

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DUGENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes
DeMASTER ACADEMIQUE

Domaine : **Sciences et Technologies** Filière : **Génie Electrique**

Spécialité : Réseaux électrique

Présenter par

-BOUDISSA MALIKA

-BOUDJEMIL HOURIA

Thème

**Commande d'une éolienne à base d'une
Machine synchrone à aimants permanents
(MSAP)**

Mémoire soutenu publiquement le 25/09/2017 devant le jury composé de :

MR : C. BIROUCHE
MACAP- U.M.M.T.O –President

MLLE : N. KESSILI
MACB -U.M.M.T.O –Encadreur

MM : H. KHEMECHE
ENEL – AZAZGA –CO – Encadreur

MR : M. SI BRAHIM
MCB – U.M.M.T.O – Examineur

MM: S. CHERIF
MACB – U.M.M.T.O -Examineur

Remerciements

Nous remercions Dieu de nous avoir donné la force et le courage pour réaliser ce modeste travail.

*Nous remercions notre promotrice M^{lle} **ķessili nadia** ainsi Mme **ķhimache Hassina** notre Co-promotrice qui nous a bien aidé avec son dévouement, ses conseils et son soutien moral tout le long de l'élaboration de ce travail.*

*Nous adressons nos plus vifs remerciements à Mr **Birouche ch** (M.A.A à L'UMMTO) pour avoir accepté de juger ce travail et de présider le jury.*

Nous adressons nos plus vifs remerciements aux membres du jury,

Enfin, nous remercions nos familles, camarades et amis pour leurs aide, compréhension, encouragement et soutien, qu'ils nous ont apporté durant nos études.

DEDICASES

Je dédie ce travail

A mes très chers parents qui m'ont encouragé pour que je réussisse.

*A Mes frère et mes sœurs et leurs enfants
Mayen ,Léanne, Yani, Léa, Elyna, Ilyasse, Ilyan*

A toute ma famille.

A mes très chers ami(es) : Kamilia, haeyt , Nadia, Samira , Dj, Ma

A mon binôme HOURIA ainsi qu'à sa famille.

Et Plus particulièrement à mon cher ami AI.

Malika...

Je dédie ce travail

A mes chers parents qui m'ont encouragé pour que je réussisse.

*A mes frères et ma chère sœur Karima
et mes adorables fils Amirouche et son papa.*

A ma belle famille

A mon chère binôme Malika et sa famille

A mes chers amis(es).

Houria...

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralité sur l'énergie éolienne	3
I. Introduction.....	3
I.1. Descriptif et qualité de l'énergie éolienne	3
I.1.1. Définition de l'énergie éolienne	3
I.1.2. Architecture d'une éolienne.....	4
I.2. différents types d'éolienne	7
I.2.1. Turbine à axe horizontal	7
I.2.2. Turbine à axe vertical.....	8
I.3. Avantages et inconvénients des énergies éoliennes.....	9
I.3.1. Les avantages	9
I.3.2. Les inconvénients	10
I.4. énergie éolienne en Algérie	10
I.5. Différents systèmes de conversion électromagnétique de l'énergie éolienne ...	12
I.5.1. Machine asynchrone à cage (MAS)	12
I.5.2. Machine synchrone (MS)	13
I.5.3. Machine asynchrone à double alimentation (MADA)	13
I.5.4. Machine asynchrone à aimants permanents (MASP)	14
I.6. La connexion au réseau	17
I.6.1. Le transformateur élévateur de tensions	17
I.6.2. Les batteries de condensateurs	17
Conclusion	17
Chapitre II : Généralité sur l'énergie éolienne	
II.1. Introduction.....	18
II.2. Modélisation de vent	19
II.3. Modélisation de la turbine éolienne	20
II.3.1. Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine	20
II.3.2. modélisation de la turbine à étudier	20

II.3.3. Equation dynamique de l'arbre	21
II.4. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse	23
II.5. Détermination de la vitesse de référence	24
II.6. Synthèse des régulateurs	24
II.6.1. Calcul des paramètres de régulateur de vitesse (PI)	24
II.6.2. Calcul des paramètres de régulateur de vitesse (IP)	25
II.7. Résultats de simulation	26
Conclusion	27

Chapitre III : Modélisation de MSAP	
III.1. Introduction	28
III.2. Présentation de la machine synchrone à aimants permanents	28
III.3. Comparaison entre la machine synchrone classique et la machine synchrone à aimants permanents.....	31
III.4. Types des MSAP à flux radial	31
III.5. Modélisation de la MSAP	33
III.6. Equation de la machine synchrone à aimants permanents	33
III.6.1. Equations électriques.....	33
III.6.2. Equation mécanique de la machine.....	36
III.6.3. Equation de la machine synchrone à aimants permanents dans Park.	36
III.6.4. Expression du couple électromagnétique	39
III.7. Commande vectorielle	39
III.8. Principe et structure de la commande vectorielle de la génératrice.....	40
III.8.1. Décomposition des tensions	40
III.8.2. Boucle de commande	42
III.8.3. Détermination de régulateur de courant	42
III.9. Contrôle de la puissance de la génératrice	43
III.9.5.1 Synthèse des contrôleurs PI du convertisseur de puissance	44
III.10. Résultats de simulation	45
III.10.1. Interprétation des résultats	45
III.11. Commande de la puissance active et réactive.....	46

III.11.1. Résultats de simulation	46
Conclusion	49
Chapitre IV : Modélisation et commande des convertisseurs statiques	
IV.1.Introduction	50
IV.2.La commande de MLI.....	50
IV.3.Modélisation de redresseur MLI	51
IV.4.Modélisation de bus continu	52
IV.5.Modélisation de l'onduleur de l'onduleur.....	53
IV.6.Résultats de simulation	54
Conclusion	56
Conclusion générale	57

La production d'électricité à partir de l'énergie éolienne est l'une des méthodes qui connaît la croissance la plus rapide dans le monde. L'énergie cinétique de l'air en mouvement est transformée en électricité par des éoliennes qui sont installées à des endroits où les conditions météorologiques sont les plus propices. Les éoliennes peuvent être utilisées individuellement, mais elles sont souvent regroupées pour former des parcs éoliens ou des centrales éoliennes. L'électricité produite à partir des parcs éoliens peut servir à répondre à des besoins locaux ou à alimenter un réseau de distribution d'électricité desservant des résidences et des commerces qui sont plus éloignés. L'utilisation de cette forme d'énergie permet de réduire les effets de la production d'électricité sur l'environnement car elle nécessite aucun combustible et ne produit aucun polluant ni gaz à effet de serre.

Différents types de génératrices peuvent être utilisés pour convertir l'énergie mécanique produite par le mouvement de l'arbre éolien en énergie électrique, les génératrices synchrones à aimants permanents, avec différentes structures, ont pris de plus en plus la prédominance sur les autres machines électriques. Ce développement s'explique par la caractéristique d'auto-excitation des aimants permanents qui leur permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, qui les rend intéressantes dans les applications de conversion d'énergie éolienne. Ce type de machine permet d'extraire un maximum d'énergie en réduisant les contraintes mécaniques, cela par élimination du multiplicateur de vitesse, ce qui améliore la fiabilité du système et la réduction des frais d'entretien [14].

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude d'une chaîne complète de conversion d'énergie éolienne basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents, nous nous avons également étudié des stratégies de commande permettant l'optimisation de l'énergie extraite par la turbine ainsi que des contrôleurs permettant de commander la puissance électrique fournie au réseau.

Nous allons commencer par une introduction générale, présentant les intérêts socio-économique et scientifiques, par la suite nous allons entamer ce travail avec un premier chapitre qui traitera des généralités sur l'énergie éolienne, à commencer par les différents types d'éoliennes existantes. Puis nous allons parler de conversion d'énergie éolienne en énergie électrique suivie des lois et contraintes mécaniques associées à la conversion de cette énergie, enchaînées avec le mode et les différents systèmes utilisés pour l'exploitation.

Dans le chapitre deux, nous allons commencer par la modélisation du vent. ce qui nous permettra d'identifier le profil du vent qui sera utilisé dans le reste du travail. Nous allons ensuite modéliser la turbine éolienne sur laquelle se base notre étude. Cette modélisation va permettre de commander la turbine de sorte à ce que le coefficient de puissance soit toujours optimal quelques soient les variations du vent suivi de quelques résultats de simulation. Ce dernier a été mis en œuvre à l'aide du logiciel "MATLAB"

Au chapitre III, nous avons développé un modèle de la machine synchrone à aimants permanents, en présentant le modèle mathématique de la génératrice synchrone à aimants permanents(GSAP), la conversion des équations dans le référentiel de Park afin d'arriver à sa commande vectorielle. Qui sera suivi par la commande vectorielle de la puissance active et réactive de la machine synchrone à aimants permanents qui est entraînée par la turbine éolienne.

Dans le chapitre quatre, nous avons abordé la commande et l'étude des performances du contrôle vectoriel par orientation du flux au niveau de stator de la génératrice synchrone à aimants permanents, associé à des convertisseurs statiques :redresseur MLI suivi d'un bus continu et un onduleur .Puis on terminera avec une conclusion.

I. Introduction

L'intégration de l'énergie éolienne dans le domaine de la production d'énergie constitue une variante intéressante qui pourrait assurer les besoins en électricité, et faire face à l'épuisement des sources traditionnelles d'énergies dans les prochaines années. Elle s'inscrit donc parfaitement dans l'effort global de réduction des émissions de CO₂ et plus généralement dans le contexte d'un développement durable du paysage énergétique.

Avant d'aborder les aspects techniques de la technologie éolienne, nous proposons de donner une brève introduction générale sur l'énergie éolienne, traitant en premier lieu du développement de l'éolien, ainsi que des questions relatives à la conception des éoliennes. La deuxième partie est consacrée à la description de la turbine éolienne, ces éléments constitutifs, ces différents types, et les stratégies de fonctionnement (vitesse fixe, vitesse variable).

Un état de l'art de la conversion électromécanique est présenté en dernière partie, comportant les différents types de machines électriques utilisées dans les aérogénérateurs, ainsi que leurs avantages et inconvénients [1].

I.1.Descriptif et qualité de l'énergie éolienne

I.1.1.Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (figure I.1) [2].

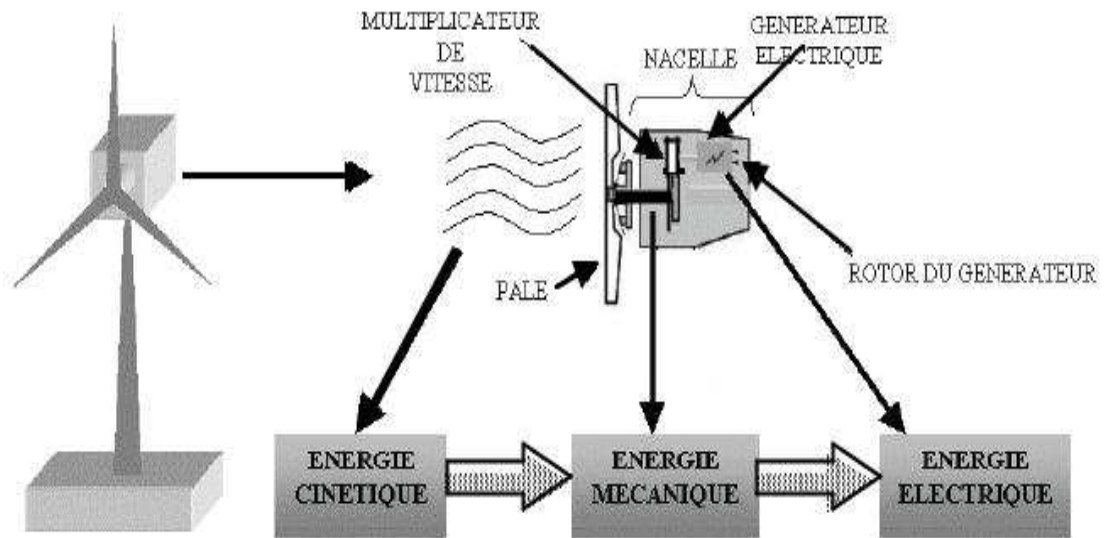


Figure .I.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent

I.1.2. Architecture d'une éolienne à axe horizontal

On peut considérer trois composants essentiels dans une éolienne, le rotor, la nacelle et la tour, comme illustré sur la (figure I.2) [1].

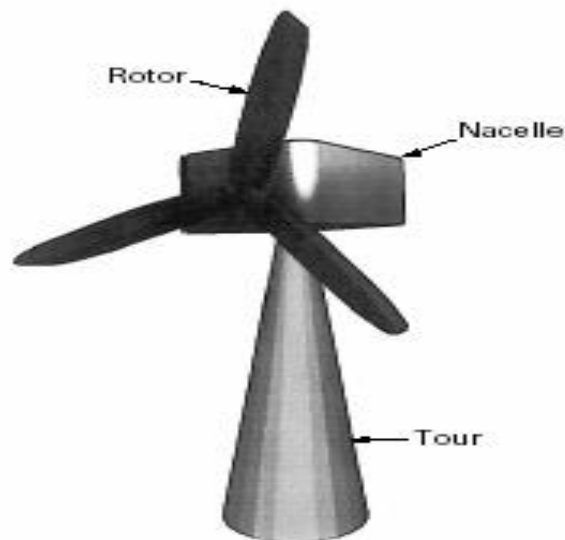


Figure I.2: Composants d'une éolienne

a. Rotor

C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué de pales et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Sur certaines machines, l'arbre primaire qui tourne à faible vitesse comporte un dispositif permettant de faire passer des conduites hydrauliques entre la nacelle (repère fixe) et le moyeu (repère tournant). Cette installation hydraulique est notamment utilisée pour la régulation du fonctionnement de la machine (pas des pales variables, freinage du rotor...) [3].

b. Nacelle

Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques. Différentes configurations peuvent être rencontrées suivant le type de la machine. La figure (I.3) présente une coupe d'une nacelle avec ses différents composants :

- 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. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques.
- L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine [3], [4].
- la génératrice: Différents types de génératrices peuvent être rencontrés.
- 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, nacelle face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie et réduire les efforts instationnaires sur l'installation. 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 [3], [4].
- divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau, ou d'huile.

Le dispositif d'orientation de la nacelle permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée. De nombreuses éoliennes comportent un système de blocage mécanique de la position de la nacelle suivant une orientation donnée ; cela évite de solliciter constamment les moteurs et permet aussi de bloquer l'éolienne durant les opérations de maintenance [3], [4].

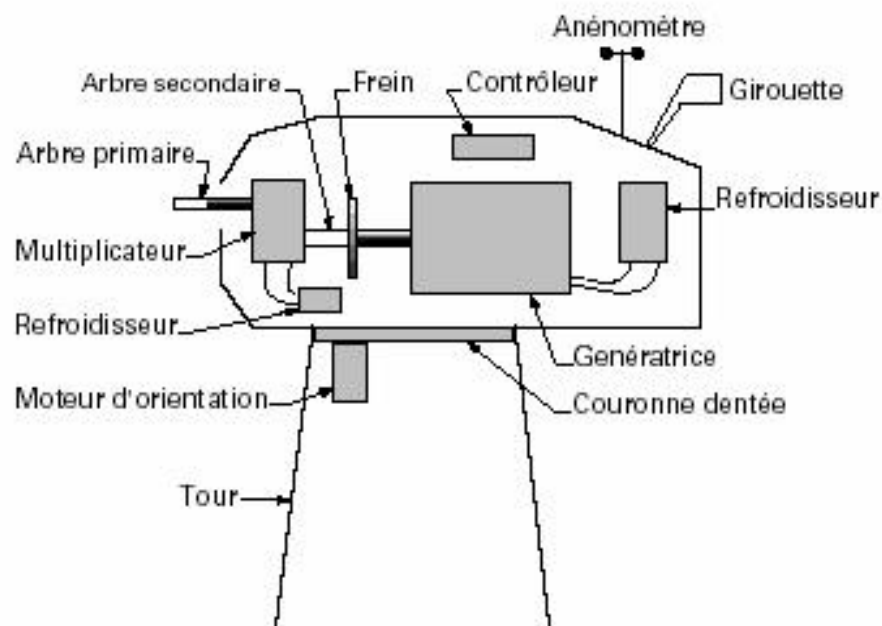


Figure I.3: Eléments d'une nacelle

C.Tour

Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor, nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi le captage de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble (rotor, nacelle) de manière à s'adapter au mieux aux différents sites d'implantation.

