



**République Algérienne Démocratique et
Populaire**



**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de
la Recherche Scientifique**

UNIVERSITE D'EL-OUED

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Spécialité : Génie mécanique

Option : Electromécanique industriel

Thème

**Etude d'un générateur asynchrone à double
alimentation avec système de stockage pour
la production éolienne**

Devant le jury composé de : Présenté par :

.....	Président	- BEN ABD ALLAH ABD ERRAHMANE
.....	Examineur	- GUERRAH AMARA
.....	Examineur	- BEN ABD ALLAH MOUAAD
A. GUERRAH	Encadreur	

2013-2014

Dédicace

*À nos parents,
À nos familles,
À nos amis.*

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous remercions ALLAH, notre créateur de nous avoir donné les forces pour accomplir ce travail.

Nous adressons le grand remerciement à notre encadreur qui a proposé le thème de ce mémoire, aussi pour ses conseils et ses orientations.

Nous avons également l'honneur de remercier l'Administration du Département de Mécanique d'avoir facilité le processus de sélection du mémoire et de l'encadreur, ainsi que de l'organisation et la bonne coordination.

Un grand merci est adressé aux examinateurs d'avoir accepté la lecture et l'évaluation de notre mémoire.

Finalement, nous remercions tous ceux qui ont participé à réaliser ce mémoire.

Tableau des matières

Index des figures	i
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Description générale d'un système éolien	
I.1 Les principales sources d'énergies renouvelables.....	3
<i>I.1.1 L'énergie solaire.....</i>	<i>3</i>
<i>I.1.2 L'énergie éolienne.....</i>	<i>3</i>
<i>I.1.3 La biomasse</i>	<i>3</i>
<i>I.1.4 L'énergie hydraulique.....</i>	<i>3</i>
<i>I.1.5 L'énergie géothermique</i>	<i>4</i>
<i>I.1.6 L'énergie des mers ou énergie marine.....</i>	<i>4</i>
I.2 Définition de l'énergie éolienne	4
I.3 Différents types d'aérogénérateurs.....	5
<i>I.3.1 Eolienne à axe vertical.....</i>	<i>5</i>
<i>I.3.2 Axe horizontal.....</i>	<i>6</i>
I.4 Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal.....	7
<i>I.4.1 le mât.....</i>	<i>7</i>
<i>I.4.2 un rotor.....</i>	<i>8</i>
<i>I.4.3 une nacelle.....</i>	<i>8</i>
I.5 Principe de fonctionnement d'une éolienne	9
I.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	10
<i>I.6.1 Les avantage</i>	<i>10</i>
<i>I.6.2 Les inconvénients</i>	<i>11</i>

Chapitre II : Conversion électromécanique

II.1 Introduction.....	13
II.2 Conversion mécanique - électrique avec multiplicateur	13
<i>II.2.1 A chaîne de conversion à étage continu</i>	<i>14</i>
<i>II.2.2 Conversion continu/alternatif.....</i>	<i>15</i>
<i>II.2.3 Connexion directe au réseau</i>	<i>16</i>

II.3 Conversion mécanique - électrique à attaque directe	18
<i>II.3.1 Machine synchrone.....</i>	<i>19</i>
<i>II.3.2 Machine asynchrone.....</i>	<i>21</i>

Chapitre III : Génératrice électrique et contrôle indépendant des puissances

III.1 Introduction	22
III.2 Description du fonctionnement de la MADA	22
<i>III.2.1 Structure de la machine.....</i>	<i>22</i>
<i>III.2.2 Modes de fonctionnement de la MADA</i>	<i>23</i>
III.3 Modélisation de la MADA	23
III.4 Modèle pour le contrôle indépendant des puissances.....	26
III.5 Commande directe	29
<i>III.5.1 Mise en place de la régulation</i>	<i>29</i>
<i>III.5.2 Synthèse du régulateur PI</i>	<i>30</i>
<i>III.5.3 Présentation de simulations</i>	<i>32</i>
III.6 Commande indirecte.....	33
<i>III.6.1 Commande sans boucle de puissance.....</i>	<i>33</i>
<i>III.6.2 Commande avec boucles de puissance.....</i>	<i>35</i>
<i>III.6.3 Robustesse de la régulation.....</i>	<i>37</i>

Chapitre IV : Stockage de l'énergie

IV.1 Introduction	40
IV.2 Techniques de stockage à long terme	40
IV.3 Techniques de stockage à court terme	41
IV.4 Modélisation de l'unité de stockage	42
IV.5 Contrôle de l'unité de stockage	42
Conclusion générale	44
Références bibliographiques	46

Index des figures

Figure I.1	Exemples des constructions Darrieus.....	06
Figure I.2	Exemples des (Darrieus de type H) et Sa vonius	06
Figure I.3	Type de montage de la voileure.....	07
Figure I.4	Constitution d'une nacelle.....	08
Figure II-1	Exemple d'éolienne avec multiplicateur.....	13
Figure II-2	Schéma de principe des éoliennes à étage continu,	14
Figure II-3	Schéma de principe d'un onduleur de tension pour connexion au réseau	15
Figure II-4	Schéma de principe de la double alimentation	18
Figure II-5	Exemple d'éolienne à attaque directe	19
Figure II-6	Schéma constitutif d'une éolienne à attaque directe de 4.5MW marque.....	20
Figure II-7	Schéma de principe d'une génératrice discoïde	21
Figure III-1	Principe du rotor bobiné.....	23
Figure III-2	Orientation de l'axe d sur le flux statorique.....	25
Figure III-3	Schéma bloc de la MADA.....	29
Figure III-4	Schéma bloc de la commande directe	30
Figure III-5	Système régulé par un PI.....	30
Figure III-6	Résultats de simulations pour la commande directe (Ps en haut, Qs en bas).....	33
Figure III-7	Schéma bloc de la commande indirecte (Ps en haut, Qs en bas).....	34
Figure III-8	Résultats de simulation pour la commande indirecte (Ps en haut, Qs en bas).	35
Figure III-9	Schéma bloc de la commande indirecte avec boucles de puissance	36
Figure III-10	Résultats pour la simulation avec la commande indirecte avec bouclage des puissances	37
Figure III-11	Commande indirecte avec bouclage des puissances et variation de Rs de 50%.....	38
Figure III-12	Commande indirecte avec bouclages des puissances et variation de Ls de 50%	39
Figure IV.1	Schéma bloc de l'unité de stockage.....	43

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La production d'électricité par l'énergie éolienne intéresse de plus en plus les pays afin de produire une énergie propre et durable, et l'état avancé des recherches dans le domaine éolien montre une volonté de développer des éoliennes toujours plus puissantes et capables de capter au mieux la puissance disponible dans le vent, beaucoup de recherches sont faites et se font en ce moment sur les stratégies des différentes chaînes de conversion utilisées pour la production d'électricité éolienne. Une grande partie des éoliennes installées de nos jours sont équipées de machines asynchrones à double alimentation (MADA). Cette dernière permet une production d'électricité à vitesse variable, ceci permet alors de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent. Ces éoliennes sont aussi équipées d'hélices à angle de calage de pale variable pour s'adapter aux conditions de vent. L'ensemble de l'éolienne est contrôlé de manière à maximiser en permanence la puissance produite en recherchant le point de fonctionnement à puissance maximum communément appelé MPPT.

Notre objectif dans ce travail consiste à la présentation de l'étude des différentes commandes d'une éolienne à vitesse variable basée sur une MADA et leur impact sur la stabilité des réseaux électriques, on a présenté deux types de commande une classique (commande vectorielle direct), l'autre plus modernes (control direct de puissance) pour obtenir des hautes performances et une meilleure exécution de la génératrice à double alimentation, il faut concevoir une commande robuste adéquate, qui rende le système insensible aux perturbations extérieures et aux variations paramétriques. Il existe différentes stratégies dans littérature pour résoudre le problème de la commande de MADA.

Ce mémoire est alors divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre fait l'objet de généralités sur le système éolien qui donne un aperçu sur les différents types d'éoliennes (à l'axe vertical, horizontal), leurs caractéristiques technologiques, leurs systèmes de régulation et de protection, ainsi que les différents types de génératrices utilisées dans l'éolien ont été présentés.

Le second chapitre est consacré à la présentation d'une modélisation du système éolien comportant essentiellement les caractéristiques et stratégies de fonctionnement de l'éolienne.

Ensuite viendront dans le chapitre 3 la modélisation des autres éléments constitutifs de notre dispositif de production éolienne. C'est ici que sera détaillé le dispositif de stockage qui va nous permettre de maintenir constante la puissance fournie au réseau en emmagasinant et restituant l'énergie que va produire la MADA en fonction des conditions de vent. Cette puissance fournie au réseau doit être choisie en concordance avec la puissance moyenne disponible dans le vent.

Enfin le dernier chapitre, pour la première partie sera consacré au stockage à long terme, une deuxième partie au stockage à court terme, l'utilisation du stockage dans le système électrique sera ensuite évoquée en se focalisant sur son utilisation dans les réseaux et dans les systèmes de production à Energie Renouvelable

CHAPITRE I :

**Description générale d'un système
éolien**

I.1 Les principales sources d'énergies renouvelables

I.1.1 L'énergie solaire

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kW/m^2) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année.

I.1.2 L'énergie éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. Dans l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. Selon le Global Wind Energie Council (GWEC), le parc éolien pourrait atteindre une puissance installée de 230 GW en 2020, soit plus de 5 fois la puissance installée en 2005 qui était de 40 GW. Le principal inconvénient de cette source d'énergie est l'indisponibilité et l'imprévisibilité du vent

I.1.3 La biomasse

La biomasse est répartie en quatre catégories : la biomasse sèche (bois, déchets agricoles...), le biogaz, les déchets municipaux renouvelables solides et la biomasse humide (bioéthanol, biodiesel, huile végétal ...) En 2005, la biomasse est la deuxième source d'électricité renouvelable mondiale avec 1% de la production d'électricité mondiale.

I.1.4 L'énergie hydraulique

L'hydraulique est actuellement la première source renouvelable d'électricité. La puissance hydroélectrique installée dans le monde en 2004 était estimée à 715 GW, soit environ 19% de la puissance électrique mondiale. Près de 15 % de toute l'électricité installée en Europe est d'origine hydraulique. On discerne la petite hydraulique

I.1.5 L'énergie géothermique

Classiquement, trois types de géothermie sont distingués selon le niveau de température disponible à l'exploitation :

- la géothermie à haute énergie ou géothermie privilégiée qui exploite des sources hydrothermales très chaudes, ou des forages très profonds où de l'eau est injectée sous pression dans la roche. Cette géothermie est surtout utilisée pour produire de l'électricité.
- La géothermie de basse énergie : géothermie des nappes profondes (entre quelques centaines et plusieurs milliers de mètres) aux températures situées entre 30 et 100 °C. La principale utilisation est appliquée pour les réseaux de chauffage urbain.
- La géothermie de très basse énergie : géothermie des faibles profondeurs aux niveaux de température compris entre 10 et 30 °C. Sa principale utilisation est le chauffage et la climatisation individuelle. Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie de profondeur (haute et basse énergie), présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent). C'est donc une source d'énergie quasi-continue, car elle est interrompue uniquement par des opérations de maintenance sur la centrale géothermique ou le réseau de distribution de l'énergie,

I.1.6 L'énergie des mers ou énergie marine

C'est une énergie renouvelable très peu exploitée jusqu'ici. Elle désigne l'énergie produite par les vagues et les marées, ainsi que l'énergie thermique de l'océan chauffé par les rayons du soleil. Les océans, qui couvrent presque 70 % de la surface du globe, pourraient constituer la source d'énergie renouvelable du futur, même si, pour l'instant, leur exploitation pour produire de l'électricité n'est pas rentable.

I.2 Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne qui tire son nom du dieu grecque responsable des vents nommé Eole, est produite par la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice. Il est possible ainsi de produire deux sortes d'énergies. Premièrement, l'hélice peut se relier à des systèmes mécaniques servant à mouliner le grain ou à pomper l'eau (il s'agit du principe des moulins à vent). Il est aussi possible de rattacher l'hélice à un générateur transformant l'énergie mécanique en une énergie électrique. La quantité d'énergie produite dépend en premier lieu de la vitesse du vent élevée au carré, puis de la surface balayée par les pales

et de la densité de l'air. Il faut pour produire de l'électricité un apport minimal du vent d'environ 12-14 km/h et des vents de 50-60 km/h pour produire à pleine puissance. Afin d'éviter d'abîmer l'équipement, la production doit être interrompue si les vents dépassent les 90 km/h. Éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en:

- énergie électrique, dans le cas d'un aérogénérateur.
- énergie mécanique, dans le cas d'une éolienne de pompage.

I.3 Différents types d'aérogénérateurs

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice :

_ Les turbines éoliennes à axe horizontal.

_ Les turbines éoliennes à axe vertical.

I.3.1 Eolienne à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical (Figure I-1, Figure I-2) ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le 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. Il existe principalement trois technologies Vaut (Vertical Axis Wind turbine) : les turbines Darrieus classique ou à pales droites (H-type) et la turbine de type Savonius comme montré à la Figure I-1 et la Figure I 2. Toutes ces voilures sont à deux ou plusieurs pales. 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 (Figure II-3) est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. 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. Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés.



Figure I-1 : Exemples des constructions Darrieus.

