Grenoble, France, 2001.
- [15] A. Nesba, R. Ibtouen et O. Touhami - " Dynamic performances of self-excited induction generator feeding different static loads ", Serbian Journal of Electrical Engineering, vol 3, No 1, pp. 63-76, 2006.
- [16] S. S. Murthy, C. Prabhu, A. K. Tandon et M. O. Vaishya - " Analysis of series compensated self excited induction generators for autonomous power generation ", International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth, vol. 2, pp. 687-693, 1996.
- [17] L. Shridhar, B. Singh, C. S. Jha, B.P. Singh et S. S. Murthy - " Selection of capacitors for the self-regulated short shunt SEIG excited induction generator ", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 10, No 1, pp. 10-17, 1995.
- [18] A. Tounzi - " Utilisation de l'énergie éolienne dans la production de l'électricité ", Journées du club EEA, pp.1-14, Paris, France, 1999.
- [19] M. Al-Saffar, E. Nho, et T. A. Lipo - " Controlled shunt capacitor self-excited induction generator ", IEEE Industry Applications Conference, Thirty-Third IAS Annual Meeting, vol. 2, pp. 1486-1490, 1998.

- [20] A. A. Naassani, E. Monmasson, et j. p. Louis - " Synthesis of direct torque and rotor flux control Algorithms by means of sliding-mode theory ", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 52, no 3, pp. 785-799, 2005.
- [21] S. N. Mahato, S. P. Singh, M. P. Sharma - " Direct vector control of stand-alone self-excited induction generator ", Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), International Conference, pp. 1-6, New Delhi, Inde, 2010.
- [22] K. Idjdarene, D. Rekioua, T. Rekioua, A. Tounzi - " Vector control of autonomous induction generator taking saturation effect into account ", Energy Conversion and Management, Vol 49, no 10, pp. 2609–2617, 2008.
- [23] B. A. Zahir, J. G. Kettleborough, I. R. Smith - " A stand alone induction generator model producing a constant voltage constant frequency output ", Emerging Technologies, 4th International Conference, pp. 83-86, Rawalpindi, Pakistan, 2008.
- [24] A. Kishore, R. C. Prasad, B. M. Karan - " Design of field oriented controller to improve dynamic characteristics of three phase self excited induction generator ", Industrial Electronics and Applications, 1ST IEEE Conference, pp. 1-6, Singapore, 2006.
- [25] D. Seyoum, F. Rahman and C. Grantham - " Terminal voltage control of a wind turbine driven isolated induction generator ", Applied Power Electronics Conference and Exposition, vol.2, pp. 846 - 852, University of New South Wales, Sydney, Australia, 2003.
- [26] M. Bašić, D. Vukadinović, and Miljenko Polić - " Fuzzy DC-voltage controller for a vector controlled stand-alone induction generator ", International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing, Vol. 7, no 3, pp. 181-190, 2013.
- [27] S. Meddouri, K. Idjdarene and A. Aberbour - " Fuzzy vector control of isolated induction generator taking the saturation effect into account ", Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), International Conference, pp. 1-7, Tunis, 2014.
- [28] L. Louze - " Production décentralisée de l'énergie électrique :Modélisation et contrôle d'une génératrice asynchrone auto excitée ", Thèse de doctorat, Université Mentouri, Constantine, Algérie, 2010.
- [29] V. Utkin, and HoonLee - " Chattering problem in sliding modes control systems ", International Workshop on Variable Structure Systems, pp 346-350, Alghero, Italy, 2006.

- [30] L. Louze, A.L. Nemmour, A. Khezzar, M.E. Hacil and M. Boucherma - " Cascade sliding mode controller for self-excited induction generator ", *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 12, no 4, pp. 617 – 626, Université des Frères Mentouri, Cosnstantine, Algérie, 2009.
- [31] J. P. Caron, J. P. Hautier "Modélisation et commande d'une machine asynchrone", *Méthode et pratique de l'ingénieur*, collection dirigée par Pierre Borne, Edition TECHNIP.
- [32] L. Baghli "Contribution à la commande de la machine synchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques", *Thèse de doctorat*, Université Henri Poincaré, Nancy-1, France, 1999.

## IV.5 Résumé

Les travaux de ce mémoire ont pour objectif d'étudier la machine asynchrone à cage dans le contexte d'une conversion de l'énergie éolienne dans des sites isolés. Après un bref rappel des concepts de la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique, ce document dresse un état de l'art des différentes solutions électrotechniques utilisées tant dans le domaine de production de masse que dans celui de l'alimentation de sites isolés. Le second chapitre est dédié à la modélisation numérique de la machine asynchrone à cage d'écureuil où on a présenté son principe de fonctionnement et sa modélisation ainsi on a élaboré un modèle mathématique de l'auto-amorçage par un convertisseur statique. La dernière partie du mémoire est consacrée à la comparaison de deux techniques de commande de la génératrice asynchrone, autonome, débitant sur un redresseur à MLI (commande vectorielle, commande par mode glissant). Le but de ces techniques est de maintenir une tension constante à la sortie du redresseur pour des charges et des vitesses variables. Cette tension est ensuite ondulée à la bonne amplitude et fréquence pour une utilisation en site isolé. Les résultats de simulation ont montré l'efficacité de ces techniques ainsi que les intérêts et les limites de chacune d'elles.

### Abstract

The work of this thesis aims to study the induction machine in the cage context of a conversion of wind energy in remote locations. After a brief reminder of concepts of conversion of wind energy into electrical energy, the document takes stock in the art different solutions used Electrotechnical both in the field of production of mass than in the supply of isolated sites. The second chapter is dedicated to the numerical modeling of asynchronous machine with squirrel cage where it presented its operating principle and its modeling, a mathematical model was developed for self-initiation by a static converter. The last part of memory is devoted to the comparison of two control techniques of the generator asynchronous, autonomous, debiting a rectifier PWM (vector control, sliding mode control). The purpose of these techniques is to maintain a constant voltage at the rectifier output for loads and variable speeds. This voltage is then waved to the proper amplitude and frequency for use in isolated locations. Simulation results have shown the effectiveness of these techniques and the interests and limitations of each.