I.2. Différents types d'éolienne

On classe les éoliennes suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux types de turbines éoliennes:

- Turbines à axe horizontal.
- Turbines à axe vertical.

I.2.1. Turbine à axe horizontal

La plupart des éoliennes actuellement installées utilisent des turbines à axe horizontal [4], [5]. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales (les plus courantes) et les multipales (figure 1.4).

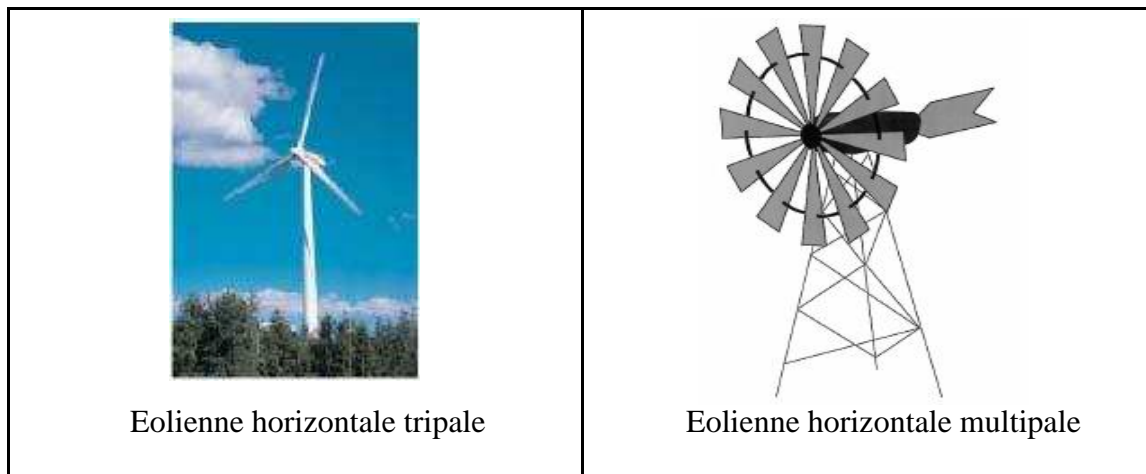


Figure I.4: Eoliennes tripales et multipales

La voile peut être placée avant la nacelle (Eolienne « amont ») et alors un système mécanique d'orientation de la surface active de l'éolienne « face au vent » est nécessaire. Une autre solution qui permet d'alléger la construction par la suppression de tout dispositif mécanique d'orientation est l'emplacement de la turbine derrière la nacelle (Eolienne « aval »). Dans ce cas la turbine se place automatiquement face au vent. Les éoliennes de ce type sont assez rares car des vibrations importantes sont à noter qui sont dues au passage des pales derrière le mât. La figure (1-5) montre les deux procédés [5].

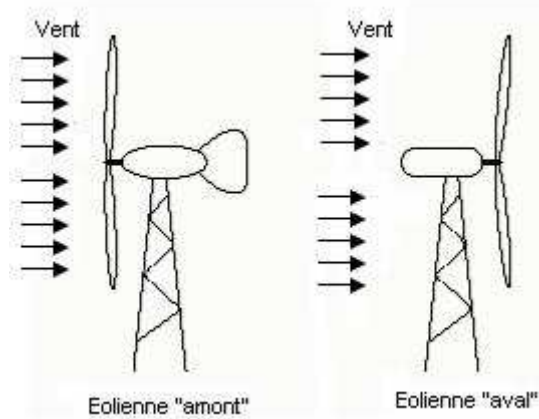


Figure I.5: Configurations à axe horizontal

I.2.2. Turbines à axe vertical

Elles présentent certains avantages : machineries au sol, pas besoin d'orientation en fonction de la direction du vent, construction souvent simple. Elles tournent à faible vitesse et sont de ce fait peu bruyantes. Elles présentent par contre des difficultés pour leur guidage mécanique, le palier bas devant supporter le poids de l'ensemble de la turbine [5], [4].

Il existe principalement trois technologies de ce type d'éoliennes (figure I.7).

- Les turbines Darrieus classiques.
- Les turbines Darrieus à pales droites (type-H).
- Les turbines Savonius.

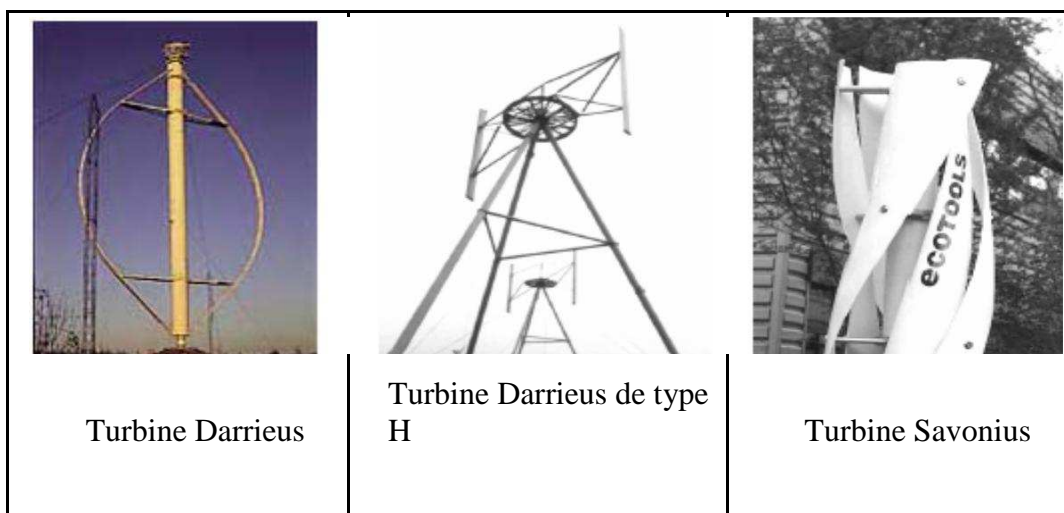


Figure I.6: Eoliennes à axe vertical [6]

I.3. Avantages et inconvénients des énergies éoliennes

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après.

I. 3.1. Les avantages

- L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement.
- L'impact néfaste de certaines activités de l'homme sur la nature est aujourd'hui reconnu par de nombreux spécialistes. Certaines sources d'énergie notamment, contribuent à un changement global du climat, aux pluies acides ou à la pollution de notre planète en général. La concentration de CO₂ a augmenté de 25% depuis l'ère préindustrielle et elle ait doublé pour 2050. Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0,6° depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5°C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand. Les conséquences de ce réchauffement ne sont pas prévisibles, mais il est possible d'avancer qu'il provoquera une augmentation du niveau de la mer de 15 à 95 cm d'ici l'an 2100 [6].
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable.
- Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles.
- Ainsi, l'exploitation de l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 millions de tonnes de CO₂, 21 mille tonnes de SO₂ et 17,5 mille tonnes de NO₂.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets 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 de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains.
- La source d'énergie locale c'est une qui répond aux besoins locaux en énergie.

- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie à ces pays pour se développer.
- L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple.
- Le cout 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 crée plus d'emplois par unité d'électricité que 'importe quelle source d'énergie traditionnelles.

I.3.2. Les inconvénients

Mêmes s'ils ne sont pas nombreux, l'éolienne a quelques désavantages :

- L'impact visuel ça reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit, il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur.
- L'impact sur les oiseaux, certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs.
- La puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est pas toujours très bonne.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques.

I.4. Énergie éolienne en Algérie

L'Algérie à l'instar des autre pays essaye de percer dans le domaine des énergies renouvelables et l'énergie éolienne en particulier.

Une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent a permis de faire une première identification des régions ventées de l'Algérie. Cette représentation de la vitesse sous forme de carte, a deux objectifs : le premier est d'identifier les vastes régions avec de bonnes promesses d'exploitation de l'énergie éolienne. Le second est de mettre en évidence la variation relative de la ressource à travers le pays [7].

La carte représentée dans la figure (I.7) montre que le sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar, concernant le nord, la vitesse moyenne est globalement peu élevée. Il est noté cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El kheiter ainsi que dans la région délimitée Bejaia au nord et Biskra au sud. Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qui ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. La réalisation d'une carte saisonnière a montré clairement que l'automne et l'hiver sont moins ventée. Néanmoins, il faut remarquer que la région de Tiaret fait l'exception avec une vitesse plus faible en été qu'en hiver [7].

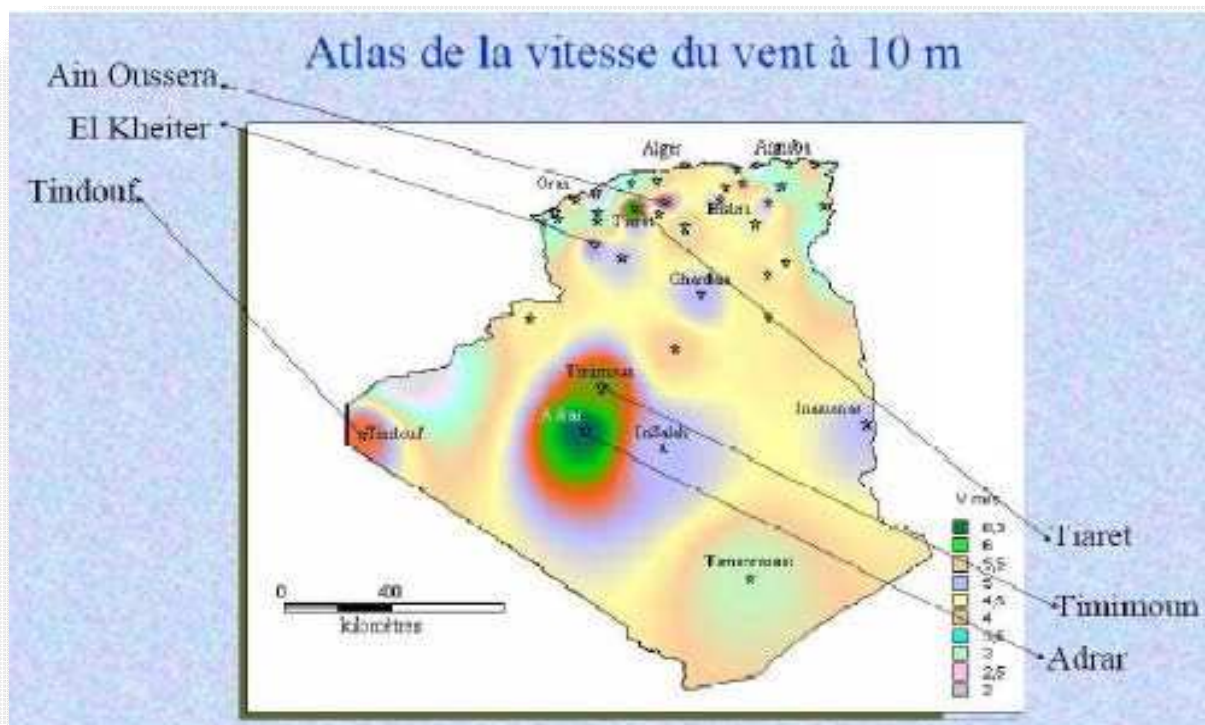


Figure I.7: Carte du potentiel éolien en Algérie

Cette carte permet de cibler les zones les mieux ventées pour installer des parcs éoliens en vue d'alimenter des régions isolées pour avoir une autonomie énergétique par rapport au réseau national déjà très chargé. Des projets de ce genre sont en phase d'étude et d'autres commencent à voir le jour tel que la réalisation de la première ferme éolienne à Adrar d'une puissance de 10MW.

I. 5. Différents systèmes de conversion électromagnétique de l'énergie éolienne

Il existe plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques. Certaines machines typiquement utilisées dans les constructions éoliennes sont décrites dans les paragraphes suivants en tenant compte de leurs spécificités.

I.5.1. Machine asynchrone à cage (MAS)

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

Une topologie consiste à relier directement une MAS à cage d'écureuil au réseau. Un multiplicateur est associé à la machine et une batterie de condensateurs assure sa magnétisation. La vitesse de rotation peut alors être faiblement variable, limitée par le glissement maximum de la MAS. L'avantage de cette architecture est sa simplicité et son faible coût [1].

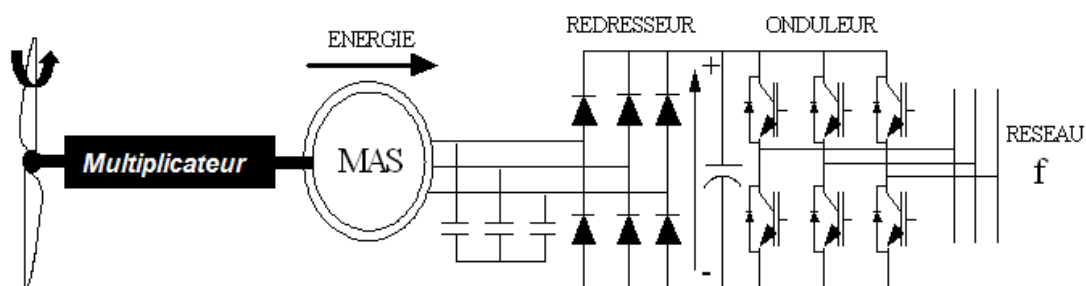


Figure I.8: Eolienne utilisant une machine asynchrone

I. 5.2. Machine synchrone (MS)

C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux à très grande puissance (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur - réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéro turbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite.

C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau. Elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.

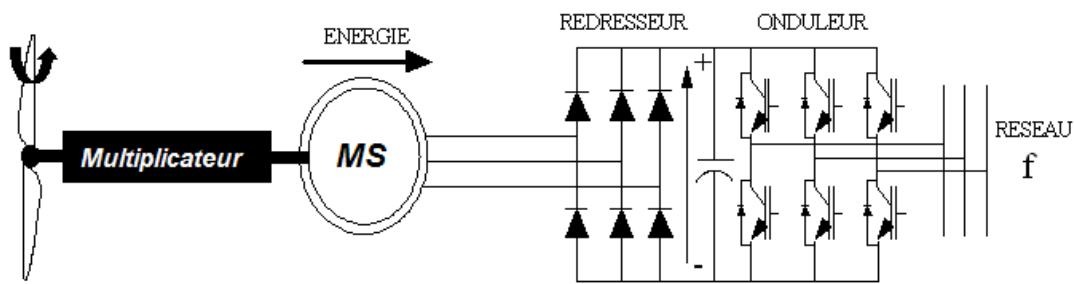


Figure I.9: Système éolien basé sur la machine synchrone

Dans la configuration précédente (figure I.10), la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplées. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance [3].

I. 5.3. Machines asynchrones à double alimentation (MADA)

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes décrits ci-dessous. Les convertisseurs utilisés sont alors dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Le surcoût engendré par la présence de bobinages au rotor est alors compensé par l'économie réalisée sur le convertisseur.