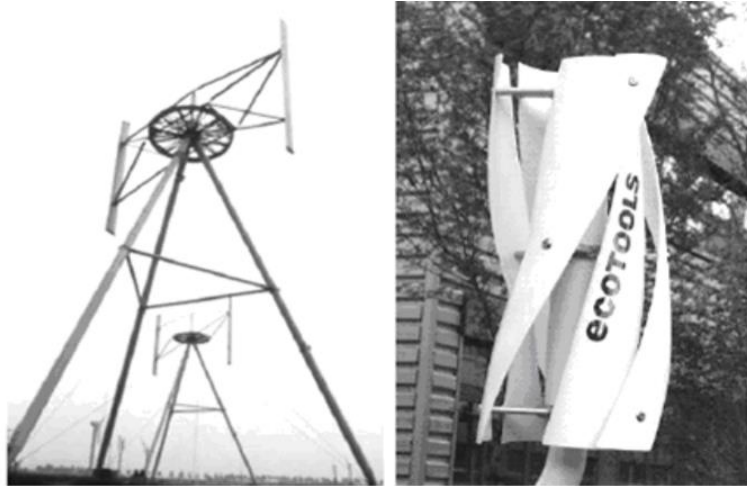


Figure I-2: Exemples des (Darrieus de type H) et Savonius.

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 'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent. Enfin la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances élevées.

I.3.2 Axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement 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. 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 multicritères. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal.

Aujourd'hui, pratiquement les seules éoliennes commerciales sont à axe horizontales.

Les plus grandes éoliennes mesurent jusqu'à 180m en bout de pale avec un moyeu à 120m pour une puissance de 6 MW. Les éoliennes à axe vertical ont été prometteuses dans les années 80 et au début des années 90, mais leur faible rendement aérodynamique

ainsi que les fluctuations élevées de la puissance électrique générée les ont écartées du marché. Dans ce contexte, quelques notions principales au sujet de la technologie éolienne ont été données comme les méthodes de description du gisement éolien, des exemples d'architectures, les génératrices utilisées, etc. Nos travaux portent sur un système éolien de petite puissance dédié à un site perturbé comme le milieu urbain, des exemples de réalisations pratiques et industrielles de cette catégorie sont proposés. La turbine à axe vertical de type Savonius qui semble être particulièrement adaptée est alors étudiée du point de vue de son rendement en collaboration avec l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse donnant des indices sur les différents perfectionnements du rendement possibles.

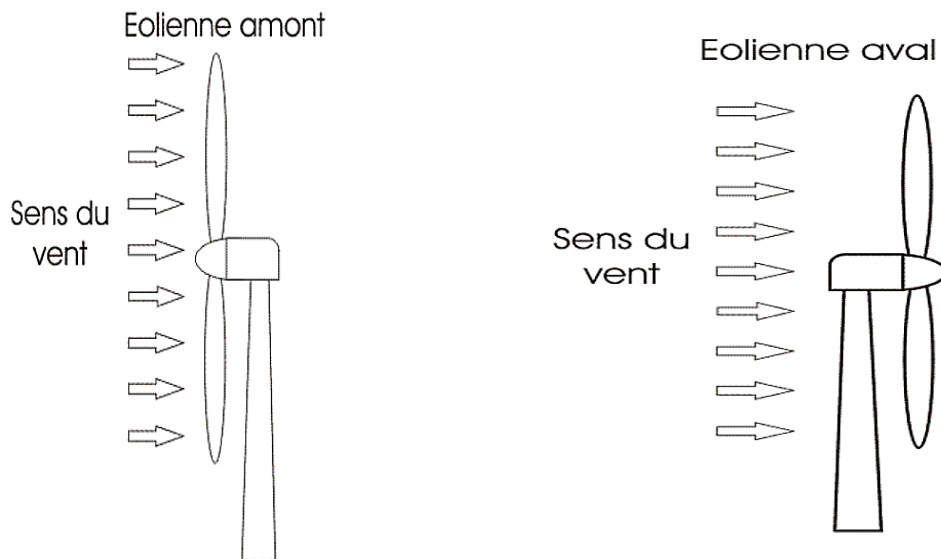


Figure I-3: Type de montage de la voilure.

I.4 Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal

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

I.4.1 le mât

Généralement en métal, supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle + rotor). Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne. Le mât des éoliennes atteint aujourd'hui 80 m de haut pour les plus puissantes (exceptionnellement

jusqu'à 100 m). Les éoliennes sont-elles si haut perchées C'est parce que le vent souffle plus fort à quelques dizaines de mètres de hauteur, où il n'est pas perturbé par l'effet des obstacles : relief, arbres, maisons...Et la puissance fournie par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent.

La tour doit être suffisamment solide pour supporter non seulement la nacelle et le rotor, mais aussi les charges puissantes provoquées par le vent : d'une part la puissance exercée par le vent directement sur la tour, d'autre part la puissance transmise par le rotor.

I.4.2 un rotor

Un rotor composé de plusieurs pales (en général 3) et du nez de l'éolienne. Les pales sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes : polyester renforcé de fibre de verre et/ou fibre de carbone. Leur longueur atteinte actuellement entre 30 et 55 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 110 mètres. La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales (un cercle), donc au carré de son diamètre rotor.

I.4.3 une nacelle

Une nacelle montée au sommet du mât et abritant les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine. Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne

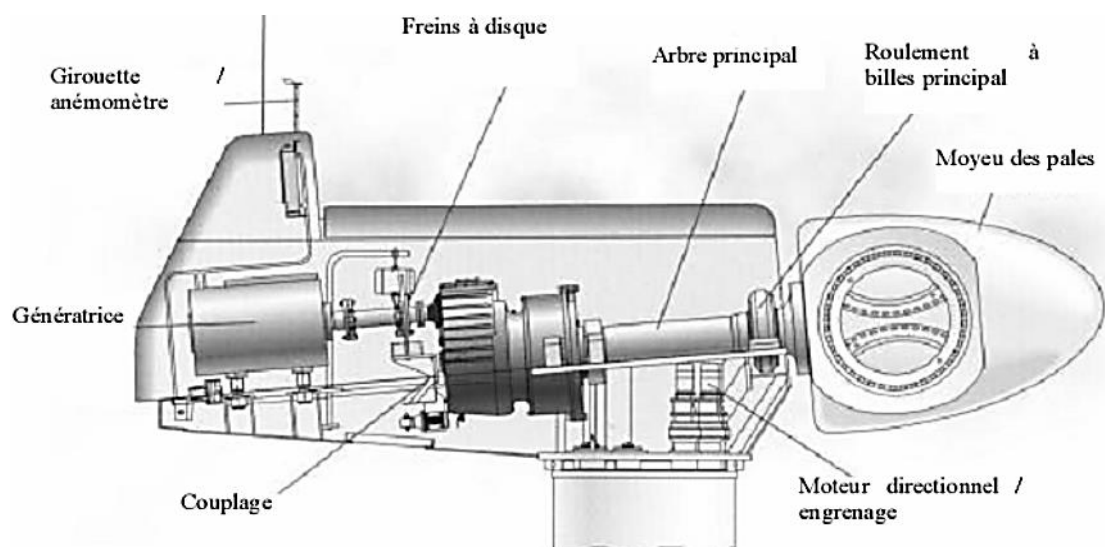


Figure I-4 : Constitution d'une nacelle.

Les différents composants d'une nacelle :

- Le multiplicateur de vitesse : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.
- L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet et d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.

La génératrice : c'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Un contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine

- lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble « rotor plus nacelle » face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir.
- Divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs radiateurs d'eau ou d'huile. Grâce à un système de supervision et contrôle d'une éolienne peut être arrêtée automatiquement et très rapidement en cas de nécessité. La sécurité du fonctionnement des éoliennes est ainsi assurée en continu.
- dans le cas des éoliennes produisant de l'électricité, un poste de livraison situé à proximité du parc éolien permet de relier ce parc au réseau électrique pour y injecter l'intégralité de l'énergie produite.

I.5 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un alternateur qui produit l'électricité. La vitesse de rotation du rotor (de 12 à 15 tours/minute) doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tours/minute, vitesse nécessaire au bon fonctionnement de l'alternateur. Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée (50 Hz en Europe), tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent. La tension de l'électricité produite par l'alternateur, de l'ordre de 600 à 1000 volts, est

ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mât, jusqu'à un niveau de 20 ou 30 KV. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public (en France, le réseau EDF). La tension de l'électricité produite par la centrale peut alors être de nouveau transformée, en fonction du niveau de tension de raccordement de la centrale au réseau public. Pour les centrales éoliennes de 10 à 15 MW de capacité, le niveau de tension de raccordement est, en France, généralement de 20 KV. Pour les centrales de capacité plus importante, le niveau de tension de raccordement peut aller de 60 à 90 KV, voire même 225 KV. Pour pouvoir démarrer, une éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimale, de l'ordre de 10 à 15 km/h. Et au-delà de 90 km/h, les turbines s'arrêtent de tourner. Tout d'abord, la fréquence d'occurrence des vents d'une vitesse supérieure à 90 km/h est généralement faible (inférieure à 1 %), et si les éoliennes fonctionnaient dans ces conditions, elles subirait des efforts importants qui entraîneraient une usure prématurée de leurs équipements. Compte tenu du faible gain relatif sur la production que représente un fonctionnement par vent fort, les ingénieurs préfèrent, dans ces conditions, stopper les machines et attendre le retour de vents plus modérés et plus réguliers. Si les éoliennes ne fonctionnent pas au-delà d'une vitesse de vent de 90 km/h, leurs fondations n'en sont pas moins conçues pour résister à des vents beaucoup plus importants... La puissance d'une éolienne classique est de 1 à 1,5 MW, mais les éoliennes de la nouvelle génération atteignent 2 à 3 MW et des modèles de 5 MW sont d'ores et déjà testés par les constructeurs.

I.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

I.6.1 Les avantages

- L'énergie éolienne, propre, fiable, économique, et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement.
- Bien que ne pouvoir envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et

renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO₂, etc.

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuite, et inépuisable.
- Chaque mégawattheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique.
- Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
- L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple.

I.6.2 Les inconvénients

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- L'impact visuel : Ça reste néanmoins un thème subjectif. Des images de synthèse sont élaborées pour montrer l'impact visuel. Dans la plus grande majorité des cas, les enquêtes réalisées montrent une réelle acceptation des populations voisines ou visitant un site éolien.
- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques ont été réduits par l'utilisation de nouveaux profils, extrémités de pale, mécanismes de transmission etc. et ne sont plus une gêne, même proche des machines (50-60 dB équivalent à une conversation). Une distance d'environ huit fois le diamètre permet de ne plus distinguer aucun bruit lié à cette activité (< 40 dB). De plus, il faut souligner que le bruit naturel du vent, pour des vitesses supérieures à 8 m/s, a tendance à masquer le bruit rayonné par l'éolienne.

- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. Plus le parc éolien est dense plus ce risque est grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger. Cependant, aucune étude sérieuse ne semble actuellement avoir démontré la réalité du danger pour les oiseaux.
- La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suit, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.

CHAPITRE II:

Conversion électromécanique

II.1 Introduction

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique. 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. Afin de valider notre étude théorique de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, la réalisation pratique sinon la simulation du processus est nécessaire. Pour ce faire, on a besoin de modéliser la chaîne à étudiée. On s'intéresse dans ce chapitre à la modélisation de la chaîne de conversion globale.

II.2 Conversion mécanique - électrique avec multiplicateur

En fonction de la puissance d'éolienne et de l'utilisation souhaitée pour l'énergie produite, on rencontre dans la littérature de nombreuses chaînes de conversion. Elles permettent soit l'exploitation directe de l'énergie, soit le passage par un étage continu et éventuellement un stockage. L'on peut distinguer deux constructions différentes de la conversion selon que l'on utilise, ou pas, un multiplicateur de vitesse

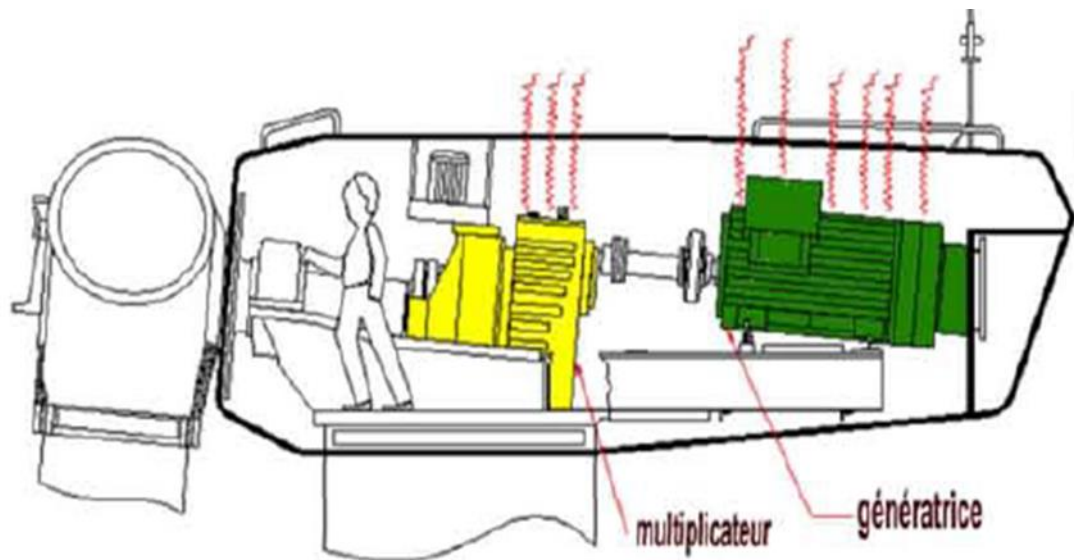


Figure II-1 : Exemple d'éolienne avec multiplicateur.