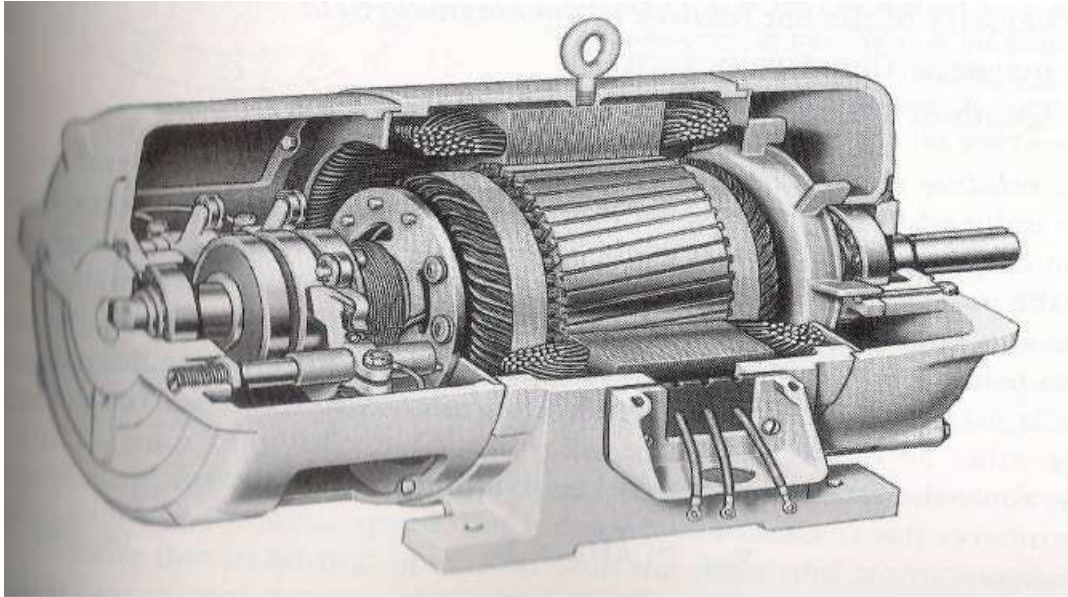


Figure I.10: Machine asynchrone à rotor bobiné

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants (*Vestas, Gamesa,...*)

I. 5.4. Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)

Les éoliennes basées sur les génératrices soit asynchrone ou à rotor bobiné présentent l'inconvénient de nécessiter un système de bagues et de balais pour la MADA et un multiplicateur pour les deux types, induisant des coûts significatifs de maintenance en particulier pour les projets offshore situés en milieu salin. Pour limiter ces inconvénients, certains constructeurs ont développé des éoliennes basées sur des machines synchrone à grand nombre de paires de pôles et couplées directement à la turbine, évitant ainsi le multiplicateur. Si de plus la génératrice est équipée d'aimants permanents, le système de bagues et balais est éliminé.

L'inconvénient de cette structure, est qu'elle nécessite pour sa connexion au réseau des convertisseurs de puissance dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice. Cet inconvénient est cependant un avantage du point de vue contrôle de l'éolienne. En effet l'interfaçage avec le réseau peut être entièrement contrôlé via le convertisseur connecté à ce réseau, tandis que le convertisseur connecté à la génératrice permet de contrôler la puissance générée par celle-ci en limitant le pitch control à une fonction de sécurité par grand vent [1].

Les machines à courant continu présentent une excellente marge de variation de la vitesse de rotation, une commande simple et une excellente capacité de surcharge, mais elles sont chères et ont un grand poids [6].

Les générateurs à réluctances variables sont des machines mécaniquement robustes. Ils ont de plus un bon rendement à toutes les vitesses et une large marge de variation de la vitesse de rotation et leur commande est simple [6]. Un autre type des générateurs, est le générateur asynchrone.

Doublement alimenté au stator. Ce dernier n'est pas encore complètement au point, mais aurait un avantage sur les MADA à rotor bobiné, puisqu'il n'a pas de bagues, élément des machines asynchrones à rotor bobiné demandant une certaine maintenance. Ces types de machines pourraient être un candidat pour de futures éoliennes.

Nous avons présenté les quatre grandes familles des générateurs utilisés (jusqu'à maintenant) en production de l'énergie électrique par les éoliennes. Des facteurs techniques et économiques fixent le choix du type de machine pour chaque application. Ce choix dépend dans la plupart du temps de la catégorie de la puissance (petite ou grande puissance) et la manière de fonctionnement de la chaîne de conversion (autonome ou non autonome, à vitesse fixe ou variable), il y a des cas où ce choix dépend de l'environnement. Le tableau (I.3) montre quelques prototypes disponibles dans le marché éolien. Ils sont destinés principalement aux applications de grande puissance.

Tableau1.3:Principaux types de machines électriques utilisées dans la construction des éoliennes [6]

Générateur	Transmission	Convertisseur	Puissance	Société
MADA	Avec multiplicateur	Une partie de la puissance totale	1.5 MW, 3	Sinovel
			MW, 5	Vestas
			MW 2	GE wind
			MW, 2.6	Gamesa
			MW, 3	Nordex
			MW	Dong
			1.5 MW	Fang
				REpower
			0.85 MW, 2 MW, 2.5 MW	Suzlon
			2.4 MW, 2.5 MW, 3.0 MW, 3.3 MW	
		1.0 MW, 1.5 MW, 2.0 MW, 2.5 M		
	Avec multiplicateur	Sur le flux de la puissance (TP)	3.3 MW	Vestas
			2.5 MW	GE wind
			3.0 MW	WinwinD
	Sans multiplicateur		4.5 MW,	Gamesa
			8.0 MW	Vestas
			4.0 MW	GE wind
			3 MW, 6	Siemens Wind
MAS	Avec multiplicateur	(TP)	6.0 MW	Sinovel
MS	Avec multiplicateur	(TP)	0.8 MW-7.58 MW	Enercon

De nombreux travaux de recherche (articles et ouvrages) ont été menés sur l'utilisation des machines électriques dans la production d'électricité. Quelques travaux effectués ce sont intéressés à la comparaison des différents types de ces machines, pour des applications éoliennes.

I.6.La connexion au réseau

Le réseau de distribution impose la stabilité de la tension et de la fréquence. Il faut donc gérer les phases transitoires de fonctionnement de l'éolienne, tels que le démarrage, l'arrêt ou l'absorption de rafales. Un démarrage progressif de l'éolienne à l'aide des thyristors est alors envisagé. Ces thyristors jouent le rôle d'interrupteurs assurant une connexion ou une déconnexion graduelle au réseau. Ces interrupteurs peuvent aussi être des disjoncteurs de dérivation. Ces processus ne sont pas pris en compte pour cette étude. Les éoliennes doivent être rependues à certains règles pour satisfaire aux exigences techniques de raccordement au réseau, Actuellement, le code de réseau Algérien ne tient pas compte des énergies renouvelables et notamment de l'énergie éolienne. Dans la région d'Adrar, le réseau n'est pas interconnecté avec le nord. C'est un réseau local (ou micro réseau). Différents composants sont installés lors de la connexion de l'éolienne

I.6.1.Le transformateur élévateur de tensions

Les générateurs de turbine d'éolienne ont en général une tension de sortie de l'ordre de 690 (V). Le transformateur permet d'élever la tension pour le raccord au réseau de distribution « par exemple 20 (kV) ». Actuellement, il n'y a pas d'éolienne directement connectée sur le réseau de transport

I. 6.2.Les batteries de condensateurs

Pour les systèmes de conversion éolienne se basant sur la machine asynchrone, améliorer le facteur de puissance de l'installation peut améliorer en connectant au réseau trois batteries monophasées de condensateurs couplées en triangle. En mode autonome, les batteries de condensateurs deviennent indispensables pour la magnétisation de la machine asynchrone. Ces batteries ne sont pas obligatoires pour la MADA.

Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur la production de l'énergie électrique à partir de l'exploitation de l'énergie éolienne et son importance en tant qu'énergie verte. Nous avons également présenté une évaluation du potentiel éolien Algérien afin d'avoir une idée sur l'importance de l'investissement dans ce créneau. Nous avons également consacré ce chapitre à la description d'une éolienne, le calcul de la puissance extraite de la rotation de celle-ci, et les objectifs derrière le contrôle de son fonctionnement. Enfin, nous avons donné un aperçu sur la conversion électromécanique et les différents types de machines utilisées. La comparaison entre ces machines a dégagé l'idée de consacrer notre étude à un système utilisant une machine synchrone à aimants permanents (MSAP).

Tableau1.3:Principaux types de machines électriques utilisées dans la construction des éoliennes [6]

Générateur	Transmission	Convertisseur	Puissance	Société
MADA	Avec multiplicateur	Une partie de la puissance totale	1.5 MW, 3 MW, 5 MW, 2 MW, 2.6 MW, 3 MW, MW	Sinovel Vestas GE wind Gamesa Nordex Dong Fang REpower Suzlon
			0.85 MW, 2 MW, 2.5 MW	
			2.4 MW, 2.5 MW, 3.0 MW, 3.3 MW	
			1.0 MW, 1.5 MW, 2.0 MW	
			3.3 MW	Vestas
			2.5 MW	GE wind
			3.0 MW	WinwinD
			4.5 MW,	Gamesa
			8.0 MW	Vestas
			4.0 MW	GE wind
3 MW, 6	Siemens Wind			
MAS	Avec multiplicateur	(TP)	6.0 MW	Sinovel
MS	Avec multiplicateur	(TP)	0.8 MW-7.58 MW	Enercon

De nombreux travaux de recherche (articles et ouvrages) ont été menés sur l'utilisation des machines électriques dans la production d'électricité. Quelques travaux effectués ce sont intéressés à la comparaison des différents types de ces machines, pour des applications éoliennes.

I.6.La connexion au réseau

Le réseau de distribution impose la stabilité de la tension et de la fréquence. Il faut donc gérer les phases transitoires de fonctionnement de l'éolienne, tels que le démarrage, l'arrêt ou l'absorption de rafales. Un démarrage progressif de l'éolienne à l'aide des thyristors est alors envisagé. Ces thyristors jouent le rôle d'interrupteurs assurant une connexion ou une déconnexion graduelle au réseau. Ces interrupteurs peuvent aussi être des disjoncteurs de dérivation. Ces processus ne sont pas pris en compte pour cette étude. Les éoliennes doivent être rependues à certains règles pour satisfaire aux exigences techniques de raccordement au réseau, Actuellement, le code de réseau Algérien ne tient pas compte des énergies renouvelables et notamment de l'énergie éolienne. Dans la région d'Adrar, le réseau n'est pas interconnecté avec le nord. C'est un réseau local (ou micro réseau). Différents composants sont installés lors de la connexion de l'éolienne

I.6.1.Le transformateur élévateur de tensions

Les générateurs de turbine d'éolienne ont en général une tension de sortie de l'ordre de 690 (V). Le transformateur permet d'élever la tension pour le raccord au réseau de distribution « par exemple 20 (kV) ». Actuellement, il n'y a pas d'éolienne directement connectée sur le réseau de transport

I. 6.2.Les batteries de condensateurs

Pour les systèmes de conversion éolienne se basant sur la machine asynchrone, améliorer le facteur de puissance de l'installation peut améliorer en connectant au réseau trois batteries monophasées de condensateurs couplées en triangle. En mode autonome, les batteries de condensateurs deviennent indispensables pour la magnétisation de la machine asynchrone. Ces batteries ne sont pas obligatoires pour la MADA.

Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur la production de l'énergie électrique à partir de l'exploitation de l'énergie éolienne et son importance en tant qu'énergie verte. Nous avons également présenté une évaluation du potentiel éolien Algérien afin d'avoir une idée sur l'importance de l'investissement dans ce créneau. Nous avons également consacré ce chapitre à la description d'une éolienne, le calcul de la puissance extraite de la rotation de celle-ci, et les objectifs derrière le contrôle de son fonctionnement. Enfin, nous avons donné un aperçu sur la conversion électromécanique et les différents types de machines utilisées. La comparaison entre ces machines a dégagé l'idée de consacrer notre étude à un système utilisant une machine synchrone à aimants permanents (MSAP).

I.1.Introduction

Le système de conversion de l'énergie éolienne est un système complexe à cause de la multiplicité des domaines existants, à savoir, le domaine aérodynamique, mécanique, et électrique. Et les facteurs déterminant la puissance mécanique, comme la vitesse du vent, la dimension, et la forme de la turbine.

Dans le chapitre précédent nous avons abordé la structure externe d'une éolienne, qui sert à capter l'énergie du vent et la structure interne chargée de la transformer en énergie électrique. Dans ce chapitre nous allons établir un modèle mathématique qui permettra de simuler le comportement de l'éolienne.

Un modèle dynamique rassemblant tous ces paramètres est nécessaire pour comprendre le comportement de la turbine, et le recours à la modélisation est devenu une nécessité pour contrôler ces performances et satisfaire les caractéristiques opérationnelles voulues.

Le système mécanique de l'éolienne est composé de quatre organes et peut être représenté comme illustré sur la figure (II-1), [8].

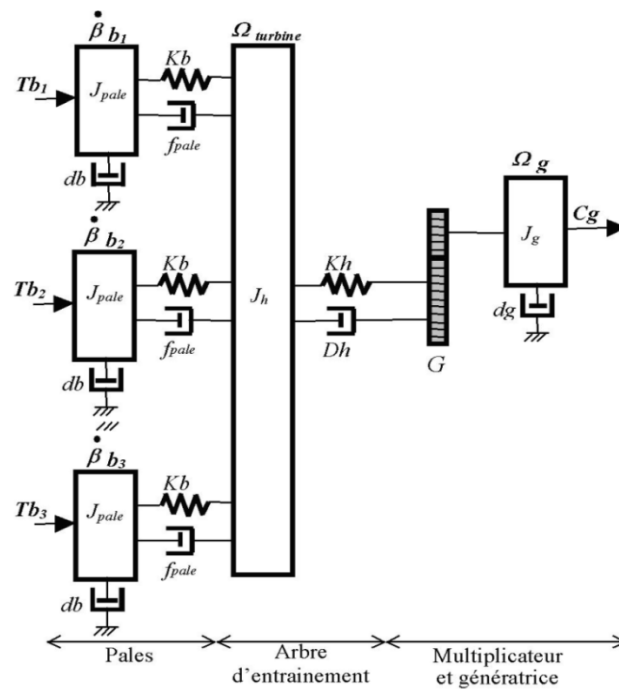


Figure II.1 : Schéma mécanique équivalent de la turbine éolienne

Les trois pales de l'éolienne sont considérées de conception identique et possèdent donc :

- la même inertie J_{pale}
- la même élasticité k_b
- le même coefficient de frottement par rapport à l'air d_b

Ce rotor transmet un couple entraînant à la génératrice (C_g) électrique et tourne à une vitesse notée W_{mec} . La turbine comporte également un multiplicateur de vitesse noté G .

Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée, alors on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De part la conception aérodynamique des pales, leur coefficient de frottement par rapport à l'air d_b est très faible et peut être ignoré. De même, les pertes par frottement côté turbine sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice.

En tenant compte de ces considérations, le modèle mécanique de la figure (II.1) devient celui donné dans la figure (II.2) comportant deux masses tournantes grâce au couple aérodynamique C_{aer} [9].

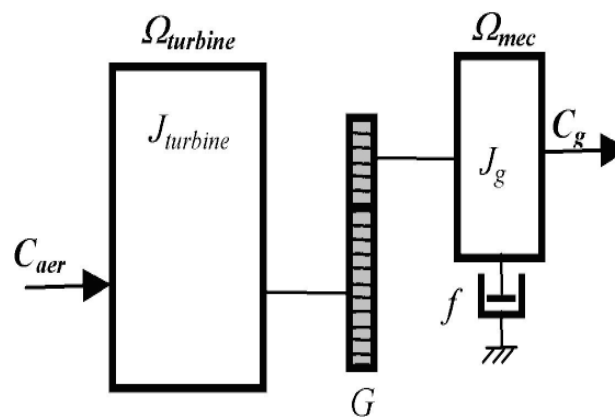


Figure II.2: Schéma mécanique équivalent simplifié de la turbine éolienne

II .2. Modélisation du vent

Le vent est la source principale d'énergie pour faire fonctionner une éolienne, c'est pourquoi il est nécessaire de connaître son modèle mathématique. Celui-ci peut être une simple loi exponentielle où bien utilisant des distributions spectrales et spatiales très complexes qui rendent compte de sa phénoménologie turbulente [7].

La modélisation du vent est primordiale que ce soit pour :

- définir les conditions de fonctionnement de l'éolienne ;
- définir les sollicitations qui s'appliquent sur les pales ;
- développer et affiner la modélisation du rotor ;
- évaluer le potentiel d'énergie utilisable ;
- fournir une aide pour l'implantation des machines.

La définition du modèle du vent nécessite des données climatiques et géographiques du site concerné, ainsi que la période de l'an concernée par l'étude. Le modèle du vent est donné par une représentation en série de Fourier qui présente le vent comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques. [7].

$$V_v(t) = A + \sum_{i=1}^K a_K \sin(\omega_K t) \quad (\text{II.1})$$

Avec :

A : la valeur moyenne de la vitesse du vent

a_K : amplitude de l'harmonique de l'ordre K

ω_K : pulsation de l'harmonique de l'ordre K

i : le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent

II.3. Modélisation de la turbine éolienne

II.3.1. Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

Considérons une turbine éolienne à trois pales orientables, fixées sur un l'arbre de la turbine formant ainsi un bloc mécanique capable de tourner grâce à l'énergie du vent. Ceci permet de déduire que chaque partie de cet ensemble subit trois contraintes à savoir sa propre inertie, le frottement et la contrainte élastique. D'une manière générale l'arbre de la turbine est solidaire d'un multiplicateur de vitesse, qui, à son tour est lié à l'arbre de la génératrice. La figure II.1 illustre d'une manière détaillée le schéma équivalent de la turbine éolienne [9].

II.3.2. Modélisation de la turbine à étudier

La turbine considérée est à axe horizontal, de rayon 0.5m, d'une hauteur de 2m, et d'une puissance de 600watt. Elle ne comporte pas de multiplicateur de vitesse figure (II.3) [10].

Elle est caractérisée par l'équation caractéristique de $C_p = F(\lambda)$ suivante :

$$C_p = -0.2121\lambda^3 + 0.0856\lambda^2 + 0.2539\lambda \quad (\text{II.2})$$

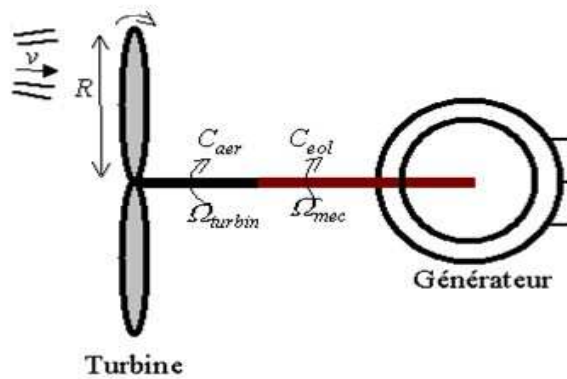


Figure II.3 : Schéma simplifié de la turbine éolienne

II.3.3. Equation dynamique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie notée $J = J_{\text{turbine}}$ et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de cette dernière [9].

$$J = J_{\text{turbine}} + J_{\text{génératrice}} \quad (\text{II.3})$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe.

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total $C_{\text{méc}}$ appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega_{\text{méc}}}{dt} = C_{\text{méc}} \quad (\text{II.4})$$

$$C_{\text{méc}} = -C_{\text{em}} - C_{\text{vis}} \quad (\text{II.5})$$

- J : l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice,
- $C_{\text{méc}}$: le couple mécanique,

- C_{em} : le couple électromagnétique produit par la génératrice,
- C_{vis} : le couple des frottements visqueux.
- Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux
- f_m tel que

$$C_{vis} = f_m \cdot \Omega_{méc} \quad (\text{II } 6)$$

La modélisation d'une turbine éolienne revient à connaître le couple qu'elle développe au niveau du rotor, et qu'elle extrait de la puissance éolienne, suivant ces équations [10] :

$$C_p P_{éol} = \frac{1}{2} (\lambda) \rho \cdot s \cdot V_v^2 \quad (\text{II } 7)$$

$$\lambda = \frac{R \Omega_{méc}}{V_v} \quad (\text{II } 8)$$

$$C_{éol} = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^3 V_v^2 \cdot \frac{C_p(\lambda)}{\lambda} \quad (\text{II } 9)$$

Afin d'obtenir la vitesse de rotation de la turbine, on utilise l'équation mécanique de l'arbre de la turbine solidairement lié à celui de la machine synchrone utilisée

$$(J_t + J_m) \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{éol} - C_{ém} \cdot f_m \cdot \Omega_{méc} \quad (\text{II } 10)$$

Avec:

$P_{éol}$: la puissance éolienne

λ : la vitesse relative de la turbine

$\Omega_{méc}$: la vitesse de rotation

V_v : la vitesse du vent

ρ : la densité de l'air

C_p : le coefficient de puissance

$C_{éol}$: le couple éolien

J_t : inertie de la turbine

J_m : inertie de la machine

$C_{ém}$: Couple électromagnétique

f_m : Coefficient de frottements visqueux dans la machine

Remarque : le coefficient de frottements visqueux dans la turbine est négligeable

II.4. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse

Afin d'extraire un maximum de puissance malgré les variations fréquentes de la vitesse du vent, une commande par l'asservissement de la vitesse de rotation permet de maintenir le rapport entre la puissance extraite et celle du vent à sa valeur maximale. En d'autres termes maintenir le coefficient de puissance C_p à sa valeur maximale. Cette commande nécessite l'utilisation d'un régulateur de vitesse [9].

Nous avons procédé à la simulation de la turbine en utilisant les équations données précédemment. Les conditions de simulation sont les suivantes:

- 1 $C_{pmax} = 0.35$ le coefficient de puissance maximum.
- 2 $\lambda_{opt} = 7.07$ la vitesse relative maximale.
- 3 Le schéma de simulation doit permettre de commander la vitesse de rotation de sorte à: maintenir les valeurs maximales de C_{pmax} et λ_{opt} quelque soit la vitesse du vent.

Afin de réaliser la commande de la vitesse à facteur de puissance maximum, on a mis en œuvre le schéma bloc de la figure (II.4) basé sur les équations (II.4), (II.5) et (II.6).

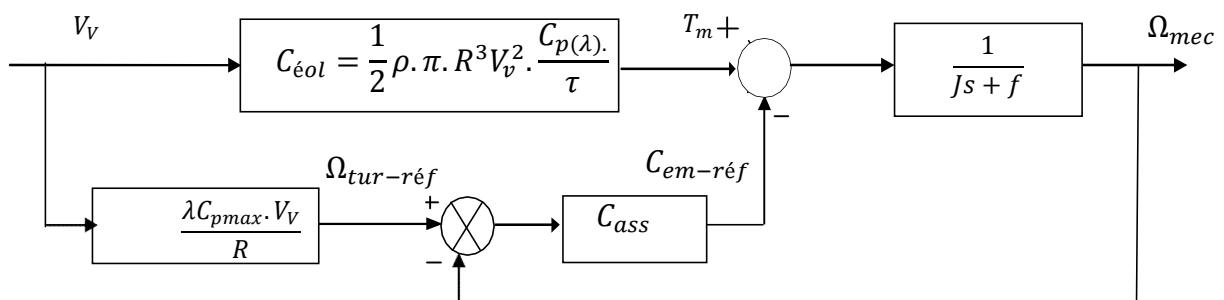


Figure II.4 : Schéma bloc de la turbine avec maximisation de la puissance extraite à l'aide d'un asservissement de la vitesse

Le vent étant la source principale d'énergie pour le fonctionnement du système, il fournit le couple aérodynamique T_m dont on soustrait le couple électromagnétique créé dans la génératrice on obtient le couple mécanique qui permet de calculer la vitesse de rotation. Mais pour commander cette dernière on calcule la vitesse qui correspond à C_{pmax} . Ensuite on génère le couple électromagnétique de référence en se servant d'un contrôleur.

II.5.Détermination de la vitesse de référence

La commande de la vitesse de rotation de la turbine nécessite d'imposer une vitesse de rotation de référence qui permet de vérifier les conditions 02 et 03 du paragraphe II.4, c'est-à-dire $C_{pmax} = 0.35$ et $\lambda_{opt} = 7.07$.

La vitesse de rotation de référence est donnée par:

$$\Omega_{max} = \frac{\lambda_{max} v_p}{R} \quad (II.11)$$

II.6.Synthèse des régulateurs

II.6.1.Calcul des paramètres du régulateur de vitesse PI

Considérons le schéma de commande donné par la figure (II.4) Le couple électromagnétique de référence est obtenu grâce à l'action d'un contrôleur de type PI sur la différence entre la vitesse de référence et la vitesse de rotation.

La fonction de transfert qui décrit cette action est donnée par :

$$C_{max-ref} = \left(K_i + \frac{K_p}{s} \right) \cdot \left(\Omega_{tur-ref}(S) - \Omega_{mec}(S) \right) \quad (II.12)$$

K_i : Le gain intégral

K_p : Le gain proportionnel

Si on isole la partie du schéma de commande qui concerne la boucle de régulation de la vitesse on obtient le schéma de la figure II.6 [20]

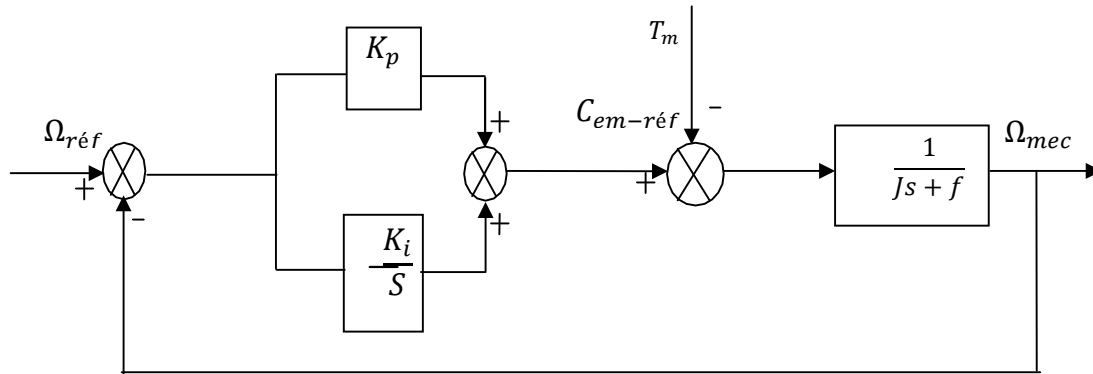


Figure II.6: Schéma bloc de l'asservissement en utilisant un régulateur PI

Comme le système à étudier est linéaire on peut écrire, en vertu du théorème de superposition, la fonction de transfert sous la forme suivante :

$$\Omega_{mec}(S) = F(S) \cdot \Omega_{réf}(S) - P(S)T_m(S) \tag{II.13}$$

$$F(S) = \frac{K_p S + K_i}{JS^2 + (f + K_p)S + K_i} \tag{II.14}$$

$$P(S) = \frac{S}{JS^2 + (f + K_p)S + K_i}$$

(II.15) Au régime permanent l'erreur statique due à la perturbation externe en l'occurrence le couple aérodynamique T_m est nulle grâce à la fonction intégrale du régulateur.

La fonction de transfert s'écrira alors comme ceci :

$$\Omega_{mec} = F(S) \cdot \Omega_{réf} \tag{II.16}$$

Le choix d'une pulsation propre m_n et d'un facteur d'amortissement ε_n permettent de calculer les coefficients du régulateur PI.

$$.17) \quad K_i = \omega_n^2 \cdot J \quad (\text{II})$$

$$K_p = 2 \cdot \varepsilon_n \cdot \omega_n \cdot J - f \quad (\text{II } 19)$$

II.7. Résultats de simulation

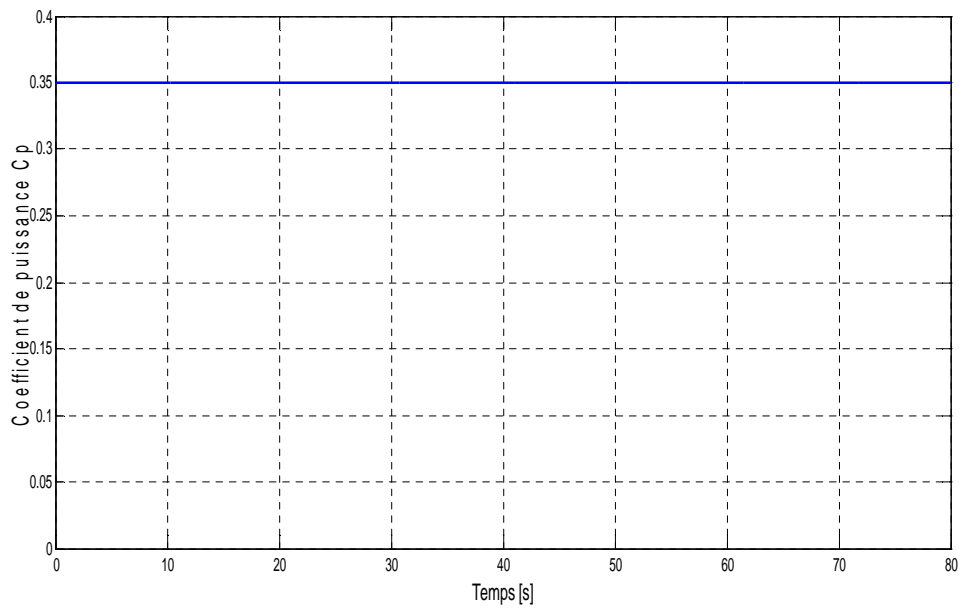


Figure II.8 Allure de coefficient de puissance C_p

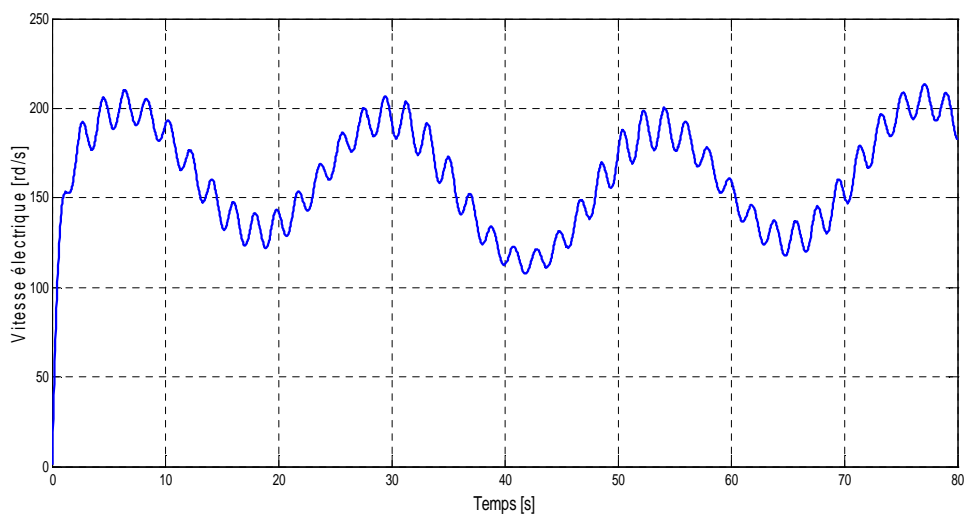


Figure II.9 Allure de profil de vent

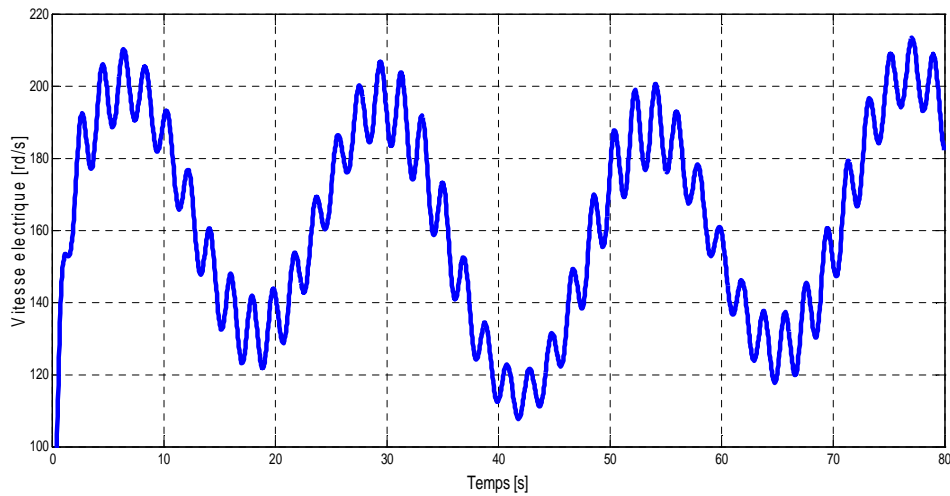


Figure II.10 Allure de profil de la vitesse de la turbine

D'après la figure (II 8) le coefficient de puissance prend une valeur optimale qui vent 0.35 La forme de la vitesse de la turbine prend la même forme que celui de vent.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé la turbine éolienne, le comportement de cette turbine soumis aux vents à une vitesse approximativement de 200 rd/s, à l'aide de simulations numériques réalisé sous le logiciel Matlab-simulink. Ou nous avons montré l'allure de la vitesse de rotation de la turbine à l'aide d' un ensemble de lois de commande pour atteindre l'objectif principale de cette commande à savoir l'optimisation de l'extraction de l'énergie de vent ou cette éolienne ne peut pas fonctionner en absence de ce principe condition qui est le souffle de vent. ainsi qui va permettre de contrôler la puissance fournie par l'éolienne grâce à un asservissement de vitesse de rotation de la turbine avec de régulateur Proportionnel Intégral (PI).