II.2.1 A chaîne de conversion à étage continu

Le passage par un étage continu permet une plus grande liberté lors de la gestion de l'énergie produite par l'éolienne car on n'a pas de fréquence imposée. C'est un moyen très approprié pour une alimentation de laboratoire ou une habitation isolée qui possède des appareils fonctionnant directement en basse tension continue; de plus, il est facile de stocker de l'énergie dans des batteries pour obtenir une source *permanente*. Par contre, il s'agit de se connecter au réseau alternatif, il faut y associer un onduleur ainsi que des filtres et des transformateurs qui permettront de convertir la tension continue

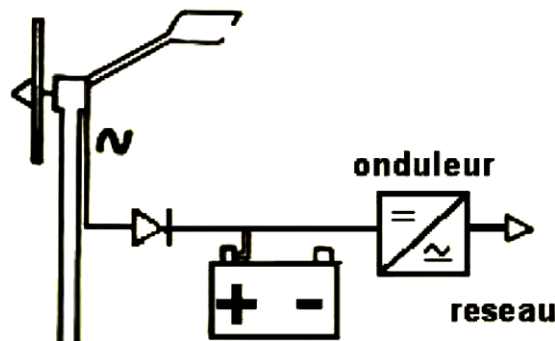


Figure II-2 : Schéma de principe des éoliennes à étage continu, connectées au réseau.

- **Machine à Courant Continu**

Ce type de machine n'est utilisée que sur les éoliennes de très faible puissance (inférieure 500W) pour charger des batteries et alimenter des installations de type station de mesure. Elles sont également utilisées sur les bateaux, en association avec des panneaux solaires. Pour une telle machine, les équations de fonctionnement sont simples. Elle comporte un stator portant le circuit inducteur (bobinages alimentés ou aimants permanents) *excitation* et un rotor constituant le circuit induit connecté aux bornes de sortie, via le système balais collecteurs. La tension est proportionnelle à la vitesse de rotation de l'éolienne et à la valeur du courant d'excitation.

- **Machine Synchronne**

C'est une machine de conception plus simple que la machine à courant continu. Son stator comporte des enroulements induits monophasés ou triphasés et son rotor porte un inducteur bobiné ou à aimants permanents. Ici il n'y a plus de système balais collecteur. L'alimentation de l'inducteur se fait par une petite génératrice inversée en bout d'arbre. La tension statique est proportionnelle au courant d'excitation et à la vitesse de l'éolienne, la fréquence de la tension de sortie dépend aussi de la vitesse de rotation. Une connexion

directe au réseau n'est pas envisageable car l'éolienne devrait fonctionner toujours à la vitesse de synchronisme. C'est pour cela que l'on redresse la tension statique avec un pont de diodes ou de thyristors pour obtenir une tension continue que l'on met en forme par la suite. Ces machines sont largement répandues pour la production d'électricité et sont bien adaptées à la production éolienne. Le développement de nouvelles commandes permettant d'optimiser la conversion énergétique, avec des systèmes fonctionnant avec des hélices à pas variable, est un axe de recherche largement étudié par de nombreux laboratoires.

II.2.2 Conversion continu/alternatif

Pour les éoliennes qui ne sont pas directement connectées au réseau, il faut un dispositif qui convertisse la tension continue en tension alternative sinusoïdale avec une pollution harmonique minimale.

Des onduleurs à trois bras sont mis en œuvre pour fournir un système de tensions triphasées.

Ils peuvent être de deux types:

- Onduleur autonome, avec des transistors de puissance de type IGBT commandés en Modulation de Largeur d'Impulsion.
- Onduleur assisté par le réseau, avec des thyristors retardés à l'amorçage.

Une fois la tension alternative générée, il faut filtrer les courants qui peuvent ne pas être sinusoïdaux (cas de l'onduleur assisté) pour limiter leurs harmoniques qui risquent de perturber le réseau. Des filtres passifs sont souvent utilisés mais désormais le développement des filtres actifs offre de nouvelles possibilités. Des transformateurs à couplage zigzag ou double étoile adaptent la tension et font la mise en forme du signal

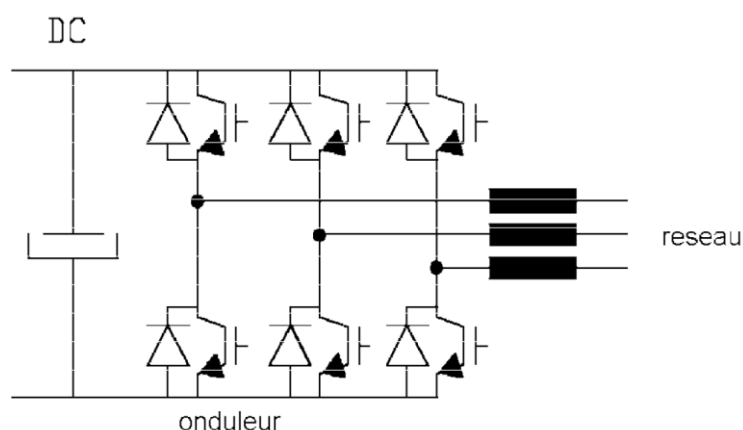


Figure II-3 : Schéma de principe d'un onduleur de tension pour connexion au réseau.

Pour les grands parcs éoliens, différentes stratégies sont mises en place pour optimiser la conversion. On peut avoir:

- **Un onduleur par éolienne:**

Ce sont des onduleurs de petite puissance, faciles à réaliser avec les composants électroniques courants. Par contre, l'onduleur est sous-exploité la plupart du temps car il doit être dimensionné pour la puissance maximale de l'éolienne.

- **Un onduleur pour tout le parc:**

Cette solution permet d'optimiser la puissance de l'onduleur car on peut se baser sur la puissance moyenne de l'ensemble du parc. Cependant, l'onduleur doit supporter de très forts courants et les composants de puissance doivent alors supporter ces contraintes.

- **Un onduleur pour un groupement d'éoliennes:**

C'est une solution intéressante car elle permet de construire des onduleurs de puissance raisonnable tout en les exploitant à un bon niveau de charge.

La mise en place d'un parc éolien avec Nage continu requiert donc une Nupe approfondie quant à la puissance des éoliennes et des onduleurs. Il peut y avoir lieu de créer des sous réseaux en tension continue pour connecter plusieurs éoliennes à un onduleur puis alimenter le réseau. La commande des onduleurs peut permettre une aide à la gestion du réseau et aux services système en régulant les puissances actives et réactives injectés.

II.2.3 Connexion directe au réseau

- **Machine Asynchrone**

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

Pour produire de l'énergie, cette machine doit être magnétisée. Cette magnétisation peut provenir soit de condensateurs connectés en parallèle avec les enroulements statoriques ou du réseau. Lorsqu'elle est connectée au réseau, elle ne produit que lorsque sa vitesse de rotation est légèrement supérieure à sa vitesse de synchronisme. Il y a un glissement de l'ordre de 1 à 5%.

Si la vitesse de rotation du rotor est inférieure à la vitesse de synchronisme, il faudra déconnecter la génératrice asynchrone du réseau pour que l'éolienne ne se transforme pas en ventilateur car la machine asynchrone se trouverait en fonctionnement moteur.

De plus, pour permettre une production sur une large gamme de vitesses de vent, ces éoliennes sont équipées de rotor à pas variable qui permet d'ajuster la caractéristique de

l'hélice en fonction de la vitesse du vent pour produire une puissance électrique constante à vitesse de rotation constante.

Le grand avantage de ce type d'éolienne est sa simplicité et sa robustesse. En effet, pour la gestion de la puissance produite il suffit de connecter ou déconnecter la génératrice du réseau en fonction de sa vitesse de rotation. La conversion électromécanique ne comporte aucune pièce d'usure (pas de système balais collecteurs) et aucun composant électronique à l'exception ne peut n'être du relais de connexion au réseau. De plus, si la machine asynchrone est correctement bobinée avec une répartition sinusoïdale, des enroulements, les tensions et courants produits sont de forme sinusoïdale avec un résidu harmonique négligeable. Il n'est donc pas nécessaire d'installer un système de filtrage avant la connexion au réseau. Cette structure présente un inconvénient majeur: la production ne peut se faire que SI le réseau impose les tensions et la fréquence. Le fonctionnement en autonome nécessite des condensateurs et une commande plus complexe pour contrôler l'amplitude des tensions et la fréquence.

- **Machine à réluctance variable**

Conçues au départ pour produire des courants de fréquence élevée, les machines à réluctance variable : M II : sont principalement destinées à des applications exigeant de grandes vitesses de rotation ou des entraînements lents à couple élevé. Elles sont également utilisées comme actionneur de positionnement électromécanique tel que les moteurs pas à pas.

On distingue deux types de structures de MRV, les machines à réluctance non-excitées et les machines à réluctance excitées

Les MRV non-excitées sont principalement destinées à des fonctionnements à hautes vitesses, 11e possèdent pas de contact glissant et sont très robustes. L'inconvénient majeur est qu'elles possèdent un facteur de puissance médiocre.

Les MRV excitées pallient à ce problème de facteur de puissance en intégrant une excitation constituée d'une alimentation continue et de bobines ou d'aimants permanents. L'application des machines à réluctance dans les systèmes éoliens est plutôt rare, cependant certaines éoliennes intègrent, comme alternateur de moyenne puissance, des machines à réluctances excitées à denture répartie. L'excitation est le plus souvent réalisée par des aimants permanents, parle alors de machines hybrides.

• **Machine Asynchrone à double alimentation**

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

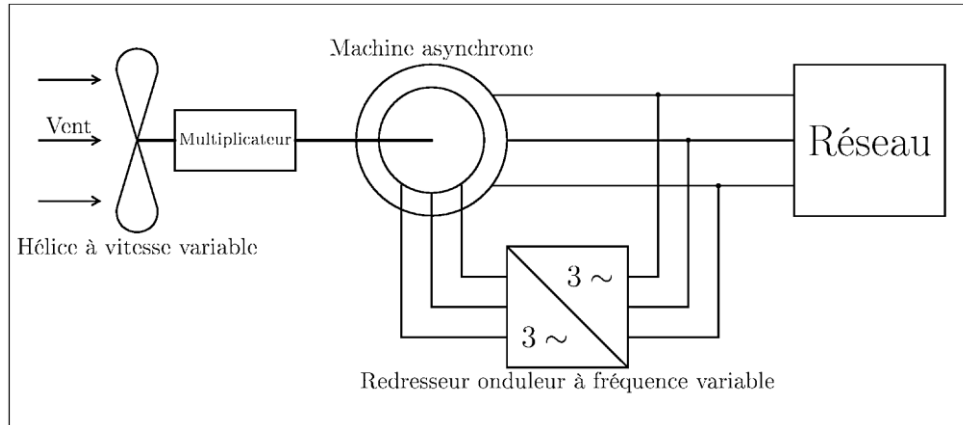


Figure II-4 : Schéma de principe de la double alimentation.

Un connecte toujours i.e. stator au réseau mais ici au lieu de court-circuiter les enroulements rétorques, les alimente en alternatif à fréquence variable à partir du réseau via un onduleur de taille réduite. La puissance à fournir au rotor est faible devant la puissance produite par le stator. De cette manière, il est possible de produire de l'énergie avec des vitesses de rotation du rotor variant dans une large plage. En effet, la fréquence des tensions de sortie d'une machine asynchrone dépend de sa vitesse de rotation et donc du glissement g :

$$g = 100 \frac{\Omega_{synchronismc} - \Omega_{rotor}}{\Omega_{synchronismc}} \quad \text{avec } \Omega: \text{ pulsation mécanique (II.1)}$$

II.3 Conversion mécanique - électrique à attaque directe

Ce type d'éolienne est peu répandu mais se développe de plus en plus. Certains constructeurs se spécialisent dans la réalisation de telles éoliennes qui présentent différents avantages par rapport aux autres éoliennes. Le principe de l'attaque directe est d'avoir la génératrice directement sur l'hélice. Ainsi il n'y a plus de multiplicateur, siège de perte de puissance et source de bruit. En contrepartie, la génératrice ne tourne plus à 1500 tr/min mais à la vitesse de l'hélice, environ 18 à 50 tr/min, il faut donc qu'elle soit de conception différente de celle fonctionnant à plus grande vitesse.

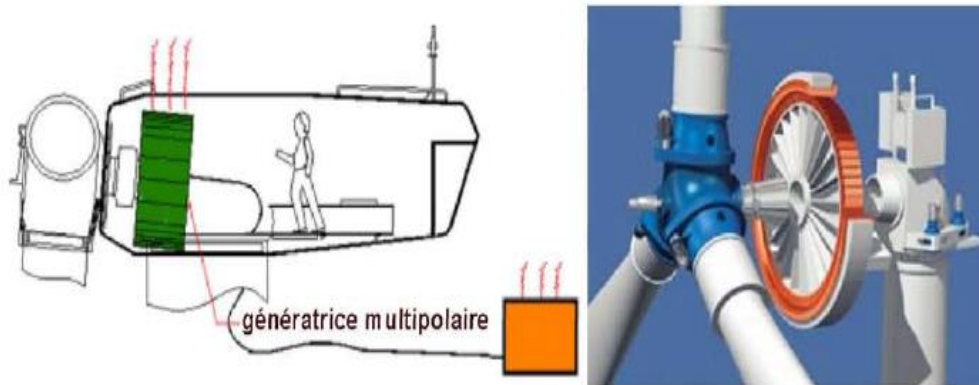


Figure II-5 : Exemple d'éolienne à attaque directe.

Un autre avantage de ces éoliennes est qu'il n'y a qu'une pièce en mouvement pour tout l'éolienne: c'est l'arbre de l'hélice. Il n'y a donc que le palier de celui-ci à entretenir. C'est une maintenance moins lourde que pour les éoliennes à multiplicateur et ces éoliennes devraient alors être plus rentables.

Au niveau de la chaîne de conversion mécanique/électrique, on peut retrouver les mêmes ensembles que pour les éoliennes à multiplicateur, seule la conception des génératrices diffère sensiblement.

Afin de produire de l'électricité avec une faible vitesse de rotation, les génératrices à attaque directe possèdent un grand diamètre pour obtenir une vitesse de déplacement relative importante entre le rotor et le stator et permettre de loger un grand nombre de pôles, permettant ainsi d'obtenir une fréquence de 50Hz pour des vitesses de l'ordre de 15 à 30 tr/min.