III.1. Introduction

L'évolution des aimants permanents modernes, qu'ils soient à base d'alliages métalliques ou à terres rares (par exemple du type manico, samarium cobalt, néodyme fer bore ...) leur a permis d'être utilisés comme inducteurs dans les machines synchrones offrant ainsi beaucoup d'avantages: induction de saturation élevée, faible désaimantation, densité massique élevée, énergie maximale stockée plus grande par rapport aux autres types de machines [11], [12],

Dans la machine à aimants permanents MSAP, l'inducteur est remplacé par des aimants. Le champ d'excitation créé par les aimants permanents, présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotorique. La machine synchrone à aimants permanents est utilisée largement dans plusieurs applications comme les machines à outils, la robotique, les générateurs aérospatiaux, la traction électrique,...). L'étude de cette machine dans le but de la commander, nous oblige à la mettre sous forme d'un modèle mathématique regroupant tous ces paramètres (résistance, inductance,...), permettant ainsi de mettre en évidence certains phénomènes apparaissant lors de son fonctionnement. En outre, ce modèle nous apporte une aide appréciable dans la résolution des problèmes techniques qui interviennent au cours des applications.

III.2. Présentation de la machine synchrone à aimant Permanent

Le terme de la machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles :

- les machines synchrone à rotor bobiné
- les machines synchrone à réluctance
- les machines synchrone à aimants permanents

Nous intérêt va plus particulièrement vers cette dernière catégorie, en effet avec l'apparition d'aimants permanents de plus en plus performants (faible désaimantation, énergie maximale stockée plus grande, induction de saturation et champ coercitif plus élevé).

La machine synchrone à aimant permanent est devenue compétitive par rapport à la machine asynchrone, même dans le domaine de la moyenne puissance [1].



Figure III.1 : Photographie du moteur à aimants en géométries cylindriques

Le stator de la machine synchrone à aimant permanent est identique à celui d'une machine asynchrone, il est constitué d'un empilage de tôle magnétique qui contient des encoches dans lesquelles sont logés trois enroulements identiques décalés entre eux de 120°. Le rotor de la MSAP est généralement de deux types :

- Rotor possédant des pièces polaires, servant à la concentration du flux d'induction dans lequel les aimants sont orientés soit parallèlement soit perpendiculairement à l'entrefer, soit de manière plus complexe. Dans ce type de machine, l'inducteur est à pôles saillants.
- Rotor sans pièces polaires, donc à entrefer constante, dans lequel l'aimantation des aimants est généralement perpendiculaire à l'entrefer.

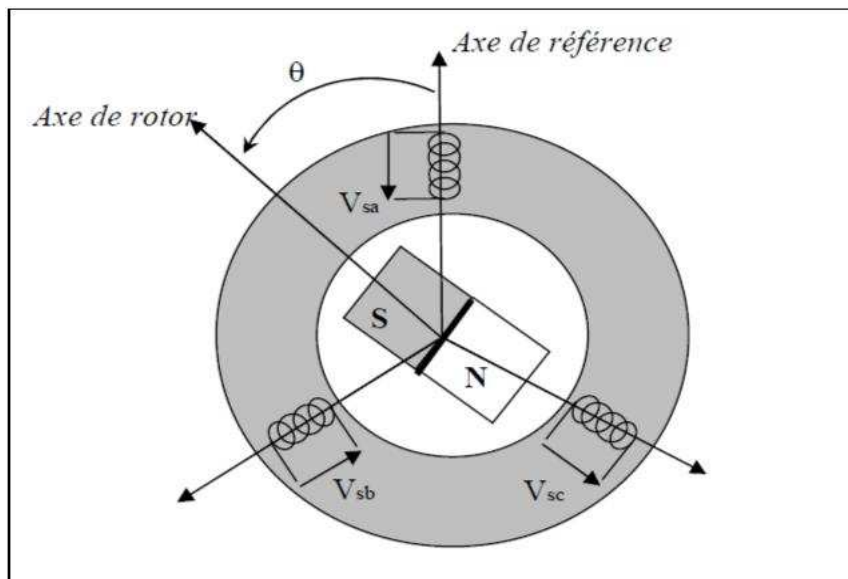


Figure III.2 : Schéma d'une machine synchrone à aimant permanent [12]

III.3 Comparaison entre la machine synchrone classique et la machine synchrone à aimant permanent

- La MSAP n'exige pas d'excitation, et grâce à l'absence des pertes par excitation et dans les contacts frottant, elle possède un rendement élevé. Dans la machine synchrone classique, l'excitation est nécessaire, l'enroulement d'excitation tournant et les balais présentent assez fréquemment des défaillances de plus, d'où le rendement est relativement faible
- La MSAP n'exige aucun entretien, et se caractérise par une sécurité de fonctionnement plus élevée, mais dans le MS classique, l'entretien est exigé avec moins de sécurité [1].
- La machine synchrone classique peut avoir trois modes de fonctionnement, à excitation optimale, sous excitée, et sur excitée. Ce qui la rend capable d'améliorer le facteur de puissance d'une installation comportant des appareils consommateurs de puissance réactive, ces avantages ne peuvent être donnés par une MSAP [1].
- La présence de l'inducteur à CC dans la machine synchrone rend la machine plus coûteuse qu'une MSAP, et nécessite de plus une alimentation et un réglage de l'excitation.

III .4 Types des MSAP à flux radial

Suivant la position géométrique de l'aimant dans la machine, on distingue deux types [13],

a. MSAP ou l'aimant est monté sur la surface du rotor (figure III.4-a,b)

L'entrefer effectif large a pour conséquences:

- Pas d'effet de saillant significatif.
- L'effet de réaction d'armature est négligeable.

b. MSAP à aimant inséré dans la matière du rotor (Figure III-4-c-d, e, f).

L'aimant apparaît comme un entrefer large d'axe direct (d) ou les épanouissements polaires présentent un petit entrefer dans l'axe (q)

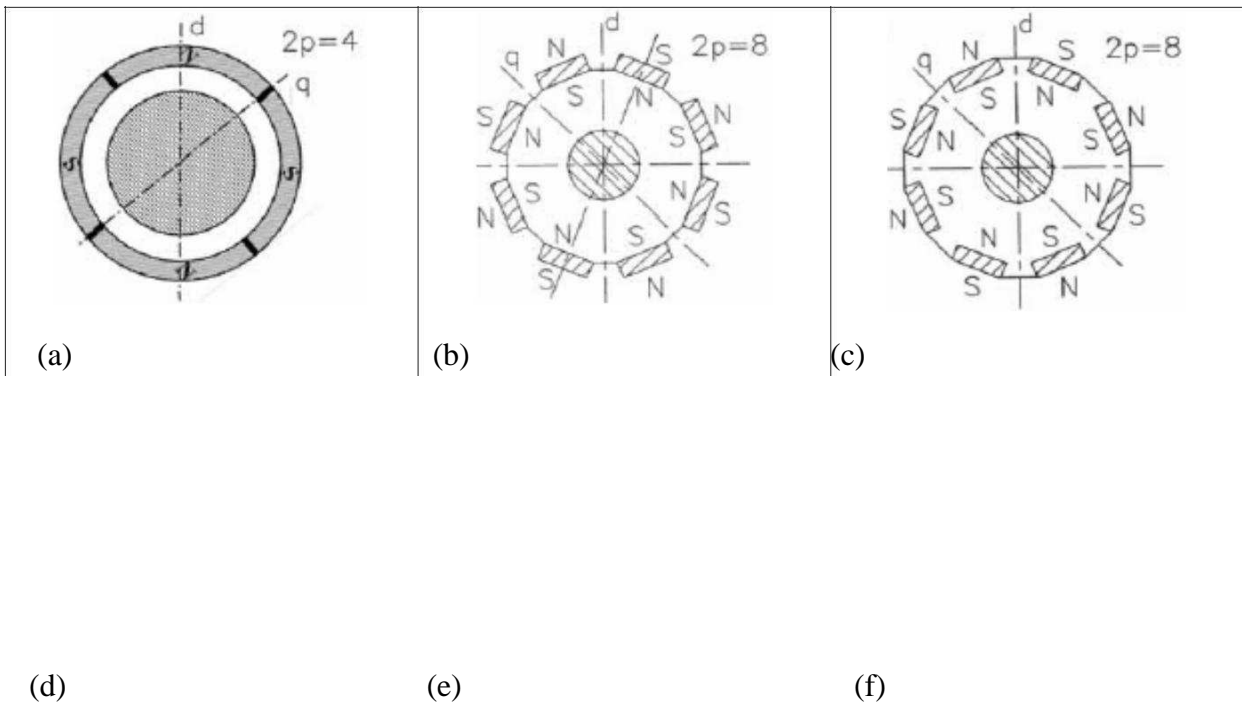


Figure III.4 : Structures d'inducteurs à aimants dans les machines à champ radial

- a) Aimant en surface (tubulaire, aimantation radiale alternée).
- b) Aimants en surface déposés collés ou frettés.
- c) Aimants en surface insérés entre des pièces polaires.
- d) Aimants enterrés.
- e) Aimants enterrés (aimantation ortho radiale), structure à aimants à concentration de flux.
- f) Aiment inséré et cage d'écureuil pour démarrage asynchrone.

III.5. Modélisation de la MSAP

Afin d'obtenir une formulation plus simple et de réduire la complexité du modèle de la machine, l'établissement de son modèle mathématique sera développé sur la base des hypothèses à savoir que [1] :

- Le stator connecté en étoile, neutre en l'air pour éliminer la composante homopolaire des courants.
- La saturation du circuit magnétique est négligée ce qui mène à exprimer les flux magnétiques comme des fonctions linéaires des courants des phases.
- La distribution de la FMM dans l'entrefer est sinusoïdale, les harmoniques d'espace sont alors négligés.
- Les pertes par hystérésis et par courants de Foucault sont négligées

III.6. Equations de la machine synchrone à aimants permanents

La machine synchrone à aimants permanents est constituée par trois bobinages statoriques qui constituent les trois phases, et des aimants au rotor distribués en 17 paires de pôles

III.6.1. Equations électriques

Les équations électriques des machines électriques dans un repère fixe lié au stator sont décrites par :

$$V_a = R_s \cdot i_a + \frac{d\phi_a}{dt} \quad (\text{III. 1})$$

$$V_b = R_s \cdot i_b + \frac{d\phi_b}{dt} \quad (\text{III. 2})$$

$$V_c = R_s \cdot i_c + \frac{d\phi_c}{dt} \quad (\text{III. 3})$$

i_a, i_b, i_c : courants statoriques .

$[\phi_a, \phi_b, \phi_c]$ vecteur des flux statoriques.

R_s : La résistance des phases statoriques.

III.6.2. Equation mécanique de la machine :

$$C_m - c_{em} - f\Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{III .4})$$

Avec :

C_m : Le couple moteur appliqué sur la génératrice.

$f\Omega$: Le couple de frottement.

J : Moment d'inertie total de la machine

f : coefficient de frottement visqueux.

III.6.3. Equation de la machine à aimants permanents dans le plan de Park

Afin de simplifier l'étude, on utilise la transformation de Park qui est un outil mathématique permettant de transformer les axes magnétiques des bobines statoriques (a,b,c) en axes orthogonaux (d,q). Ce qui se traduit par le remplacement des bobinages statoriques (a,b,c) par des bobinages équivalents (d,q) [10]

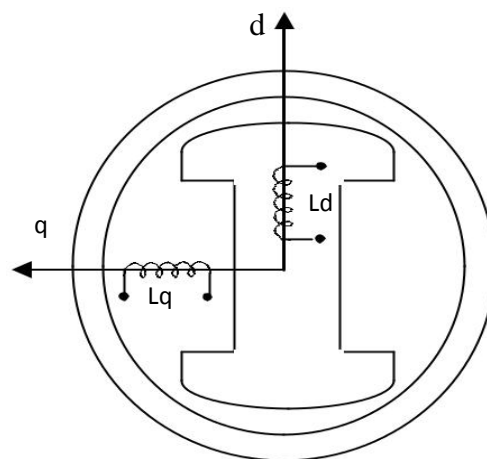


Figure III.5 : Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park

Les deux bobines d et q, tournent avec le rotor, produisant le même effet que les trois bobines fixes. Les variations exprimées dans ce nouveau repère (d, q), nous permettent de passer de repère naturel au repère de Park, et d'avoir ainsi un modèle relativement simple de la machine [1].

Figure III.6 :Passage de park de repère naturel du stator au repère (d,q) de park

La transformation de Park est donnée par :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III } 5)$$

Et inversement, pour passer des équations dans le plan de Park aux équations dans le plan (a, b, c), on utilise la transformation de Park inverse qui est donnée par :

$$P(\theta)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III. } 6)$$

Le changement de variable effectué aux équations des tensions, courants et flux on obtient :

$$[i_{dq}] = p(\theta)[i_{abc}] \tag{III.7}$$

$$[V_{dq}] = p(\theta)[V_{abc}] \tag{III.8}$$

$$[\theta_{dq}] = p(\theta)[\phi_{abc}] \tag{III.9}$$

Les équations de la MSAP dans le repère de park sont données par les expressions suivantes :

$$V_q = R_s \cdot i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + p\Omega_t L_d i_d \tag{III.10}$$

$$V_d = R_s \cdot i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - p\Omega_t L_q i_q \tag{III.11}$$

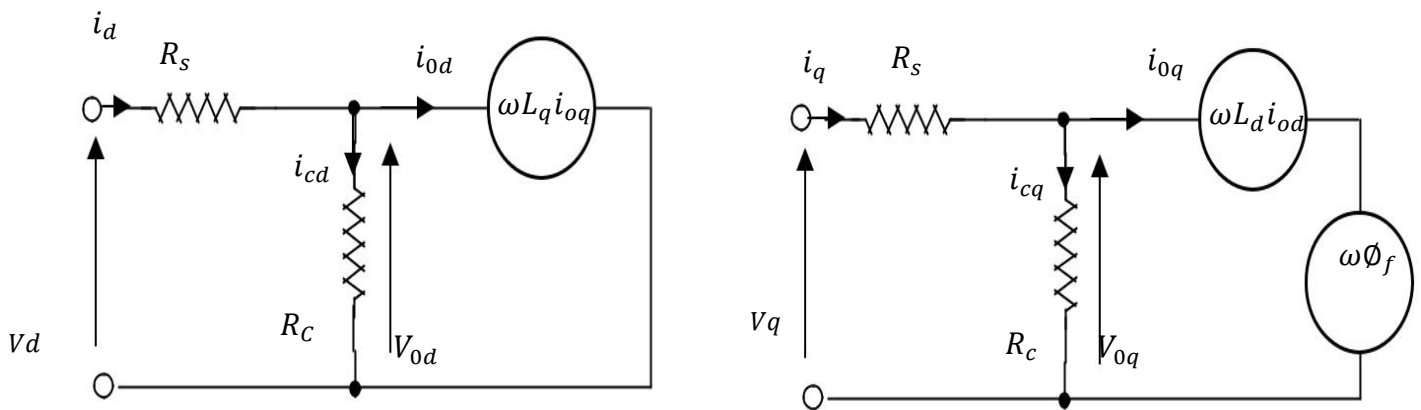


Figure III.7 : Schémas électrique de la MSAP

En utilisant la convention génératrice; on inverse le sens des courant i_d et i_q dans les repères de Park (figure 3-11), et le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents ainsi obtenu peut s'écrire sous la forme :

$$V_d = -R_s \cdot i_d - L_d \frac{di_d}{dt} + \omega L_q i_q \quad (\text{III .12})$$

$$V_q = -R_s \cdot i_q - L_q \frac{di_q}{dt} - \omega L_d i_d + p\omega_r \Phi_f \quad (\text{III .13})$$

III.6.4. Expression du couple électromagnétique

$$C_{em} = \frac{3}{2} p(L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q + \Phi_f i_q \quad (\text{III .14})$$

Où ;

p : le nombre de paires de pôles

V_d : la tension statorique sur l'axe d

V_q : la tension statorique sur l'axe q

i_d : la tension statoriques sur l'axe d

i_q : la tension statorique sur l'axe q

R_s : La résistance statorique

L_d : L'inductance statorique sur l'axe d

L_q : L'inductance statorique sur l'axe q

Φ_f : Le flux inducteur

III.7. Commande vectorielle

Le modèle complet de la chaîne de conversion d'énergie englobe en outre la génératrice synchrone à aimants permanents, redresseur et onduleur couplés par un bus continu commun et un filtre qui assure le couplage au réseau. Ce système est assez complexe pour la génération des lois de commande qui le gère, néanmoins, il suffit de partitionner le système et ainsi suivre le transfert de la puissance de la génératrice jusqu'au réseau.