II.3.1 Machine synchrone

Toutes les grandes éoliennes à attaque directe sont équipées de génératrices synchrones multipolaires à aimants permanents. Elles produisent des tensions multi phases qui sont redressées par un pont de diodes situé dans la nacelle de l'éolienne. Elles génèrent une tension continue qui alimente un onduleur, installé au pied de l'éolienne et qui la relie au réseau de distribution.

- **Machine multipolaire classique:**

Une majeure partie des génératrices synchrones multipolaires ressemble à la machine synchrone classique. Cependant le rotor et le stator sont inversés. En effet, le rotor forme une couronne entraînée par l'hélice et les aimants sont fixés à l'intérieur de celle-ci.

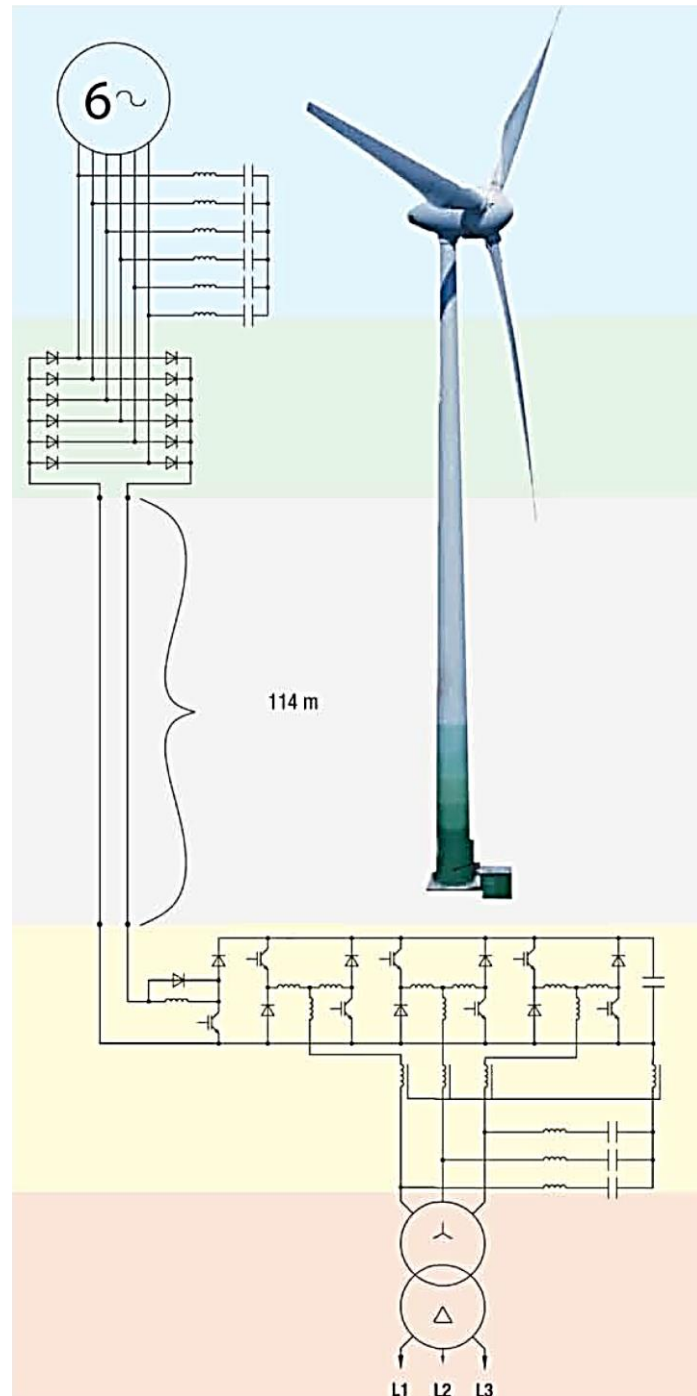


Figure II-6 : Schéma constitutif d'une éolienne à attaque directe de 4.5MW marque ENERCON.

Le stator quant à lui est logé à l'intérieur de la couronne du rotor, il comporte les enroulements et est fixé à la nacelle de l'éolienne. La longueur utile de ces génératrices est faible devant leur diamètre, elles ressemblent plus à de grands alternateurs automobiles qu'à des alternateurs de centrale électrique.

- **Machine multipolaire discoïde**

Certaines éoliennes sont constituées de génératrices dites discoïdes. Leur conception est telle que le stator et le rotor sont des disques *empilés* les uns à côté des autres, le long de l'arbre de l'hélice. Il y a alternance de disques stator, comportant les enroulements, et de disques rotor, équipés d'aimants permanents. Il s'agit toujours d'une conception multipolaire et de grand diamètre. Dans ces machines, le flux magnétique créé par les aimants est parallèle à l'axe de rotation, contrairement aux machines classiques où le flux était radial.

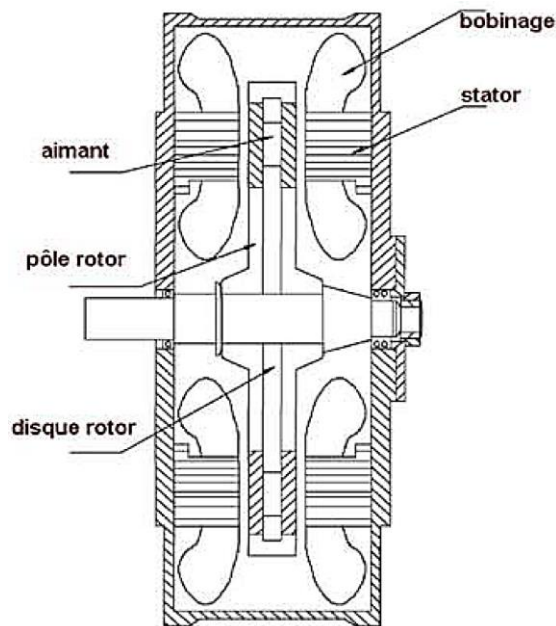


Figure II-7 : Schéma de principe d'une génératrice discoïde.

II.3.2 Machine asynchrone

On peut aussi concevoir et utiliser des machines asynchrones multipolaires pour la production éolienne. Cependant, il n'existe pas encore sur le marché des éoliennes à attaque directe avec ce type de génératrice. Il paraît intéressant d'étudier la faisabilité et le fonctionnement de telles machines pour des puissances élevées. On pourrait aussi envisager des constructions de type discoïde comme pour les machines synchrones. C'est principalement la forte valeur des inductances et la faible puissance massique qui freinent son développement.

CHAPITRE III:

**Génératrice électrique et contrôle
indépendant des puissances**

III.1 Introduction

Maintenant que nous disposons d'une modélisation mécanique, il nous faut choisir et modéliser la génératrice. Après avoir présenté les différentes chaînes de conversion au chapitre 1, nous cherchons un type de génératrice qui nous permettra de commander indépendamment des puissances actives et réactives.

Ainsi, nous nous sommes orientés vers le choix d'une machine asynchrone à double alimentation afin de permettre une production optimale d'électricité quelles que soient les conditions de vent et de vitesse de l'éolienne. De plus, nous avons pu noter au chapitre 1 que la plupart des éoliennes de forte puissance étaient équipées de MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation). Cette machine présente des avantages de par son contrôle et son fonctionnement pour la production d'électricité, en plus de son prix compétitif et de sa grande robustesse.

En comparaison avec la machine asynchrone à cage, la MADA permet d'avoir une plage de vitesse de rotation variant de $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme. De plus, le contrôle des tensions rotoriques nous permet de maîtriser les puissances produites tant au niveau actif que réactif, ce qui est un point très intéressant pour la gestion de l'éolienne et la participation aux services systèmes.

III.2 Description du fonctionnement de la MADA

III.2.1 Structure de la machine

Une MADA a un stator identique à celui d'une machine asynchrone à cage ou d'une machine synchrone. C'est le rotor qui diffère radicalement car il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écureuil mais d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques.

On peut voir sur la Figure III-1 que les enroulements rotoriques sont connectés en étoile et les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants (balais bagues collectrices) permettant d'avoir accès aux tensions et courants du rotor.

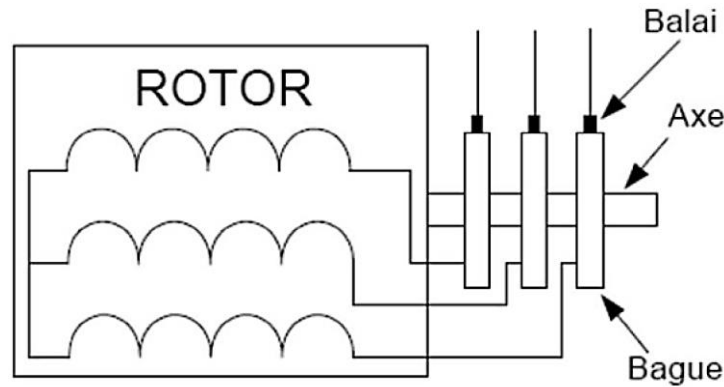


Figure III-1: Principe du rotor bobiné.

III.2.2 Modes de fonctionnement de la MADA

Seul le mode de fonctionnement avec le stator directement connecté au réseau et le rotor alimenté par un onduleur nous concerne dans cette étude. Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur.

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

III.3 Modélisation de la MADA

Afin d'établir la modélisation de la MADA, nous allons déterminer le modèle d'une machine asynchrone à rotor bobiné. Ce modèle sera établi de la même manière que le modèle de la machine asynchrone à cage avec comme différence l'existence de tensions rotoriques non nulles.

Nous partons des équations générales de la machine asynchrone à rotor bobiné qui s'écrivent, dans un repère triphasé, de la manière suivante:

$$\begin{cases} [Vs]_3 = R_s [Is]_3 + d \frac{[\varphi r]_3}{dt} \quad (A) \\ [Vr]_3 = R_r [Ir]_3 + d \frac{[\varphi r]_3}{dt} \quad (B) \end{cases} \quad (III.1)$$

Où $[x]_3 = (xa; xb; xc)^t$

$X=V$ ou I ou φ et $j=S$ ou r

Avec respectivement:

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

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

$[\varphi_s]$ et $[\varphi_r]$ les flux statoriques et rotoriques de la machine.

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

Il est possible d'exprimer les flux en fonction des courants et des différentes inductances propres et mutuelles de la machine par :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = L_s [I_s] + M [I_r] & (C) \\ [\varphi_r] = M [I_s] + L_r [I_r] & (D) \end{cases} \quad (III.2)$$

$$\begin{cases} L_s = l_s - M_s & (E) \\ L_r = l_r - M_r & (F) \\ M = \frac{3}{2} M_{sr} & (G) \end{cases} \quad (III.3)$$

Avec respectivement:

L_s et L_r les inductances cycliques statoriques et rotoriques de la machine.

l_s et l_r les inductances propres statoriques et rotoriques de la machine.

M_s et M_r les inductances mutuelles entre deux phases statoriques et entre deux phases rotoriques de la machine.

M l'inductance magnétisante.

M_{sr} la valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor.

Nous allons maintenant décrire la modélisation dans un repère tournant diphasé (ci, q) en utilisant les transformations de Park et de Concordia permettant la conservation des puissances. Soit θ l'angle électrique entre l'axe d, du repère diphasé et le repère fixe lié à la phase a du stator.

Si l'on applique ces transformations aux flux et tensions intervenant dans les équations de la MADA, nous obtenons le modèle diphasé de celle-ci qui s'écrit sous la forme :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \dot{\theta} \varphi_{qs} & (H) \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \dot{\theta} \varphi_{ds} & (K) \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \dot{\theta} \varphi_{qr} & (L) \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \dot{\theta} \varphi_{dr} & (M) \end{cases} \quad (III.4)$$

Avec respectivement :

$V_{ds}; V_{qs}; V_{dr}$ et V_{qr} les tensions statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système diphasé.

I_{ds}, I_{qs}, I_{dr} et I_{qr} les courants statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système dipha

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Avec respectivement:

- $V_{ds}; V_{qs}; V_{dr}$ et V_{qr} les tensions statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système diphasé.

- I_{ds}, I_{qs}, I_{dr} et I_{qr} les courants statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système diphasé.

θ_s l'angle électrique du champ tournant statorique (Figure III-2).

θ_r l'angle électrique du champ tournant par rapport au rotor (Figure III-2).

- $\varphi_{ds}, \varphi_{qs}, \varphi_{dr}$ et φ_{qr} les flux statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système diphasé.

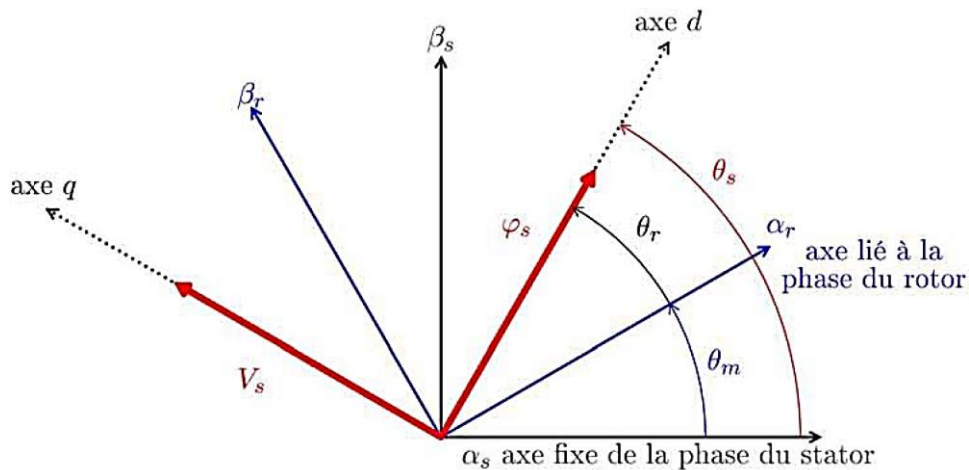


Figure III-2: Orientation de l'axe d sur le flux statorique.

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

$$r_{em} = r_r + f \Omega + J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{III.6})$$

Avec :

- r_{em} le couple électromagnétique.