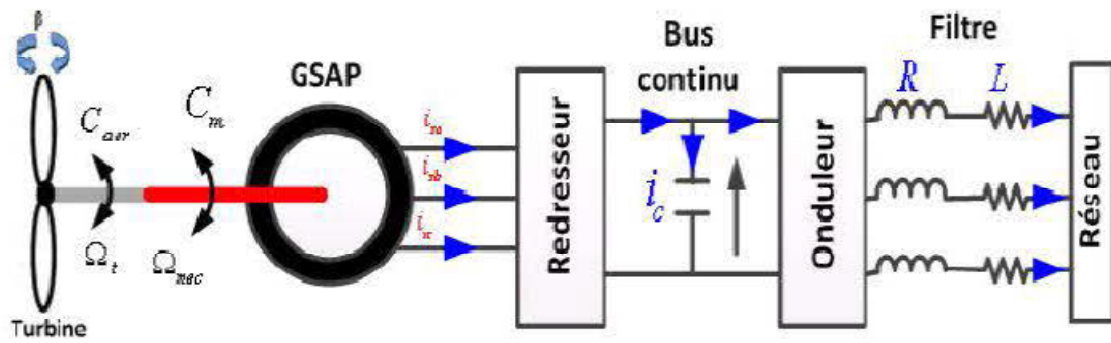


Figure III .8. Le schéma global de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne

III.8. Principe et structure de la commande vectorielle de la génératrice

Le principe de la commande vectorielle est d'orienter le flux du stator pour permettre de contrôler de manière indépendante le couple électromagnétique. La commande la plus fréquemment utilisée consiste à simplifier le contrôle en imposant au courant direct une valeur nulle. Dans ces conditions, la composante en quadrature du courant est une image de couple. Cela permet de simplifier l'expression de couple [14] :

$$C_{em-réf} = \frac{3}{2} p \Phi_f i_{q-réf} \quad (\text{III .15})$$

$$i_{q-réf} = \frac{C_{em-réf}}{\frac{3}{2} p \Phi_f} \quad (\text{III .16})$$

III.8.1. Décomposition des tensions

Les courants i_q et i_d dépendent simultanément des grandeurs d'entrées V_d et V_q .

Nous avons ici un système multi-variable à deux entrées et deux sorties couplées.

Afin de pouvoir mettre en place des commandes mono-variables, nous partons des équations régissant de la GSAP pour découpler le système [14].

Pour découpler l'évolution des courants i_q et i_d par rapport aux commandes, définissons les termes de compensation E_d et E_q tel que :

$$E_d = -p\omega_r l_q i_q \quad (\text{III.17})$$

$$E_q = p\omega_r L_d \cdot i_d + p\omega_r \Phi_f \quad (\text{III.18})$$

$$V_d = -R_s i_d - L_d \frac{di_d}{dt} + p\omega_r L_q i_q \Rightarrow V_d - p\omega_r L_q i_q = -R_s i_d - L_d \frac{di_d}{dt} \quad (\text{III.19})$$

$$E_d = -p\omega_r L_q i_q \quad (\text{III.20})$$

$$V_d^* = -R_s i_d - L_d \frac{di_d}{dt} \quad (\text{III.21})$$

De même pour le tension:

$$V_q = -R_s i_q - L_q \frac{di_q}{dt} - p\omega_r L_d i_d + p\omega_r \Phi_f \Rightarrow$$

$$V_q + p\omega_r L_d i_d - p\omega_r \Phi_f = -R_s i_q - L_q \frac{di_q}{dt} \quad (\text{III.22})$$

$$E_q = -p\omega_r L_d i_d + p\omega_r \Phi_f = p\omega_r \quad (\text{III.23})$$

$$V_q^* = -R_s i_q - L_q \frac{di_q}{dt} \quad (\text{III.24})$$

D'où les nouvelles commandes :

$$V_d^* = V_d - E_d \quad (\text{III.25})$$

$$V_q^* = V_q - E_q \quad (\text{III.26})$$

Avec ces nouvelles entrées V_d^* et V_q^* , nous pouvons définir deux fonctions de transferts mono-variables :

$$\frac{I_d(S)}{V_d^*(S)} = \frac{1}{R_s + L_d \cdot S} \quad (\text{III.27})$$

$$\frac{I_q(S)}{V_q^*(S)} = \frac{1}{R_s + L_q \cdot S} \quad (\text{III.28})$$

III.8.2. Boucle de commande

Pour piloter les deux courants I_d et I_q , il est nécessaire de faire la synthèse de deux

Correcteurs PI, en fournissant la consigne de couple de référence à la boucle I_q .

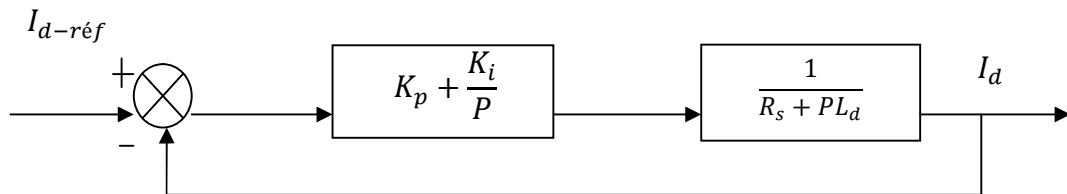


Figure III.9: Boucle de régulation du courant I_d

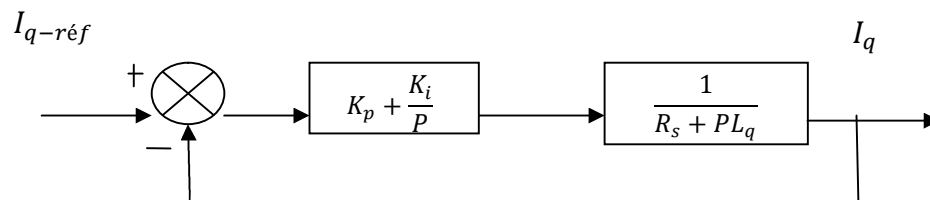


Figure III.10: Boucle de régulation du courant I_q

Les constantes de correcteur PI, K_p et K_i sont identiques pour la boucle de courant de l'axe direct et en quadrature.

III.8.3. Détermination des régulateurs de courants

Les structures des régulateurs sont choisies pour répondre à plusieurs nécessités. Il convient d'abord de régler la machine de façon à imposer à la charge la vitesse ou la position et le couple. Il est également nécessaire d'assurer certaines fonctions supplémentaires. Les plus importantes concernent les protections.

Pour calculer les paramètres des régulateurs, on adopte des modèles linéaires continus. Les méthodes classiques de l'automatique sont utilisables. Ces méthodes ont l'avantage d'être simples et faciles à mettre en œuvre.

On retrouve la même boucle de régulation pour le courant I_q .

La fonction de transfert en boucle ouverte $F_{bo(p)}$ est :

$$F_{op}(S) = \left(K_p + \frac{K_i}{P} \right) \cdot \left(\frac{1}{R_s + PL_d} \right) \quad (\text{III. 29})$$

Compensons le pole $\frac{L_d}{R_s}$ par $\frac{K_p}{K_i}$. Ce qui se traduit par la condition :

$$\frac{K_p}{K_i} = \frac{L_d}{R_s} \quad (\text{III.30})$$

La fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit maintenant :

$$F_{bo} = \frac{K_i}{P \cdot R_s} \quad (\text{III.31})$$

En boucle fermée, nous obtenons un système de type 1er ordre avec une constante de temps:

$$\tau_{bF} = \frac{R_s}{K_i} \quad (\text{III.32})$$

$$F_{bF}(P) = \frac{1}{\frac{R_s}{K_i}P + 1} \quad (\text{III.33})$$

L'action intégrale du PI est obtenue ct:

$$K_i = \frac{R_s}{\tau_{bF}} \quad (\text{III.34})$$

Si l'on choisit le temps de réponse :

$$t_{ref} = 3\tau_{bF} \quad (\text{III.35})$$

On a:

$$K_p = 3 \frac{L_d}{t_{ref}} \quad (\text{III.36})$$

$$K_i = 3 \frac{R_s}{t_{ref}} \quad (\text{III.37})$$

III.9. Contrôle de la puissance de la génératrice

Pour contrôler la puissance électrique de la génératrice P_g , il suffit de contrôler le couple électromagnétique C_{em} , par régulation des courants statorique et de connaître la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice ω_r , le couple électromagnétique de la génératrice peut être élaboré pour un fonctionnement à une puissance fixée, pour limiter la puissance de la génératrice à sa valeur nominale.

La limitation de la puissance se fait par décroissance du couple électromagnétique, qui est inversement proportionnelle à la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice.

$$C_{em-ref} = \frac{P_{g-ref}}{\omega_r} \quad (III.38)$$

III.9.1. Synthèse des Contrôleurs PI du convertisseur de puissance

Le contrôle de la partie électrique du système éolien possède une multitude de boucles de poursuite (ou de régulation) contrôlées par des correcteurs PI. Dans la présente section, nous présentons une méthode analytique, dite de "paramétrage direct" [14], permettant de déterminer les paramètres de tous ces régulateurs. D'autres techniques (plus optimales) sont décrites dans [14] et [9]. Ces dernières permettent par exemple de s'affranchir de la variabilité des paramètres du système par un contrôle adaptatif.

Le schéma général d'une boucle de poursuite est donné à la figure III.11.

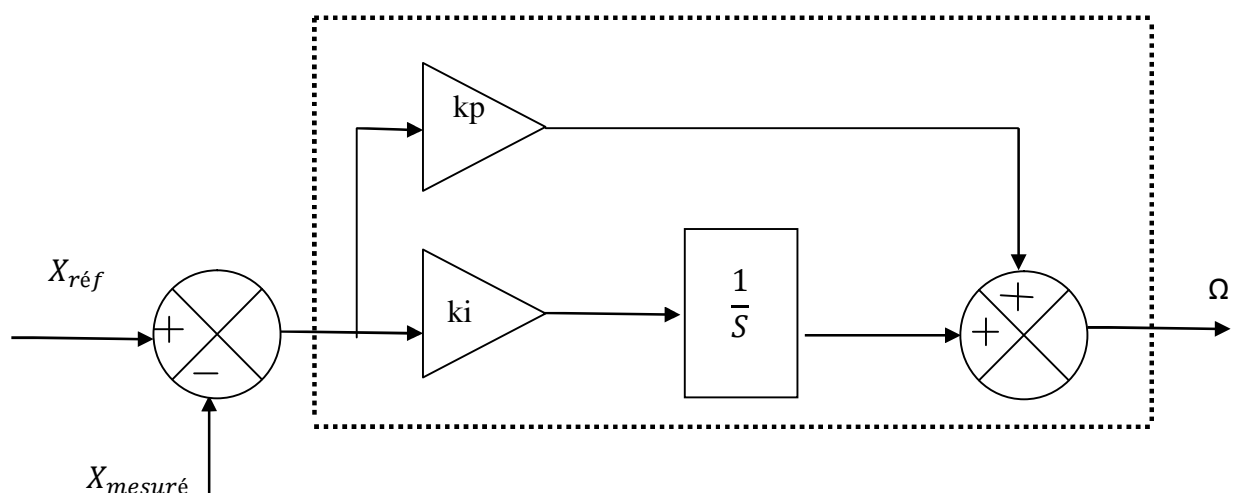


Figure III.11: Schéma bloc du correcteur PI

La forme du correcteur est :

$$C(S) = K_p + \frac{K_i}{p} \quad (\text{III.39})$$

Avec: K_p le gain proportionnel du régulateur, K_i gain du régulateur.

La fonction de transfert associée à ce correcteur est :

$$H(S) = \frac{1}{1+\tau p} \quad (\text{III.40})$$

III. 10. Résultats de simulation

Les figures, ci-dessous, illustrent les différentes grandeurs électriques de la GSAP

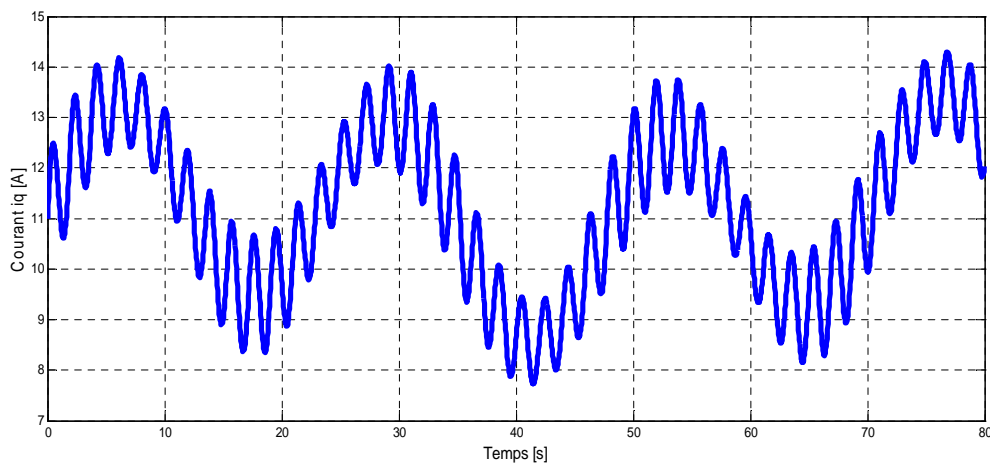


Figure III.12 : Allure du courant i_q

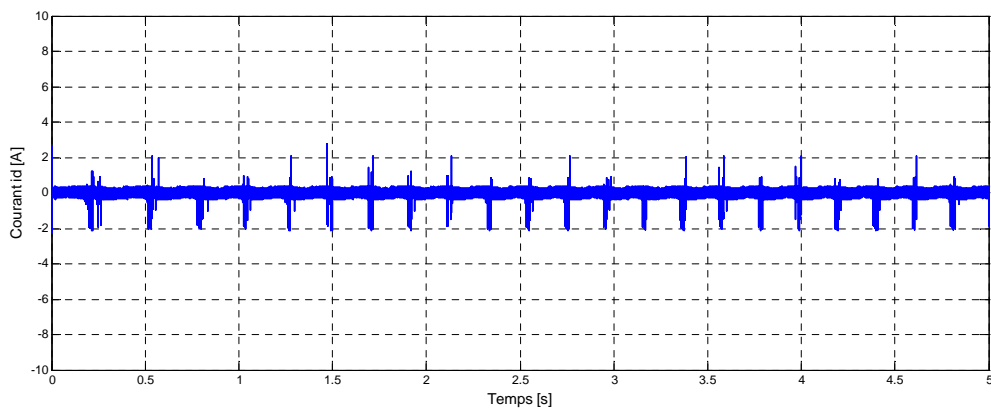


Figure III.13 : Allure du courant i_d

III.10.1. Interprétation de résultats

La figure (III.13) montre un courant i_d porté à zéro grâce à la commande vectorielle appliquée à la machine synchrone. La figure (III.12) la forme de la l'allure du courant i_q presque suit l'application de la transformée inverse de Park aux tensions V_d et V_q permet de tracer l'allure des tensions des phases v_a, v_b, v_c .