- r_r le couple résistant.
- f le coefficient de frottement visqueux de la MADA
- Ω la vitesse de rotation de l'axe de la MADA.
- J l'inertie des parties tournantes.

Le couple électromagnétique s'exprime quant à lui en fonction des courants et des flux par:

$$r_{em} = p \frac{M}{L_s} (I_{qr} \varphi_{ds} - I_{qs} \varphi_{qr}) \quad (\text{III.7})$$

Avec P le nombre de paires de pôles de la MADA.

III.4 Modèle pour le contrôle indépendant des puissances

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et l'Ô actives en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions rotoriques, générées par un onduleur, aux puissances actives et réactives statoriques.

Nous utilisons la modélisation diphasée de la machine. On oriente le repère (d, q) afin que l'axe d soit aligné sur le flux statorique φ_s .

Ainsi

$$\varphi_{ds} = \varphi_s \text{ et } \varphi_{qs} = 0 \quad (\text{III.8})$$

Le couple électromagnétique de l'équation 3.7 s'écrit alors:

$$r_{em} = p \frac{M}{L_s} I_{qr} \varphi_{ds} \quad (\text{III.9})$$

Et l'équation des flux 3.8 devient:

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

Si l'on suppose le réseau électrique stable, ayant pour tension simple V_s , cela conduit à un flux statorique φ_s constant. Cette considération associée à l'équation 3.9 montre que le couple électromagnétique r_{em} est directement proportionnel au courant rotoriques en quadrature I_{qr} .

De plus, si l'on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse réaliste pour les machines de forte puissance utilisés pour la production éolienne, les équations des tensions statoriques de la machine se réduisent à:

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d\varphi_s}{dt} \\ V_{qs} = \omega_s \varphi_s \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

Avec ω_s la pulsation électrique des grandeurs statoriques.

Avec l'hypothèse du flux statorique constant, on obtient:

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

A l'aide de l'équation 3.10, on peut établir le lien entre les courants statoriques et rotoriques:

$$\begin{cases} I_{ds} = -\frac{M}{L_s} I_{dr} + \frac{\varphi_s}{L_s} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

Les puissances actives et réactives statoriques s'écrivent:

$$\begin{cases} P = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Ou bien encore, d'après l'équation 3.12 par:

$$\begin{cases} P = V_s I_{qs} \\ Q = V_s I_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

Pour obtenir l'expression des puissances en fonction des courants rotoriques, on remplace dans l'équation précédente les courants par l'équation 3.13 :

$$\begin{cases} P = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q = -V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} + V_s \frac{\varphi_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

A partir des équations 3.11 et 3.12 nous obtenons, pour le flux statorique, l'expression suivante:

$$\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (\text{III.17})$$

L'expression des puissances 3.18 peut donc se simplifier de la manière suivante:

$$\begin{cases} P = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q = -V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

Si l'on considère l'inductance magnétisante M constante, on remarque que l'équation 3.18 fait apparaître que la puissance active P statorique est directement proportionnelle au courant rotorique en quadrature I_{qr} .

De plus, la puissance réactive Q est proportionnelle au courant rotorique.

Directe I_{dr} à un constant pré.

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il nous faut alors établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliqués à la machine.

En remplaçant dans l'équation des flux 3.5 les courants statoriques par l'expression 3.13 on obtient:

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \left(Lr - \frac{M^2}{Ls}\right) I_{dr} + \frac{MV_s}{LsW_s} \\ \varphi_{qr} = \left(Lr - \frac{M^2}{Ls}\right) I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

En remplaçant l'expression des flux rotoriques de l'équation précédente 3.19 par leurs expressions dans l'équation 3.3 on obtient:

$$\begin{cases} V_{dr} = RrI_{dr} + \left(Lr - \frac{M^2}{Ls}\right) \frac{dI_{dr}}{dt} - gW_s \left(Lr - \frac{M^2}{Ls}\right) I_{qr} \\ V_{qr} = RrI_{qr} + \left(Lr - \frac{M^2}{Ls}\right) \frac{dI_{qr}}{dt} - gW_s \left(Lr - \frac{M^2}{Ls}\right) I_{qr} + g \frac{MV_s}{Ls} \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

Où g correspond au glissement de la machine asynchrone.

A partir des équations que nous venons de mettre en place, nous pouvons établir les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques que cela engendre. Il est donc possible maintenant de décrire le schéma bloc de la machine asynchrone à double alimentation qui sera le bloc à réguler par la suite.

En examinant les équations 3.18 et 3.20, on peut établir le schéma bloc de la Figure III-3 qui comporte en entrées les tensions rotoriques et en sorties les puissances *actives et réactives statoriques*.

On remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement g , il sera possible d'établir sans difficulté une commande vectorielle car les influences des couplages resteront faibles et les axes cl et q pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs.

Ainsi, il apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine¹⁰⁸ : La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode sera appelée *méthode directe* car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.

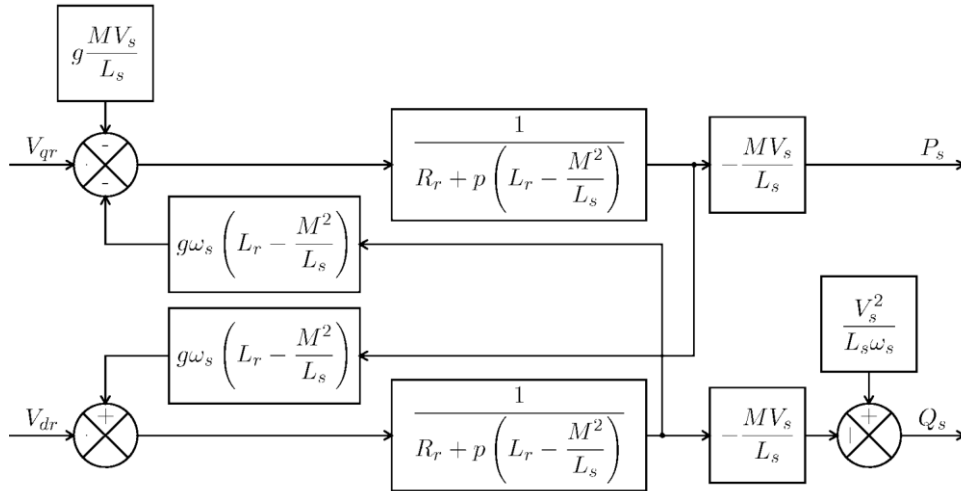


Figure III-3: Schéma bloc de la MADA.

La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode appelée *méthode indirecte* découle directement des équations 3.18 et 3.20.

Ces deux méthodes vont être étudiées et simulées dans la suite de ce chapitre. L'intérêt que présente la méthode directe est que sa mise en œuvre est simple, par contre la méthode indirecte a l'avantage de contrôler les courants rotoriques ce qui permettra de faire une protection de la machine en limitant ces courants ou de rajouter une référence de courant harmonique pour faire fonctionner la MADA en filtre actif qui sera traité au chapitre 5, mais elle est plus complexe à mettre en œuvre.

III.5 Commande directe

Dans cette section, nous présentons la régulation indépendante des puissances actives et réactives de la machine en utilisant les remarques faites au paragraphe précédent. Il a été mis en évidence le lien entre, d'une part la puissance active et la tension V_{qr} et d'autre part la puissance réactive et la tension V_{dr} .

III.5.1 Mise en place de la régulation

Considérons le schéma bloc du système à réguler de la Figure III-3 afin de déterminer les éléments à mettre en place dans la boucle de régulation. Si l'on regarde la relation qui lie les courants rotoriques aux puissances statoriques, on voit apparaître le terme $M V_s / L_s$

Dans notre étude, nous avons considéré que l'éolienne était raccordée à un réseau de forte puissance et stable, donc ce terme est constant. Nous ne placerons donc pas de régulateur entre les courants rotoriques et les puissances.

Pour réguler la machine, nous allons mettre en place une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant tout en compensant les termes de perturbation qui sont présents dans le schéma bloc de la Figure III-3.

Nous négligerons les termes de couplage entre les deux axes de contrôle du fait de la faible valeur du glissement. Nous obtenons alors une commande vectorielle avec un seul régulateur par axe, présentée sur la Figure III-4.

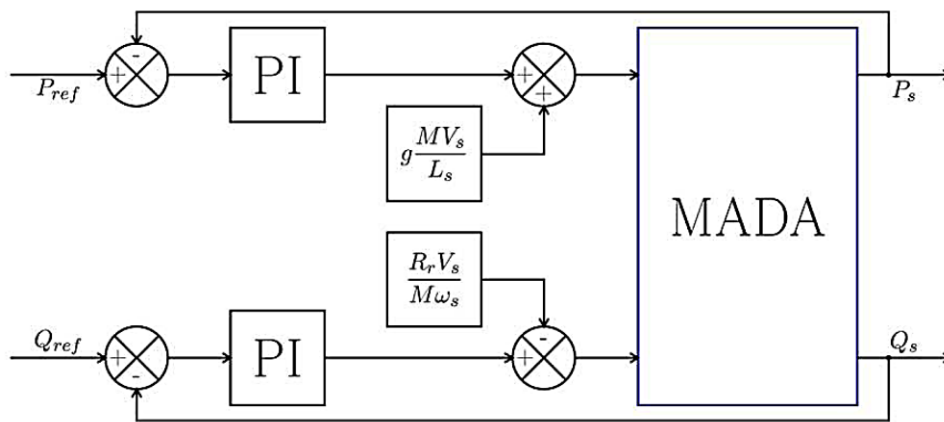


Figure III-4: Schéma bloc de la commande directe.

III.5.2 Synthèse du régulateur PI

Le régulateur Proportionnel Intégral (PI), utilisé pour commander la MADA en génératrice, est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables. C'est pour cela qu'il a retenu notre attention pour une étude globale du système de génération éolien.

La figure 3.9 montre une partie de notre système bouclé et corrigé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme $K_p + K_i/p$ correspondant aux deux régulateurs utilisés dans la Figure III-5.

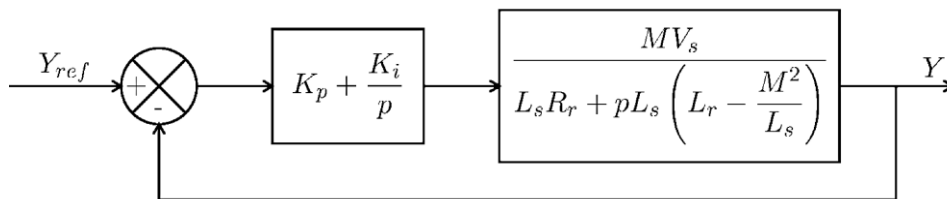


Figure III-5: Système régulé par un PI.

La Fonction de Transfert en Boucle Ouverte (FTBO) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante:

$$FTBO = \frac{P + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{P}{K_p}} \cdot \frac{\frac{M V_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{P + \frac{L_s R_r}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}} \quad (III.21)$$

Nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert. Ceci nous conduit à l'égalité suivante:

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s R_r}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})} \quad (III.22)$$

Notons toutefois ici que la compensation des pôles n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs dépendent directement de ces paramètres. Si tel n'est pas le cas, la compensation est moins performante. Si l'on effectue la compensation, on obtient la FTBO suivante:

$$FTBO = \frac{K_p \frac{M V_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{P} \quad (III.23)$$

Ce qui nous donne en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r p} \quad \text{avec } \tau_r = \frac{1}{K_p} \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{M V_s} \quad (III.24)$$

avec τ_r le temps de réponse du système que l'on se fixe de l'ordre de 10 ms, correspondant à une valeur suffisamment rapide pour l'utilisation faite sur l'éolienne où les variations de vent sont peu rapides et les constantes de temps mécanique sont importantes. S'imposer une valeur plus faible n'améliorerait probablement pas les performances de l'ensemble, mais risquerait d'engendrer des perturbations lors des régimes transitoires en provoquant des dépassements et des instabilités indésirables.

On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse:

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{M V_s} \quad K_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{R_r L_s}{M V_s} \quad (III.25)$$

Nous avons utilisé ici la méthode de compensation des pôles pour sa rapidité ; il est évident qu'elle n'est pas la seule méthode valable pour la synthèse du régulateur PI.

Cette même méthode de synthèse de correcteurs sera appliquée pour déterminer les gains des correcteurs des autres types de commandes étudiées à la section Figure III-5.

III.5.3 Présentation de simulations

La modélisation de la machine, de la partie mécanique et de la commande directe a été implantée dans l'environnement MATLAB Sim Power System afin d'effectuer des tests de la régulation. Nous avons donc soumis ce système à des échelons de puissance active et réactive afin d'observer le comportement de sa régulation.

La Figure III-6 présente les résultats de simulation avec les paramètres suivants pour la génératrice :

$$- V_{seff} = 230 \text{ v}$$

2 paires de pôles

$$R_s = 0,455 \Omega$$

$$- R_r = 0,19 \Omega$$

$$- L_s = 0,07H$$

$$L_r = 0,0213H$$

$$- M_{sr} = 0,034H$$

$$- K_p = 0,05(v.s)^{-1}$$

$$K_i = 0,2(A.S)^{-1}$$

Les gains des correcteurs sont calculés à partir des équations de la section 3.4.2 et ont été affinés après simulation. Ils sont identiques pour l'axe d et l'axe q .

On peut remarquer que les échelons de puissance sont bien suivis par la génératrice aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive. Cependant on observe l'effet du couplage entre les deux axes de commande (d et q) car un échelon imposé à l'une des deux puissances (active ou réactive) induit de faibles oscillations sur la seconde.

Enfin, le fonctionnement du contrôle de puissance réactive nous permet d'avoir une puissance réactive négative (comportement capacitif) ou positive (comportement inductif).

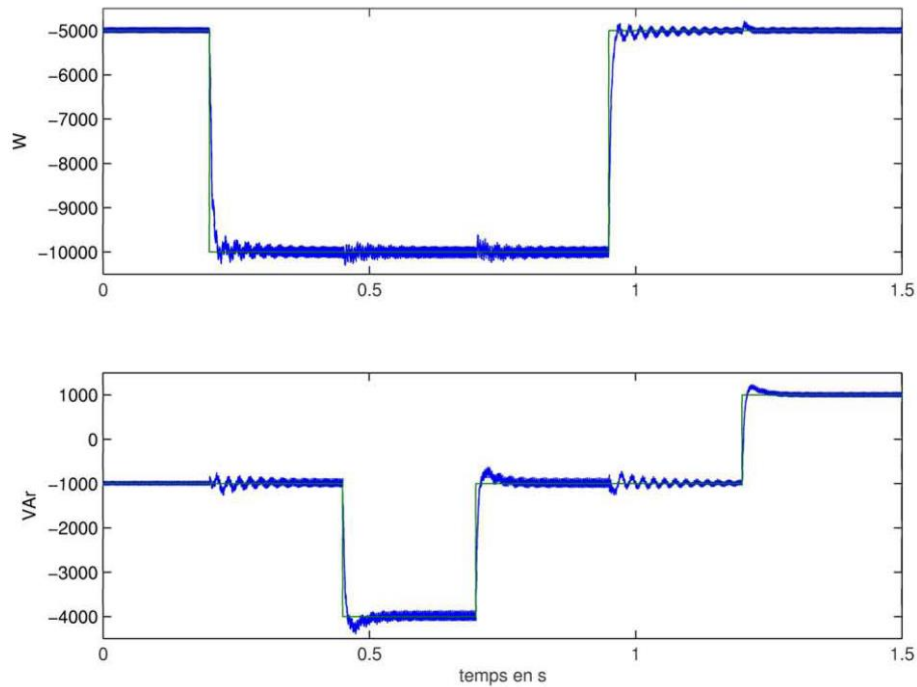


Figure III-6: Résultats de simulations pour la commande directe (P_s en haut, Q_s en bas).

III.6 Commande indirecte

La méthode indirecte consiste à reproduire, en sens inverse, le schéma bloc du système à réguler. On construit ainsi un schéma bloc permettant d'exprimer les tensions en fonction des puissances. On aboutit alors à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens. La commande indirecte va donc contenir tous l'élément présent dans le schéma bloc que la MADA. On part donc de la puissance statorique en fonction des courants rotoriques et des expressions des tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques.

III.6.1 Commande sans boucle de puissance

En gardant les mêmes hypothèses sur la stabilité du réseau, on établit le système de régulation de la Figure III-7 où l'on trouve désormais une boucle de régulation des courants rotoriques dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine.

La simulation est faite avec les paramètres suivants, les mêmes que pour la commande directe à l'exception des correcteurs:

- $V_{seff} = 230V$

- 2 paires de pôles
- $R_s = 0,455D$
- $R_r = 0,19D$
- $L_s = 0,07H$
- $L_r = 0,0213H$
- $M_{sr} = 0,034H$
- $K_p = 7,32(V.s)-1$
- $K_i = 10(A.s)-1$

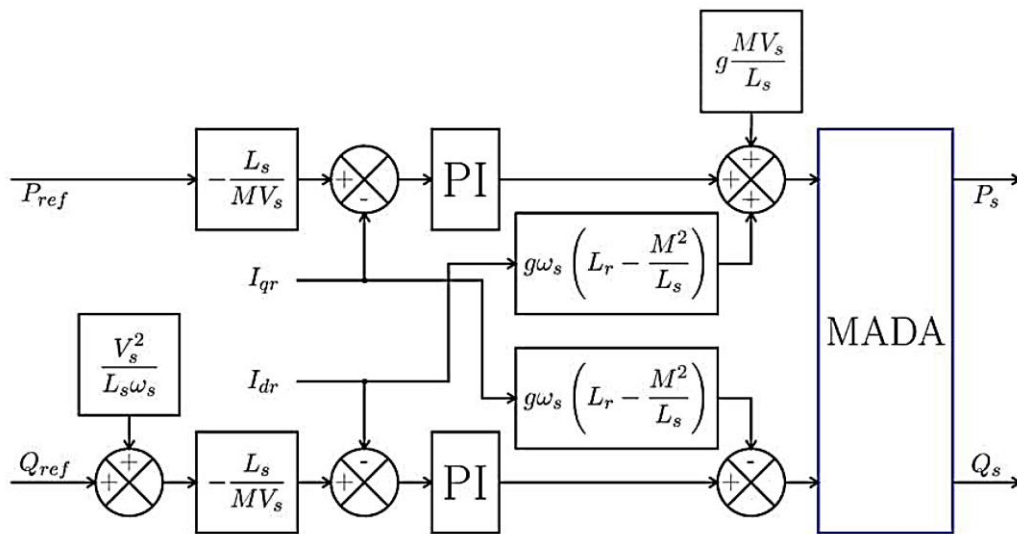


Figure III-7: Schéma bloc de la commande indirecte (P_s en haut, Q_s en bas).

Les gains des correcteurs sont calculés de la même manière qu'à la section 3.4.2 et ont été affinés après simulation. Ils sont identiques pour l'axe d et l'axe q .

La simulation de cette régulation sur MATLAB a donné de bons résultats en termes de dynamique et de réponse aux échelons pour la puissance réactive, comme on peut le voir sur la Figure III-8. On peut cependant observer une erreur de la puissance réactive lorsque la puissance active est faible.

Par contre, elle fait apparaître une erreur statique au niveau de la puissance active et réactive qui est due au fait que dans cette régulation on ne trouve qu'une seule boucle sur les courants et que les puissances sont donc restées en boucle ouverte.

Une des hypothèses de notre modèle était que la tension V_s soit constante, mais lorsque la puissance active produite varie, cela entraîne nécessairement une légère variation de tension.

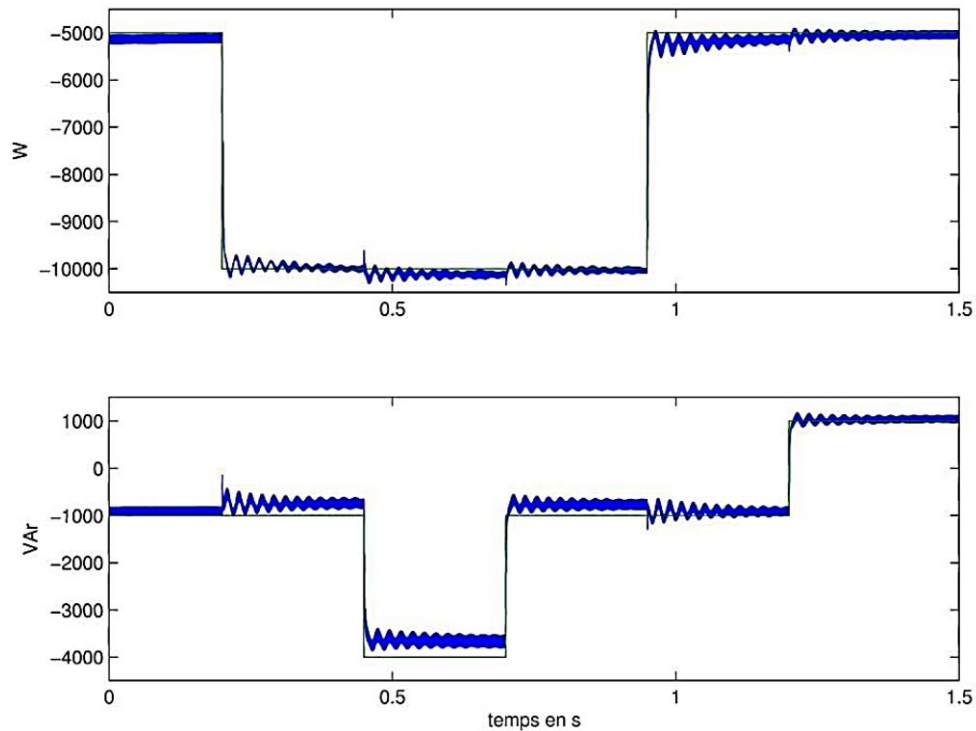


Figure III-8: Résultats de simulation pour la commande indirecte (P_s en haut, Q_s en bas).

" V_s du fait des impédances de liaison entre le réseau et l'éolienne. Cette petite variation est aussi à l'origine de l'écart des puissances. De plus, la résistance statorique, qui a été négligée dans notre modélisation, a une influence sur les puissances.

. L'erreur est nettement plus importante sur la puissance réactive que sur la puissance active car sur la puissance réactive le terme de correction $V_s/L_s.W_s$, de la Figure III-11, vient s'ajouter avant le régulateur de courant.

On voit aussi l'effet du couplage entre les axes qui est tout de même moins perceptible que pour la commande directe.

III.6.2 Commande avec boucles de puissance

Afin d'améliorer la commande précédente, nous allons incorporer une boucle de régulation supplémentaire au niveau des puissances afin d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système.

Nous aboutissons au schéma bloc présenté en Figure III-9 sur lequel on distingue bien les deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance. La simulation est faite avec les paramètres suivants, les mêmes que pour la commande directe à l'exception des correcteurs:

- $V_{seff} = 230V$
- 2 paires de pôles
- $R_s = 0,455D$

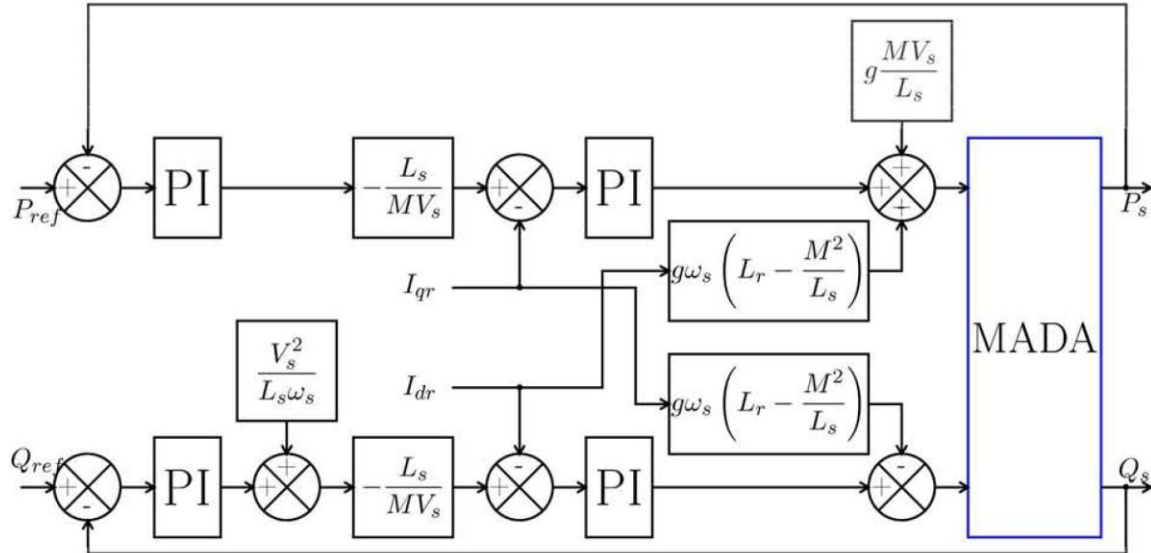


Figure III-9: Schéma bloc de la commande indirecte avec boucles de puissance.

- $R_r = 0,19D$
- $L_s = 0,07H$
- $L_r = 0,0213H$
- $M_{sr} = 0,034H$
- $K_p = 7,32(V.s)-1$ boucle de courant
- $K_i = 10(A.s)-1$ boucle de courant
- $K_p = 1$ boucle de puissance
- $K_i = 125$ boucle de puissance

Les gains des correcteurs sont calculés de la même manière qu'à la section 3.4.2 et ont été affinés après simulation. Ils sont identiques pour l'axe d et l'axe q .

La Figure III-10 démontre que notre système présente une dynamique satisfaisante et une erreur statique nulle.

Que ce soit pour la puissance active ou réactive, on observe une dynamique qui réagit rapidement et sans dépassement. Les échelons sont correctement suivis et il n'y a plus d'erreur sur les puissances.

Le couplage entre les deux puissances est très faible et peu perceptible. Il ne devrait pas poser de problème pour la suite de l'exploitation du modèle machine.

Cette commande est donc plus performante que la commande directe qui présentait plus de perturbations entre les deux puissances. Nous allons donc retenir la commande indirecte avec boucles de puissances pour le reste de notre étude. De plus, elle permet de pouvoir limiter simplement les courants rotoriques de la machine en fixant une limite dans la boucle de courant. La commande indirecte avec bouclage des puissances nécessite six capteurs de courant, trois

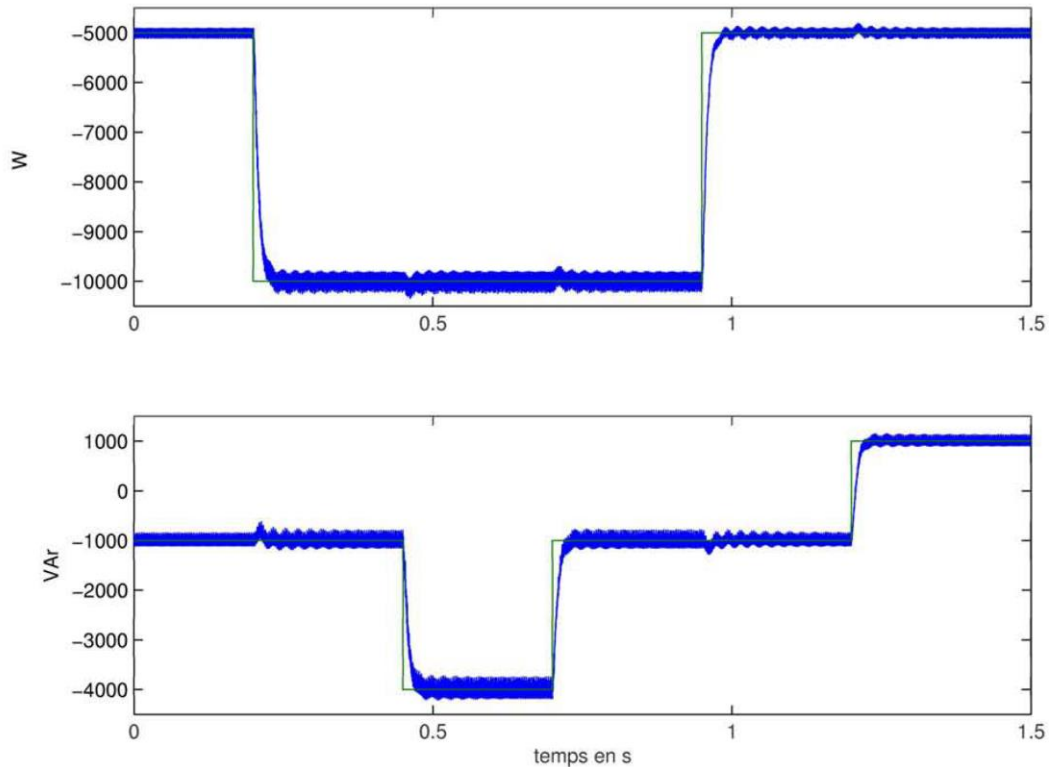


Figure III-10: Résultats pour la simulation avec la commande indirecte avec bouclage des puissances (P_s en haut, Q_s en bas).