III.11. Commande de la puissance active et réactive

Dans cette partie nous proposons une étude développée sur le système de conversion éolienne permettant de produire une puissance constante.

Avec le convertisseur côté de la charge, il est possible de commander les puissances actives et réactives, le système est représenté sur la Figure (III.14).

Les puissances actives et réactives transitées par le réseau sont données dans le modèle de Park par les relations suivantes [14]:

$$P_t = V_d i_d + V_q i_q \quad (\text{III.41})$$

$$Q_t = V_q i_d - V_d i_q \quad (\text{III.42})$$

Par inversion de ces équations il est possible d'appliquer des puissances de référence $P_{réf}$ et $Q_{réf}$ en imposant des courants de référence :

$$i_{d-réf} = \frac{P_{réf} V_d + Q_{réf} V_q}{V_d^2 + V_q^2} \quad (\text{III.43})$$

$$i_{q-réf} = \frac{P_{réf} V_q - Q_{réf} V_d}{V_d^2 + V_q^2} \quad (\text{III.44})$$

L'adaptation de ces équations au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas :

$$V_d = 0 \quad (\text{III.45})$$

$$V_q = V_S \quad (\text{III.46})$$

Après :

$$0 = -R_s i_d - L_d \frac{di_d}{dt} + p\omega_r L_q i_q \quad (\text{III.47})$$

$$V_q = -R_s i_q - L_q \frac{di_q}{dt} - p\omega_r L_d i_d + p\omega_r \Phi_f \quad (\text{III.48})$$

Après supposition, les équations de la machine deviennent:

$$P_s = V_s i_q \quad (\text{III.49})$$

$$Q_s = V_s i_d \quad (\text{III.50})$$

Le schéma fonctionnel est présenté dans la Figure (III.14).

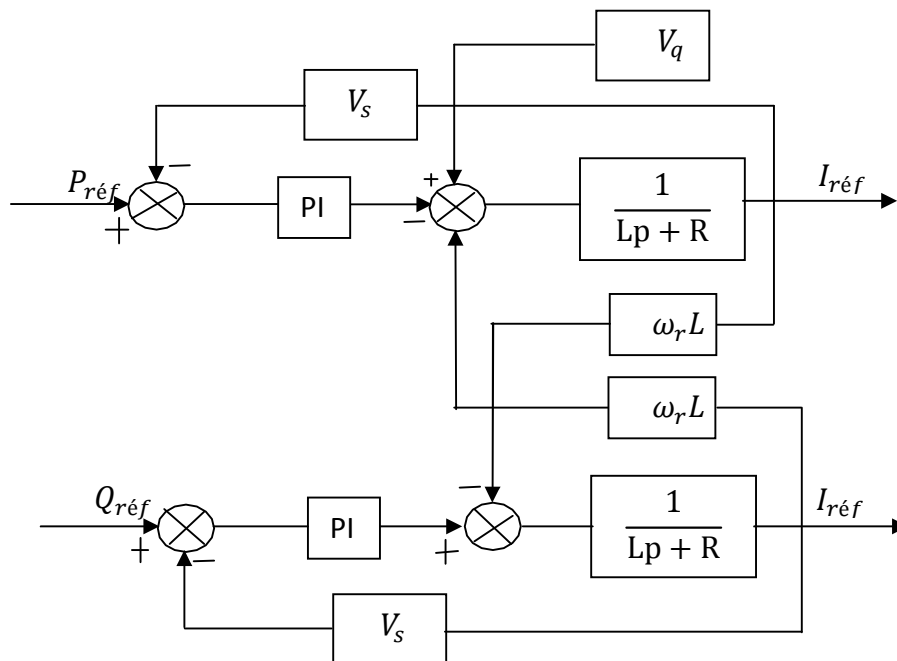


Figure III.14. Schéma fonctionnel de la commande de puissance active et réactive

La synthèse des correcteurs PI pour contrôler la puissance active et réactive est faite analytiquement en utilisant le modèle de Park, dont la forme est rappelée dans les équations précédentes. Considérant la puissance réactive nulle.

III.11.1. Résultats de simulations avec correcteur proportionnel intégral (PI)

Nous avons effectué une commande de puissance active et réactive de la machine par des correcteurs PI, tel que la puissance active de référence $P_{réf}$ est constante et égale à la valeur de la puissance nominale P_n .

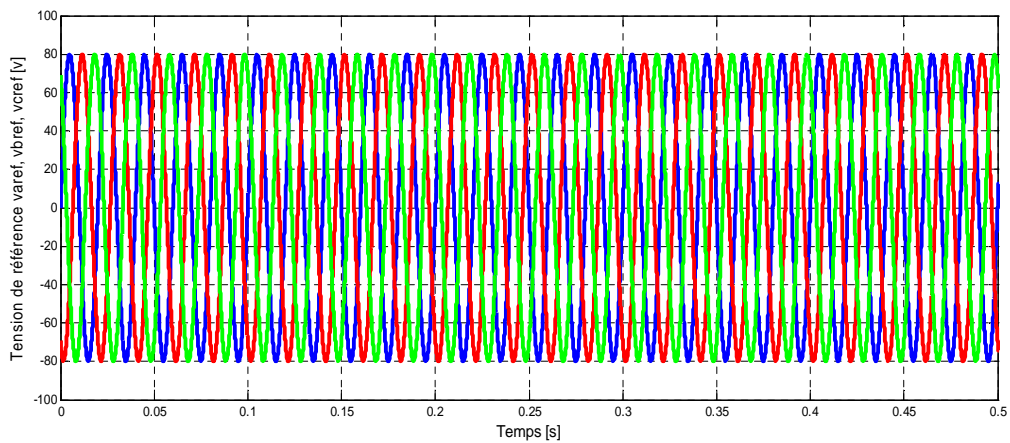


Figure III.15 : Allure de tension de référence

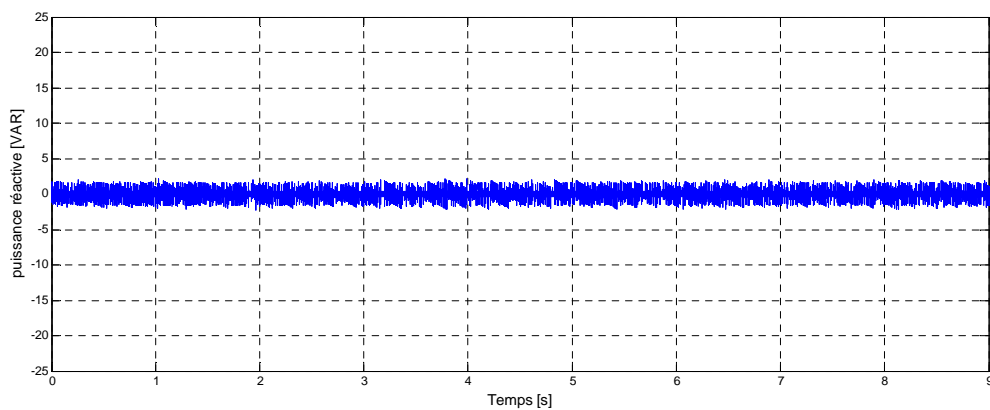


Figure III.16 : Allure de la puissance réactive

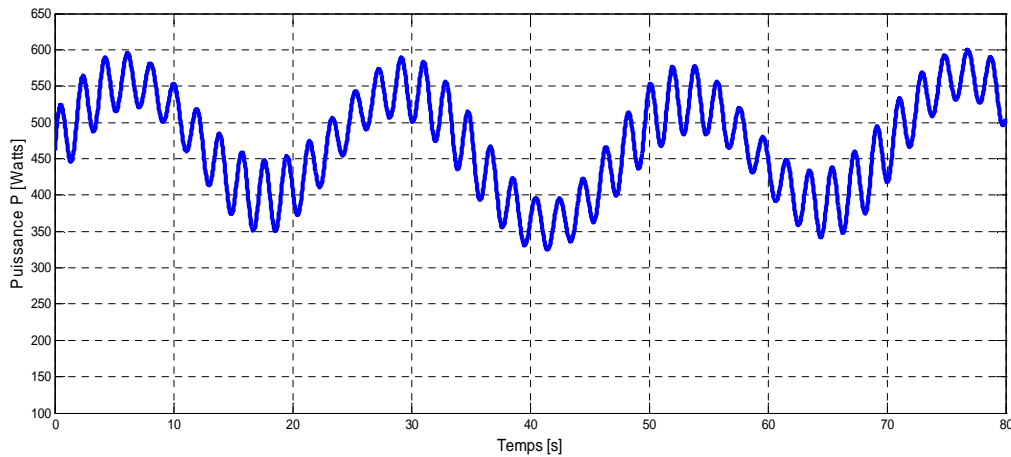


Figure III.17 : Allure de la puissance active

On constate que le courant est de i_q la forme que la puissance active et le courant i_d pratiquement nul et la puissance aussi nul.

La figure (III.14, 15) l'allure de tension des trois phases est de la forme sinusoïdal et d'amplitude

80V.

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation et la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents. Nous avons présenté différentes structures concernant la construction de celle-ci du point de vue emplacement des aimants permanents. Nous avons ensuite présenté les équations régissant son fonctionnement, avec la commande vectorielle qui permet la modélisation d'une génératrice synchrone à aimants permanent.

Dans la deuxième partie de ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation obtenus. Nous avons de cette manière vérifié les conditions de la commande vectorielle à savoir $i_d = 0$.

1 v .1. Introduction

Après avoir transformé l'énergie éolienne en énergie électrique, il est nécessaire de l'adapter à la charge qu'elle alimente ou le réseau au quel est connecté notre système de production, car les éoliennes sont considérées comme des génératrices de puissance variable. Connectées sur un réseau électrique, les générateurs éoliens n'imposent pas l'amplitude de la tension et ne règlent pas le rapport puissance -fréquence, autrement dit, elles ne participent pas aux services systèmes, et donc perturbent d'autant plus la stabilité des réseaux que leur taux de pénétration est important [15].

Avec l'utilisation de l'électronique de puissance, de nouvelles technologies sont apparues pour optimiser cette génération d'énergie.

IV.2.La commande MLI

Le principe de la technique de modulation de largeur d'impulsion est basé sur la comparaison d'un signal dit la modulante et un autre dit la porteuse.

La technique choisie pour la commande de nos convertisseurs est la M.L.I sinus-triangle car elle permet d'éliminer les harmoniques et l'obtention d'un bon rendement. Elle est basée sur la comparaison d'un signal triangulaire de grande fréquence et d'un signal sinusoïdal de la même fréquence que le signal de référence que l'on souhaite obtenir. Le signal triangulaire est appelé la Porteuse et le signal sinusoïdal est appelé la Modulante.

Ces signaux ont les propriétés suivantes :

- La modulante est une onde sinusoïdale $v_{réf}(t)$ d'amplitude u_r et de fréquence f_r .
- La porteuse est une onde triangulaire ou en dents de scie $r_p(t)$, d'amplitude $|u_p| \geq |u_r|$, et d'une fréquence $f_p \gg f_r$.
- L'indice de modulation $m = f_p/f_r$
- Le coefficient de réglage en tension r , qui est égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à celle de la porteuse $= \frac{u_r}{u_p}$.

Le principe de cette commande est que la valeur de la fonction F qui correspond à la première cellule de commutation soit égale à 1 si $u_p \geq u_r$ sinon elle prend la valeur zéro.

IV.3. Modèle du redresseur MLI

Avant de modéliser le redresseur à MLI, il est utile de rappeler qu'un redresseur est un convertisseur statique. Il sert comme son nom l'indique à redresser un signal alternatif et le transformer en un signal continu.

Pour l'étude de l'ensemble (génératrice - redresseur MLI – onduleur - charge), on s'intéressera uniquement au comportement dynamique des variables électriques et mécaniques de la machine [16].

Afin de faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation, on modélise le redresseur par un ensemble d'interrupteurs idéaux: c'est-à-dire résistance nulle à l'état passant, résistance infinie à l'état bloqué, réaction instantanée aux signaux de commande (pas d'empiètement).

Le redresseur à MLI est composé de six bras, dont chacun comporte deux cellules de commutation constituées d'une diode et d'un transistor en antiparallèle. Cette structure permet de passer le courant dans les deux sens.

Contrairement à un redresseur à diodes qui fournit une valeur de la tension égale à celle de la tension redressée (interrupteurs idéaux), le redresseur à MLI doit fournir une tension constante quelque soit la tension produite par la génératrice [15].

Pour le modèle dynamique du système, on va diviser l'étude du convertisseur en trois parties: le côté alternatif, la partie discontinue composée par les interrupteurs, et le côté continu. Dans ce contexte, la fonction des interrupteurs est d'établir une liaison entre le côté alternatif et le bus continu. Ces interrupteurs étant complémentaires, leur état est défini par la fonction suivante :

$$S_j = \begin{cases} +1 & , si \ i_j = -I \\ -1 & , si \ i_j = +I \end{cases} \quad (IV.1)$$

$$j \in \{a, b, c\}$$

Les tensions de phase d'entrée et le courant de sortie peuvent être écrits en fonction des fonctions S_j , de la tension redressée U_{dc} et les courants d'entrée i_a, i_b, i_c .

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (IV.2)$$

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

$$U_{Sab} = (S_a - S_b).U_{dc} \quad (\text{IV.3})$$

$$U_{Sbc} = (S_b - S_c).U_{dc} \quad (\text{IV.4})$$

$$U_{Sca} = (S_c - S_a).U_{dc} \quad (\text{IV.5})$$

IV.4 Modélisation de bus continu

L'évolution temporelle de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif. La capacité joue le rôle de réservoir lors de l'échange d'énergie et permet de limiter l'ondulation de la tension du bus DC : [43]

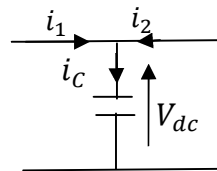


Figure. IV.1.Schéma du bus continu

$$\frac{dv_C(t)}{dt} = \frac{1}{C} i_C(t) \quad (\text{IV.6})$$

$$i_C = i_1 + i_2 \quad (\text{IV.7})$$

C : est la capacité totale du bus continu.

i_1 : Le courant redressé

i_2 : Le courant ondulé

i_C :Le courant de charge du condensateur

Avec

$$V_c = \frac{1}{C} \int_{t_2}^{t_1} i_C dt + V_{CO} \quad (\text{IV.8})$$

V_{CO} : La valeur de la tension à l'instant initial $t=0$

Vu les fluctuations de puissance fournie par la génératrice .Un réglage de la tension du bus continu s'impose via une boucle de régulation avec un correcteur proportionnel intégral.

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

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.9})$$

Avec :

$$v_{sa} = \frac{2S_a - S_b - S_c}{3} \cdot U_C \quad (\text{IV.10})$$

$$v_{sb} = \frac{2S_b - S_a - S_c}{3} \cdot U_C \quad (\text{IV.11})$$

$$v_{sc} = \frac{2S_c - S_a - S_b}{3} \cdot U_C \quad (\text{IV.12})$$

Les équations précédentes dans les coordonnées dq sont :

$$e_d = R i_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega_s L i_q + U_{sd} \quad (\text{IV.13})$$

$$e_q = R i_q + L \frac{di_q}{dt} - \omega_s \cdot L + U_{sq} \quad (\text{IV.14})$$

Finalement, on déduit l'équation de couplage entre cote alternatif en fonction découplage des fonctions d'état des interrupteurs par :

$$C \frac{dU_C}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_l \quad (\text{IV.15})$$

i_l : Le courant de charge du redresseur

En appliquant la transformation de park (V 12) on aboutit a la relation (IV 13).

$$C \frac{dU_C}{dt} = S_a \cdot P \cdot S_a + S_b \cdot P \cdot S_b + S_c \cdot P \cdot S_c - i_l \quad (\text{IV.16})$$

$$C \frac{dU_C}{dt} = S_d i_d + S_q i_q - i_l \quad (\text{IV.17})$$

Tout calcul fait .On obtient les relations :

$$S_d = \frac{1}{\sqrt{6}} (2S_a - S_b - S_c) \cos(\omega_s t) + \frac{1}{\sqrt{2}} (S_b - S_c) \sin(\omega_s t) \quad (\text{IV.18})$$

$$S_q = \frac{1}{\sqrt{2}} (S_b - S_c) \cos(\omega_s t) + \frac{1}{\sqrt{2}} (2S_a - S_b - S_c) \sin(\omega_s t) \quad (\text{IV.19})$$

IV.5 Modélisation de l'onduleur

Un onduleur est un convertisseur statique qui permet de transformer un signal d'entrée continu en un signal de sortie alternatif. Il a la même structure que le redresseur à MLI.

La commande des états passant et bloqué des transistors permet d'obtenir une tension alternative caractérisée par la fréquence nécessaire pour la charge alimentée. Le signal de commande de ces derniers est fourni par la commande MLI [15].

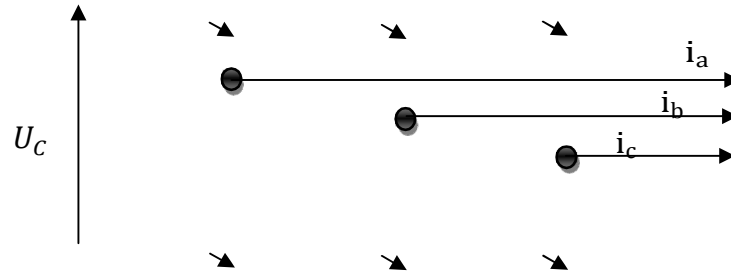


Figure IV.2 : Le schéma global d'un onduleur à MLI

Soit les fonctions, F_1, F_2, F_3 qui représentent l'état des interrupteurs $K_1, K_2,$

K_3 La loi des mailles permet d'obtenir les tensions composées entre phases

$$U_{AB} = (F_1 - F_2) \quad (\text{IV.20})$$

$$U_{BC} = (F_2 - F_3) \quad (\text{IV.21})$$

$$U_{CA} = (F_3 - F_1) \quad (\text{IV.22})$$

Si on suppose la charge équilibrée, les tensions simples forment un système triphasé équilibré

$$V_{SA} + V_{SB} + V_{SC} = 0 \quad (\text{IV.23})$$

En combinant les équations (IV.14), (IV.15), (IV.16), on obtient la relation

$$\begin{bmatrix} V_{SA} \\ V_{SB} \\ V_{SC} \end{bmatrix} = \frac{V_c}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.24})$$

IV.6. Résultats de simulation

On a effectué dans un premier temps des simulations où les tensions de référence injectées au redresseur à MLI sont de forme sinusoïdale dans le but de tester le fonctionnement de celui-ci ainsi que de l'onduleur à MLI.

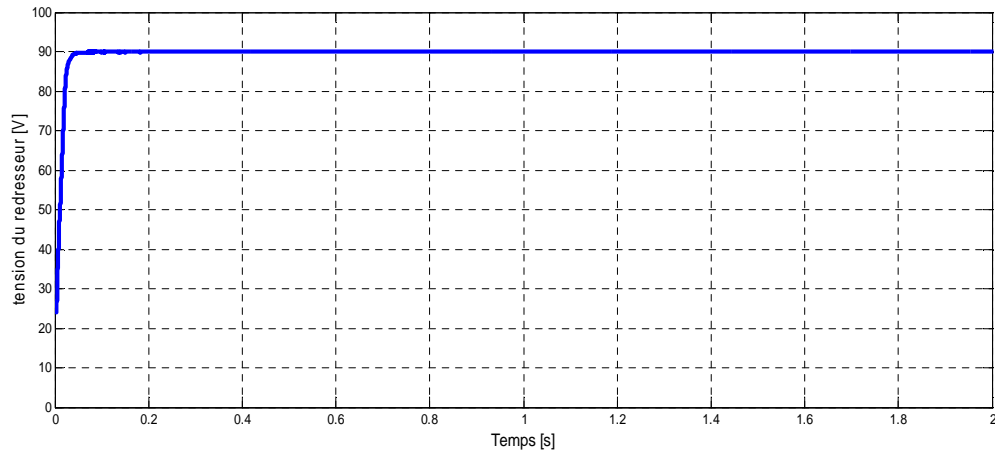


Figure IV.3 : Allure de la tension redressée

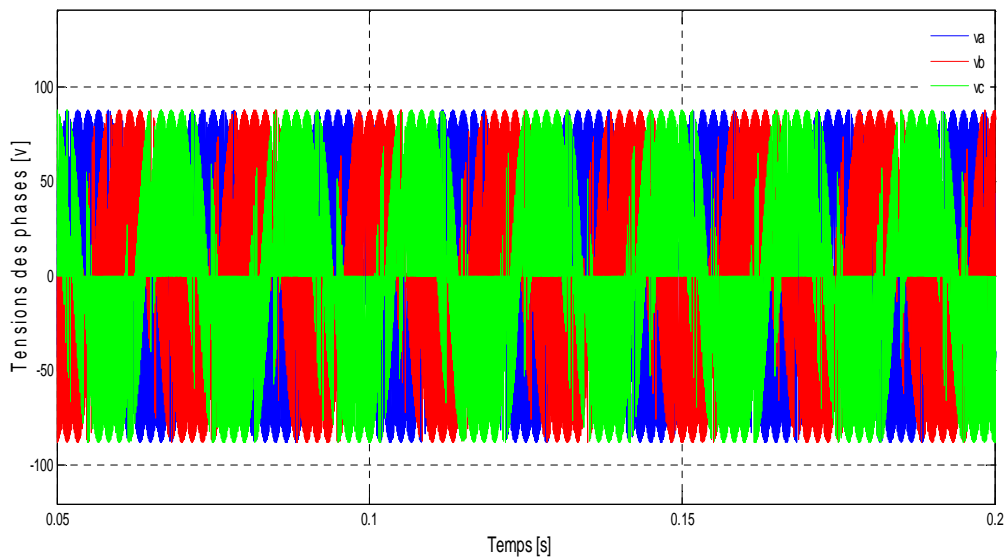


Figure IV.4 : Allure de la tension des trois phases

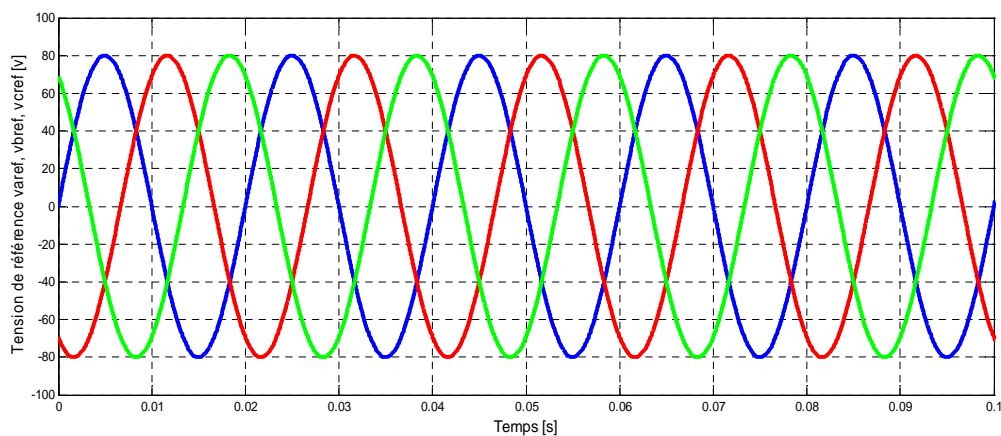


Figure IV.5 : Allure de la tension de référence

D'après la figure IV.3 on voit bien que la tension d'alimentation du redresseur est parfaitement redressée à la sortie de celui-ci. La figure IV.5 montre que la l'allure des trois phases de tension de référence est de forme sinusoïdal de l'amplitude 80V.

Conclusion

Après avoir modélisé le redresseur à MLI et expliqué son principe de fonctionnement, nous avons modélisé également l'onduleur de puissance.

Cette modélisation vient compléter la chaîne de production déjà étudiée. En suite nous avons procédé à différentes simulations pour voir le comportement des convertisseurs statiques utilisés et l'efficacité de leur commande.

convertisseur statique. Il sert comme son nom l'indique à redresser un signal alternatif et le transformer en un signal continu.

Pour l'étude de l'ensemble (génératrice - redresseur MLI – onduleur - charge), on s'intéressera uniquement au comportement dynamique des variables électriques et mécanique.

Afin de faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation, on modélise le redresseur par un ensemble d'interrupteurs idéaux: c'est-à-dire résistance nulle à l'état passant, résistance infinie à l'état bloqué, réaction instantanée aux signaux de commande (pas d'empiètement).

Le redresseur à MLI est composé de six bras, dont chacun comporte deux cellules de commutation constituées d'une diode et d'un transistor en antiparallèle. Cette structure permet de passer le courant dans les deux sens.

Contrairement à un redresseur à diodes qui fournit une valeur de la tension égale à celle de la tension redressée (interrupteurs idéaux), le redresseur à MLI doit fournir une tension constante quelque soit la tension produite par la génératrice.

Dans le cadre de la réalisation du mémoire de master, nous avons choisi de travailler sur le thème de la production et conversion de l'énergie éolienne. Cela, nous avons pris pour objectif l'étude et la simulation d'une chaîne de conversion éolienne constituée d'une turbine de moyenne puissance associées à une génératrice synchrone à aimants permanents. Cet ensemble de conversion de l'énergie éolienne est complété par un dispositif d'électronique de puissance afin de transmettre l'énergie électrique produite vers le réseau ou la charge à alimenter. Cette étude est complétée par la mise en place des stratégies de commande nécessaires au bon fonctionnement de chaque partie.

Le premier chapitre a traité des généralités sur l'énergie éolienne en rendant compte de l'état actuel de l'exploitation mondiale de ce réseau énergétique. Puis nous avons parlé des différents types d'éoliennes existant avec leurs différentes structures à savoir les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal. Nous avons également traité les lois fondamentales permettant la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. Puis la comparaison entre les différentes machines utilisées dans ce domaine nous a permis de choisir de porter notre étude sur un système basé sur une machine synchrone à aimants permanents MSAP.

Dans le deuxième chapitre, nous avons modélisé le vent qui est la source principale d'énergie pour ensuite modélisé la turbine éolienne sur laquelle se base notre étude, de sorte à ce que le coefficient de puissance soit toujours optimal quelques soient les variations du vent qui sont été effectuée, en effet ,afin de garder la vitesse spécifique (λ) constante . La vitesse du rotor doit suivre exactement la turbulence du vent, ce qui nécessite une variation rapide et des amplitudes importantes de la vitesse de la turbine et par conséquent l'augmentation des efforts de commande .Avec quelques résultats de simulation ont été ensuite donnés.

Le chapitre trois a été consacré à la génératrice synchrone à aimants permanents. Nous avons donné des exemples sur des machines différentes du point de vue structurel avant de donner des équations électriques, magnétiques et mécaniques régissant la MSAP. L'écriture de ces équations dans le repère de Park a été exploitée pour effectuer la commande vectorielle qui permet d'assimiler la MSAP à une machine à courant continu à excitation pour faciliter son étude et notamment sa simulation sous Matlab-Simulink. Ensuite nous avons abordé le problème liée à la puissance électrique produite par la génératrice grâce à son entraînement par le vent. Nous avons abordé à des stratégies de commande permettant d'atteindre plusieurs objectifs concernant la puissance active constante, puis variable et une commande de puissance réactive égal à zéro.

La technique et les stratégies de cette commande que nous avons développées ont montré de meilleures performances par le fait, qu'elles permettent une prise en compte de l'aspect dynamique de l'éolienne, du non linéarité de son aérodynamique et la nature turbulente du vent.

Enfin le dernier chapitre à été réservé à l'étude du redresseur à MLI par la présentation de sa structure, son fonctionnement, ainsi que sa commande à MLI. Cette structure particulière du redresseur nous a permis d'avoir une tension parfaitement redressée quelque soient les fluctuations du vent. L'onduleur à MLI a la même structure que celle du redresseur étudié et nous a permis d'obtenir des tensions de phases de la fréquence désirée.

Cette commande a pour principaux objectifs de maximiser l'énergie capturé du vent et de minimiser les efforts subis par le dispositif d'entraînement d'ou le rotor fournit une puissance aérodynamique maximale uniquement à la vitesse spécifique.

L'objectif principal de ce travail présenté dans ce mémoire consistait à identifier la stratégie de commande permettant de répondre au mieux à des exigences spécifique de l'énergie.

Bibliographie

- [1] : messaoud :commande flau de MSAP utilisée dans un système éolièn.
- [2] : Perspectives d'off d'énergie technique de l'ingénieur BE_8_515_2005.
- [3]: Prof-DR.MANFFRED , Wind energy systemes-for electric power generation ».
- [4] : P_Leconte,M rapin,E_szechenyi »Eoliennes » technique de l'ingenieur,BM4646.
- [5] : L.le derco#apport de stockage inertiel assoie à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes ».thèse de doctorat de l'université de lille n° d'ordre :3563,EFRR IEEEA décembre 2004.
- [6] : Nakata T, Takahachi N, « Numerical Analysis of Transient Magnetic Field in a Capacitor Disharge Impulse Magnetizer, WEB Trans, on Magn Vol. MAO-22 ?n.5,pp.526-528 Septembre 1986.
- [7] : V. Courtesuisse, << Supervision d'une centrale multisources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique >>, Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Ecole Nationale d'Arts et Métiers, 2008
- [8]: J.S.Lai,F.2.Peny e multiel converter_ A new breed of power convertes » IEEE Transaction on industry application.
- [9] : S.EL Aimai » modélisation de different technologies d'éoliennes integrées dans un résau de moyenne tension » thèse de doctorat de l'école de lille(ECL),2005.
- [10]: J.marques,H,pinherio,H.A,caidling J.R.pinhero and H.LHey#Asary on variable_speed wind turbine système ».
- [11]: J-C.sabonnadiers,e .modeling of the wind turbine with a permanent magnet synchron ous generator for integration.

Bibliographie

[12] : NICOLAS # sur l'integration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles Electricite, Université Henri Poincaré ,Nancy I ,2006.

[13]: B.Singh,B ,S,DWIVEDI « Astate of art on different configurations of permanent magnet Brushless Machines »

[14] : Toufik ZIDEMAL.EXIGENCE PARTIELLE de la maitrise en ingénierie-avril 2015.

[15] : Samira Hamcha mémoire de magister <<Etude et commande d'une éolienne à base d'une MSAP

[16] : J. Larouche, << Cours et exercices corrigés >>, Livre de l'électronique de puissance et des convertisseurs, Lycée E. Belin de Visoul 2003.

Bibliographie

ANNEXE

Paramètres de simulation

Paramètres de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents

Élément de la chaîne de Conversion éolienne	Valeur numérique	Signification
Turbine éolienne	$\rho=1,2$	Masse volumique de l'air (Kg/m^3)
	$R= 2$	Rayon de l'éolienne (m)
	$H=2$	Hauteur de la turbine (m)
	$S=2$	Surface active (m^2)
	$\lambda_{opt}=7,07$	Vitesse réduite optimale
	$C_p=035$	Coefficient de puissance optimale
Générateur synchrone A aimants permanents	$P=600$	Puissance nominale (w)
	$R_s=1,137$	Résistance statorique (Ω)
	$L_d=2,7$	Inductance statorique selon l'axe d (mH)
	$L_q=2,7$	Inductance statorique selon l'axe q (mH)
	$f = 0.15$	Flux des aimants permanents (Wb)
	$P=17$	Nombre de paires de pôles
	$J=00.16$	Inertie de l'ensemble turbine et génératrice ($Kg.m^2$)