Pour contrôler les courants rotoriques et trois associés à trois capteurs de tension pour mesurer les puissances statorique. Ces puissances seront aussi utilisées pour le contrôle général de l'éolienne afin de déterminer les références de puissance pour l'unité de stockage. Quant aux capteurs de courant rotoriques ils permettront de protéger la MADA des sur intensité.

III.6.3 Robustesse de la régulation

La robustesse des commandes est un point important, surtout pour les systèmes comportant plusieurs entités en interaction ou les systèmes à fortes variations de

paramètres. Il en est de même si la mesure des paramètres ne peut s'effectuer avec précision.

Le fait d'avoir une commande indirecte avec deux boucles imbriquées permet justement d'accroître la robustesse du système. Effectivement, on a vu que pour la commande indirecte sans bouclage des puissances, on obtenait une erreur statique sur les puissances. Si l'on avait changé un paramètre de la machine ou du réseau comme L_s , M ou V_s , cette erreur aurait été encore plus grande, alors que pour le système bouclé ces perturbations sont automatiquement corrigées par le régulateur supplémentaire.

La Figure III-11 présente l'évolution des puissances lors d'une variation de 50% de la valeur de la résistance statorique R_s . On remarque que cette variation affecte peu le système qui parvient tout de même à garantir le contrôle des puissances.

Cette variation de la résistance statorique n'a quasiment aucune influence sur le fonctionnement de la génératrice car les deux boucles nous permettent de rattraper les erreurs dues aux termes de compensation qui ne sont plus en rapport avec la bonne valeur de la résistance.

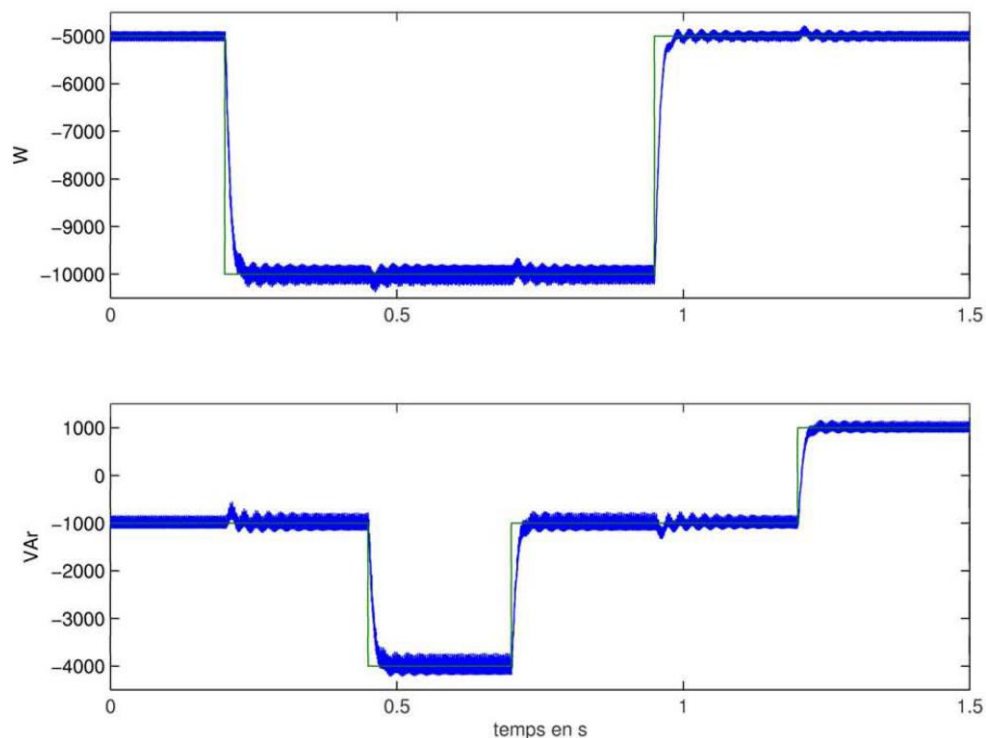


Figure III-11: *Commande indirecte avec bouclage des puissances et variation de R_s de 50% (P_s en haut, Q_s en bas).*

La Figure III-12 trace l'évolution des puissances lors d'une variation de 50% de la valeur de l'inductance statorique L_s . On remarque que cette variation affecte peu le système et le contrôle des puissances reste efficace.

L'augmentation de la valeur de l'inductance est aussi peu perceptible mais l'on remarque néanmoins que les temps de réponse sont très légèrement augmentés

Le suivi des puissances est toujours assuré et la stabilité n'est pas affectée par ces variations de paramètres.

La commande indirecte avec bouclages des puissances nous permet d'avoir un système avec une robustesse suffisante. Nous fonctionnons avec des régulateurs PI qui ne sont pas des garants d'une grande robustesse. Cependant, le bouclage des puissances nous garantit un niveau de robustesse acceptable.

Si trop de paramètres varient en même temps dans de grandes proportions, il est sûr que les régulateurs n'arriveront plus à faire fonctionner le système convenablement et il faudrait alors faire appel à d'autres types de régulateurs plus robustes (RST par exemple).

On peut maintenant envisager le fonctionnement de la génératrice et de sa commande avec tous les autres éléments du système éolien de production électrique.

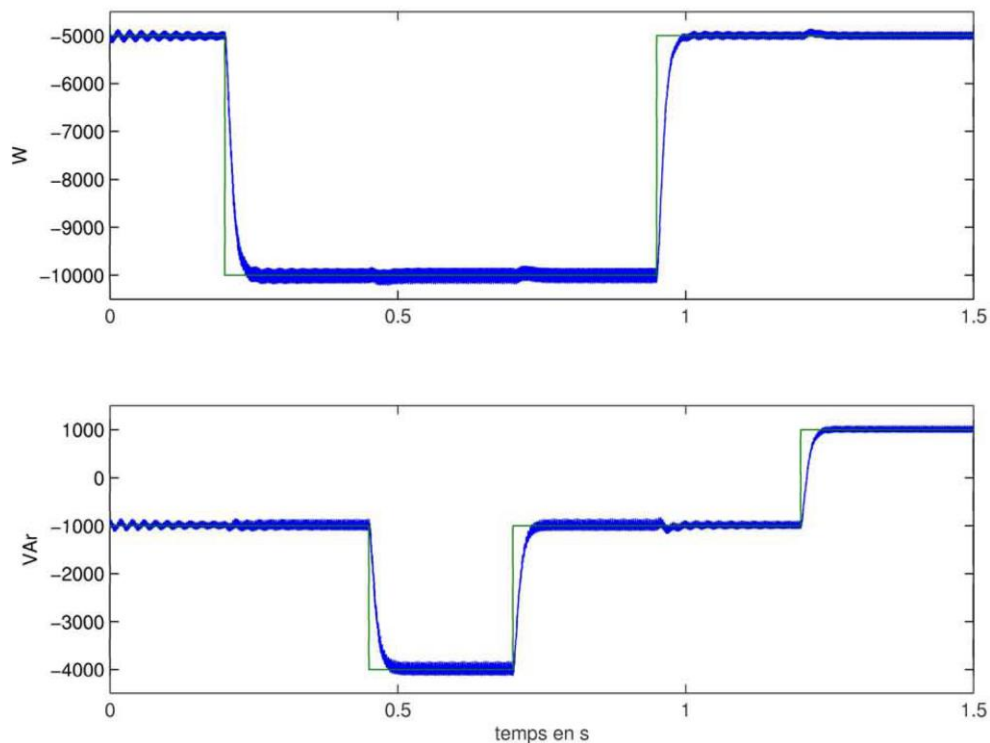


Figure III-12: Commande indirecte avec bouclages des puissances et variation de L_s de 50% (P_s en haut, Q_s en bas).

CHAPITRE IV :

Stockage de l'énergie

IV.1 Introduction

Les systèmes de stockage d'électricité peuvent se décomposer en deux grandes familles, les systèmes de stockage à long terme et les systèmes de stockage à court terme. L'électricité ne se stocke pas directement, mais elle peut se convertir en d'autres formes elle-même stockables (potentielle, cinétique, chimique, magnétique...).

Le stockage de l'énergie dans le cadre de l'utilisation de l'énergie électrique prend un relief particulier avec le développement des Energies Renouvelable (ENR).

Les moyens de stockage sont nombreux, mais leurs efficacités et leurs importances économiques dépendent étroitement des conditions d'exploitations et de leur facilité de mise en œuvre. Les progrès en électronique de puissance ont contribué à l'essor des systèmes de stockage. Dans ce chapitre, une première partie sera consacrée au stockage à long terme, une deuxième partie au stockage à court terme, l'utilisation du stockage dans le système électrique sera ensuite évoquée en se focalisant sur son utilisation dans les réseaux et dans les systèmes de production à Energie Renouvelable.

IV.2 Techniques de stockage à long terme

Pour ce qui est de système de stockage à long terme, on connaît Olen les batteries et l'on voit se développer des systèmes complexes tels que les systèmes à air comprimé ou encore l'électrolyse associée à une pile à combustible.

Les batteries ont évolué durant cette dernière décennie et offrent désormais des capacités volumiques et massiques très importantes notamment avec les dernières générations du type lithium polymère. Elles permettent aussi des fonctionnements en cyclage sans grande contrainte avec des chargeurs optimisant leur durée de vie.

Les systèmes à air comprimé utilisent différents procédés afin de stocker et restituer l'énergie en utilisant ou non l'énergie d'échauffement que la compression procure de plus, un compresseur est utilisé pour le stockage et une turbine associé à une génératrice pour le déstockage.

Les systèmes utilisant un électrolyseur pour le stockage d'énergie sous forme d'hydrogène et la restitution d'énergie à raide d'une pile à combustible sont aussi à l'étude. Pour ce qui est des systèmes à air comprimé ou électrolyse, ils sont encore en développement et le rendement global pour la restitution est relativement faible. Par contre, ils permettent d'obtenir des capacités importantes à moindre frais car le stockage

se fait dans des réservoirs qui peuvent être dimensionnés en fonction de l'énergie que l'on veut stocker.

Il existe donc plusieurs solutions pour le stockage. Elles peuvent être associées afin d'obtenir une unité permettant simultanément de lisser les fluctuations de puissance (court terme) et d'atténuer les effets des périodes de faible ou forte production (long terme). En tous cas, il ne faut pas écarter un système de stockage associé à l'éolien à cause de son faible rendement global car les pertes dans les systèmes de conversion peuvent globalement ne pas être si pénalisantes si cela nous permet de maintenir constante la production en permanence.

IV.3 Techniques de stockage à court terme

Les systèmes de stockage à court terme permettent de transférer rapidement des puissances élevées sur des durées pouvant aller de la seconde à la dizaine de minutes. On trouve principalement des systèmes à stockage inertiel mais le développement récent de nouveau composant tel que les super-capacités permet d'envisager des solutions de stockages électrochimiques.

Les systèmes inertiels sont eux aussi en grande évolution avec l'utilisation de machines rapides. Effectivement, le stockage qui s'effectuait classiquement dans de très lourds volants d'inertie tournant à 3000tr/min accouplés à des machines classiques, s'effectue désormais à très grande vitesse avec des machines complexes comportant plusieurs rotors concentriques à des vitesses différentes.

L'alimentation se fait par de l'électronique de puissance permettant d'obtenir de plus grandes puissances et de stocker encore plus d'énergie.

Il est désormais possible de stocker et restituer une puissance de plusieurs dizaines de KW pendant plus de dix minutes. Ces systèmes permettent donc de lisser la puissance fluctuante du vent.

Les super capacités ont elles aussi un grand intérêt pour le lissage des fluctuations de puissance de par leur dynamique plus rapide que celle des batteries. Leurs capacité augmente et l'on trouve désormais des super capacités de 1800F, utilisées en association avec un convertisseur alternatif/continu permettant l'échange avec le réseau.

IV.4 Modélisation de l'unité de stockage

Il est donc possible, au vu de ces remarques, de considérer les dispositifs de stockage comme des sources de tension continue avec des capacités, des puissances et des temps de réponses différents en fonction de leurs principes de fonctionnement. Ces sources possèdent trois paramètres importants pour leur exploitation qui sont la valeur de l'énergie et de la puissance qu'elles sont capables de fournir ou emmagasiner ainsi que leurs temps de réponse.

On peut donc en faire une modélisation précise en considérant ces dispositifs de stockage comme des sources continues contrôles en puissance avec une mesure de puissance et d'énergie ainsi que des limites sur l'énergie stockée.

Le niveau d'énergie disponible dans cette unité de stockage sera contrôlé en temps réel. Il faudra aussi se fixer des limites et prévoir les conditions de fonctionnement lorsque ces limites seront atteintes.

Nous allons modéliser un système de stockage hybride alliant une unité à court terme ayant un temps de réponse court et une unité à long terme ayant un temps de réponse plus long. Nous présentons la modélisation de cet ensemble par une seule source de tension.

Cette unique source de tension sera contrôlée en tension afin de pouvoir commander la puissance de charge et de décharge en fonction de la consigne qui sera générée par le système de contrôle global de l'éolienne. L'ensemble ainsi créé permet d'allier les avantages des deux solutions: temps de réponse court et capacité importante du stockage. Pour que le fonctionnement soit réaliste, il faut bien sûr choisir la capacité maximale d'énergie et la puissance en rapport avec les conditions de vent du site sur lequel on veut installer l'éolienne.

IV.5 Contrôle de l'unité de stockage

La modélisation utilisée est présentée sur la Figure IV.1. On y distingue la source de tension contrôlée par le régulateur de puissance, la mesure de puissance et le calcul d'énergie.

Pour la gestion de l'énergie, on se fixe un seuil maximal qui correspond à la taille de l'unité de stockage et un seuil minimal à ne pas dépasser pour ne pas endommager les éléments de l'unité. En effet, si l'on utilise des batteries par exemple il ne faut pas faire des décharges profondes car elles entraînent des dégradations des plaques internes des

éléments ; par contre, dans le cas d'un stockage à air comprimé, on peut vider complètement le réservoir sans contrainte.

La stratégie de puissance va donc dépendre du niveau d'énergie dans l'unité:

Si l'énergie est entre les deux seuils, c'est le fonctionnement normal et l'unité peut être chargée ou déchargée à volonté. La puissance de l'unité de stockage peut être positive, nulle ou négative.

Si la limite maximale est atteinte, l'unité de stockage est chargée complètement et l'on autorise seulement la décharge de l'unité. La puissance de l'unité de stockage peut être nulle ou négative.

Si la limite minimale est atteinte, l'unité de stockage est déchargée et l'on autorise seulement la charge de l'unité. La puissance de l'unit de stockage peut être positive ou nulle.

L'information de seuil maximum d'énergie de l'unité de stockage sera aussi utilisée pour l'établissement de la puissance de référence de la génératrice lors du contrôle global de l'ensemble du générateur éolien détaillé dans les sections suivantes.

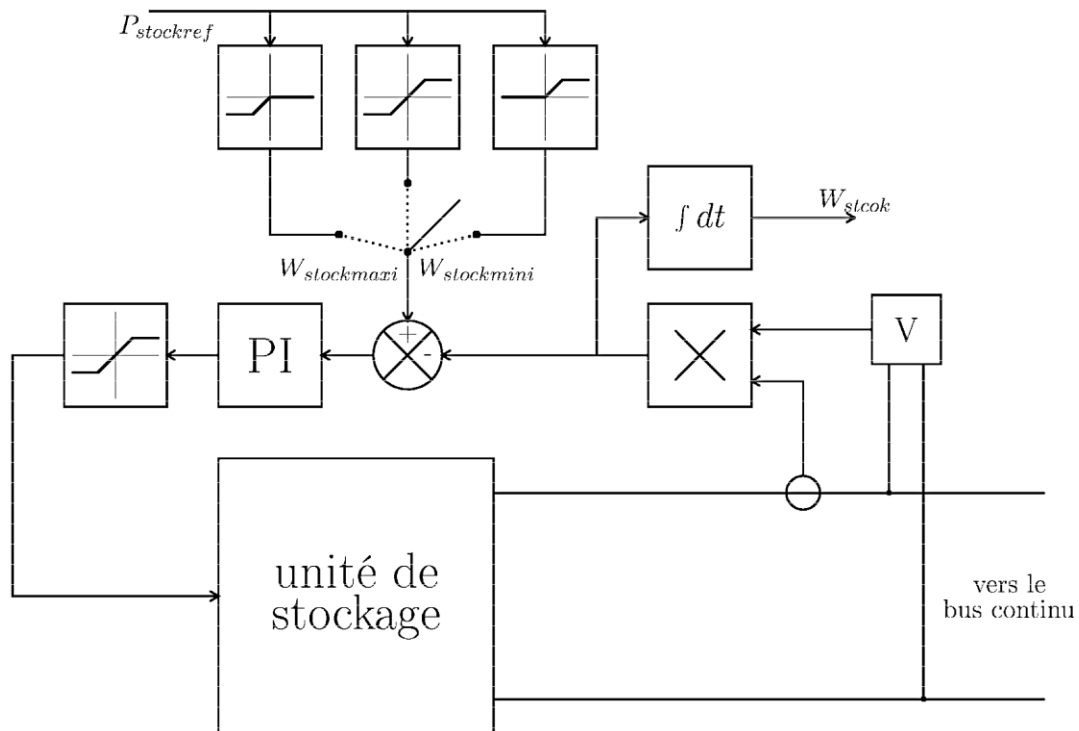


Figure IV.1 : Schéma bloc de l'unité de stockage.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Notre étude nous a permis de présenter une modélisation complète et globale d'un système de génération d'électricité à partir de l'énergie éolienne. Cette modélisation se démarque principalement par l'approche différente qui a été faite de la partie mécanique qui fait appel aux calculs d'aérodynamique pour déterminer les relations liant la vitesse du vent, le couple et la vitesse de l'hélice, mais aussi de l'étude de l'ensemble avec l'association de l'unité de stockage permettant la fourniture d'une puissance constante au réseau et des services système tels que la puissance réactive ou l'option de filtrage actif des harmoniques avec la MADA.

Tout ceci a été conçu autour d'une MADA et un contrôle MPPT de l'éolienne permettant de maximiser la puissance produite à chaque instant. Le contrôle indépendant des puissances actives et réactives a été étudié et deux commandes, directe et indirecte, ont été exposées, la commande indirecte ayant été retenue pour son contrôle des courants rotoriques et sa bonne robustesse due aux deux boucles de régulation en courant et en puissance. De plus, la commande indirecte permet d'ajouter simplement la commande de filtrage actif par simple addition des courants de référence, ce qui n'était pas possible sur la commande directe. L'objectif est de pouvoir faciliter l'insertion des éoliennes dans les réseaux électriques afin d'augmenter la part de la production d'énergie renouvelable dans le réseau électrique futur.

La mise en place de l'unité de stockage et sa simulation nous a présenté qu'il était judicieux d'utiliser cette solution afin d'obtenir un système de production plus pratique pour le gestionnaire de réseau ; Il peut désormais compter sur une puissance constante comme l'a montré la simulation sur une longue durée. La MADA produit, grâce à la commande MPPT, le maximum de la puissance qui est disponible dans le vent et l'unité de stockage gère sa puissance et son énergie pour maintenir constante la puissance fournie au réseau en se déchargeant et se rechargeant aux grés du vent.

Pour ce qui est du filtrage des harmoniques de courant, avec la machine asynchrone à double alimentation fonctionnant à la fois en génératrice de puissance électrique à 50 Hz et en filtre actif, nous avons démontré sa capacité à agir comme un filtre actif parallèle avec de très bons résultats. La mise en place de cette commande supplémentaire pour

corriger les harmoniques de courant a été possible car Ton disposait, sur la commande de la MADA, de régulation des courants rotoriques grâce à la commande indirecte.

Références bibliographiques

- [1] A. Attar, "Les énergies renouvelables" ancien PDG de Sonatrach et ancien Ministre des Ressources en Eau
- [2] A. BOYETTE, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne," Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, 2006.
- [3] B. Robyns, P. Bastard, "Production décentralisée d'électricité : contexte et enjeux techniques", La revue 3EI n°39, Décembre 2004.
- [4] Bernard Multon, Gael Robin, Marie Ruellan, Hamid Ben Ahmed, « 3ème situation énergétique mondiale à l'aube du millénaire. Perspectives offertes par les ressources renouvelables », revue3Ei No36 mars 2004, pp. 1-14.
- [5] E. Hau, "Wind-turbines, fundamentals, technologies, application, economics, " Editions Springer, 2000.
- [6] E. O. USABIAGA, "Modélisation, Conception et Commande d'une Machine Asynchrone sans Balais Doublement Alimentée pour la Génération à Vitesse Variable," INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, 2009.
- [7] Frédéric Poitiers, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne", école polytechnique de l'université de Nantes, 2003.
- [8] Frédéric Poitiers. "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne". école polytechnique de l'université de Nantes, 2003.
- [9] H. Ben Ahmed, « Généralités sur l'énergie éolienne et convertisseurs associés et convertisseurs associés », séminaire électrotechnique de l'académie de Rennes, 9 mars 2004.
- [10] J.F. Walker, N. Jenkins, "Wind energy technology", John Wiley & Sons, Inc.,
- [11] JP. Caron, TP. Hautier, "Modelisation et commande de la machine asynchrone", Ed Techniq, 1995.
- [12] Luc Moreau, "MODELISATION, CONCEPTION ET COMMANDE DE GENERATRICES A RELUCTANCE VARIABLE BASSE VITESSE". IREENA - Institut de Recherché en Electro-nique et Electrotechnique de Nantes Atlantique.
- [13] M. Olivier and M. Jérôme, "Etude bibliographique : éoliennes, effet Magnus et production électrique," Ecole des Mines de Douai, 2007.

Références bibliographiques

- [14] MENY IVAN, "Modélisation et réalisation d'une chaîne de conversion éolienne petite puissance", Laboratoire d'électrotechniques de Montpellier (LEM).
- [15] Mohamed Choukri BENHABIB, "Contribution à l'étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles à structure tension : Modélisation, simulation et validation expérimentale de la commande", thèse France 2004.
- [16] O. De Vries, "On the theory of the horizontal axis wind turbine", *Ann. Rev. Fluid. Mech.* 1983, 15, pp. 77-96.
- [17] R. Michaux, P. Letellier, « Les machines discoïdes à champs axial dans les systèmes de production électrique », revue de l'électricité et de l'électronique, N° 3, mars 1997, pp. 37-42.
- [18] R. Radia, "Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne," Mémoire de Magistère, Université de Constantine, 2009.
- [19] Recherche ECRIN entreprise, " L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables", rapport de synthèse, mai 2002.
- [20] S El Aimani, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL).
- [21] S. Winjnbergen, "Wind Force 12. A blueprint to achieve 12% of the world's electricity from wind power by 2020", Global Wind Energy Council (GWEC) report, Jun. 2005
- [22] T. Grignoux, R. Gibert, P. Neau, C. Buthion, « Eoliennes en milieu urbain -État de l'art », janvier 2006, pp. 1-129.
- [23] Tomas Petro. "modeling of wind turbines for power svsteinstudies", thèse Suede 2003.

Résumé

Cette mémoire présente de l'étude, la modélisation et la simulation d'un système de conversion d'énergie éolienne, permettant de fournir au réseau une puissance constante, basé sur une unité de stockage d'énergie et une machine asynchrone à double alimentation (MADA). Cette éolienne à axe horizontale fournie au réseau une puissance active constante quelles que soient les conditions de vent. L'association de batterie ou autre système de stockage sur le bus continu permet de stocker temporairement de l'énergie. La modélisation de la partie mécanique de l'éolienne est particulièrement détaillée, une hélice à angle de calage variable est utilisée pour maximiser la puissance extraite. Ensuite, la modélisation, le contrôle direct et le contrôle indirect de la MADA sont présentés. Un contrôle indépendant des puissances active et réactive est utilisé et le dimensionnement de l'unité de stockage pour cette utilisation est particulièrement détaillé. La commande de l'ensemble avec la recherche du point de fonctionnement à puissance maximale (MPPT) est expliquée. La présentation des résultats de simulations montrent l'étude pour deux profils de vent longue durée. Ce système de conversion éolien permet d'offrir des services systèmes comme la compensation de facteur de puissance ou la minimisation de courants harmoniques présents sur le réseau.

Mots clés : éolienne, machine asynchrone, double alimentation, MADA, stockage d'énergie.

ملخص

تتناول هذه المذكرة عرض لدراسة ونمذجة ومحاكاة نظام تحويل طاقة الرياح لتوفير الطاقة المستمرة إلى الشبكة ، استنادا إلى وحدة لتخزين الطاقة وآلة غير متزامن ثنائي تغذية. زودت هذه التوربينات الريحية الأفقية المحور إلى شبكة الطاقة النشطة المستمر مهما كانت ظروف الرياح. الطاقة النمذجة جزء الرياح الميكانيكية هي مفصلة بشكل خاص ، يتم استخدام المروحة متغيرة الزاوية لتحقيق أقصى قدر من الطاقة المستخرجة. و تم عرض النمذجة في حالي التحكم المباشرة و غير المباشرة . يستخدم مراقبة مستقلة من الطاقة النشطة والمتفاعلة وتصميم وحدة تخزين لهذا الاستخدام هو مفصل بشكل خاص. وتم عرض نتائج المحاكاة لاطهار صحة النمذجة المعتمدة لمدة طويلة الأجل لمحاكاة الرياح. هذا النظام يسمح التحويل من نظم طاقة الرياح توفير خدمات مثل معامل القدرة التعويض أو تقليل التيارات التوافقية على الشبكة. وبالتالي ، يتم استخدام آلة غير متزامن ثنائي تغذية ، مع عنصر تحكم إضافية ، للحد من التوافقيات الحالية على الشبكة. هذا النظام يسهل دمج توربينات الرياح في شبكة التوزيع لأن مدير الشبكة يمكن أن يكون لها أنظمة وخدمات الطاقة المستمرة مفيدة.

كلمات مفتاحية: آلة غير متزامن ثنائي التغذية، التوربينات الريحية الافقية المحور، تحكم مباشر وغير مباشر.

