

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

UNIVERSITE d'ADRAR
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MATIERE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE en vue de l'obtention du diplôme de
MASTER en PHYSIQUE ENERGETIQUE

Thème

**Modélisation et simulation d'un système éolien basé
sur la machine asynchrone à double alimentation**

Soutenu le : 04 Juin 2014

Présenté par :

GASMI Mohammed

MEDIANI Abdelkader

Membres de jury :

Président :

Pr. BENATIALLAH Ali Univ. d'ADRAR

Promoteur :

Mr .HARROUZ Abdelkader Univ. d'ADRAR

Examineurs

Mr. GUENFOUD Mohammed Univ. d'ADRAR

REMERCIEMENTS

On tient surtout à assurer notre sincère reconnaissance, notre plus grand respect et notre totale gratitude à Mr. HARROUZ Abdelkader, maître assistant classe B à l'université d'Adrar, et Directeur de notre mémoire, pour tous les efforts, l'aide, le soutien et les encouragements qu'il a montré tout au long de ce travail et aussi pour tant de compréhension, et disponibilité dont il a fait preuve.

C'est un honneur pour nous que Mr. Ali BENATIALLAH Professeur à l'Université d'Adrar ait accepté de participer à ce jury d'en assumer la tâche de président. Mr. Mohammed GUENFOUD Maître assistant classe A de l'université d'Adrar, nous font l'honneur de participer au jury, de juger notre travail, le commenter et l'enrichir par leurs remarques, nous en sommes profondément reconnaissant.

Nos sincères gratitudes à nos collègues et tous nos amis. En fin, on garde notre dernière pensée pour nos familles, nos frères et nos sœurs, ainsi que tous nos proches.

MEDIANI AEK

GASSMI MED

Notation et symboles

Abréviations

MADA : Machine asynchrone à double alimentation.

GADA : Génératrice asynchrone à double alimentation.

PI : Proportionnel Intégral.

Indices

A,b,c : l'ordre du système triphasé.

s,r : Stator et Rotor.

d,q : Système biphasé lié au champ tournant.

Symboles

g : Glissement.

n_p : Nombre de paires de pôles.

V : Tension instantanée.

F : Fréquence.

Φ : Flux.

Ω : La vitesse de rotation.

ω_s, ω_r : Pulsation d'alimentation statorique et rotorique.

R_s, R_r : Résistances statorique et rotorique.

P : Puissance active.

Q : Puissance réactive.

C_{em} : Couple électromagnétique.

C_r : Couple résistant.

C_f : Couple de frottement

θ : Angle entre l'axe de la phase du premier enroulement statorique et l'axe du rotor.

θ_s : Angle entre l'axe de la première phase de l' enroulement statorique et l'axe d.

θ_r : Angle entre l'axe de la première phase du rotor et l'axe d.

J : Moment d'inertie.

m : Indice de modulation.

r : Taux de modulation.

f_p : Fréquence de la porteuse.

f : Coefficient de frottement.

S : Opérateur de Laplace.

K_p : Composante proportionnelle du correcteur PI,

K_i : Composante intégrale du correcteur PI,

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.

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

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

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

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

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I-1: Principe du premier moulin à vent persan à axe vertical.....	4
Figure I-2: Un ancien moulin à vent antique dans les îles britanniques	5
Figure I-3: Effet du vent sur un corps creus	11
Figure I-4: Différents types de rotor de Savonius.....	11
Figure I-5: Principe de l'incidence variable.....	12
Figure I-6: Différents types de rotor Darrieus.	13
Figure I-7: Capteurs à axe horizontal.....	14
Figure I-8: Eolienne multipale	15
Figure I-9: Eolienne rapide	16
Figure I-10: Les composants essentiels d'une éolienne.....	16
Figure I-11: Rotor d'une éolienne.....	18
Figure I-12: Éléments d'une nacelle.	20
Figure I-13: Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage	23
Figure I-14: Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable.....	23
Figure I-15: MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée	25
Figure I-16: MADA structure Kramer	26
Figure I-17: Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.....	26
Figure I-18: Principe de fonctionnement du cycloconvertisseur.	27
Figure I-19: Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.....	28

CHAPITRE II

Figure II-1: Représentation schématique d'une machine asynchrone double alimentée.....	31
Figure II-2: Principe du rotor bobiné.....	31
Figure II-3: Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone	32
Figure II-4: Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone	33
Figure II-5: Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone	33
Figure II-6: Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone	34
Figure II-7: Représentation de la Machine asynchrone à double alimentation	36
Figure II-8: Passage du triphasé au biphasé	39
Figure II-9: Schéma bloc de la MADA.	44
Figure II-10: Représentation du filtre.	45
Figure II-11: Schéma de l'onduleur associé à une charge triphasée	46

CHAPITRE III

Figure III-1: Modèle mécanique simplifié de la turbine.....	51
Figure III-2: Différents profils de vent	52
Figure III-3: Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine (λ) pour une éolienne de 1.5 MW	53
Figure III-4: Schéma bloc du modèle de la turbine.	54
Figure III-5: Principe de la commande à MLI (stratégie triangulo -sinusoïdale).....	55
Figure III-6: Schéma de principe d'un onduleur à MLI alimentant une GADA.....	57
Figure III-7: Résultats de simulation de la GADA Alimentée par un onduleur tension.	60

Sommaire

I.Introduction générale	1
Chapitre I : L'état de l'art du système éolien	
I.1 Introduction	3
I.2 Historique d'énergie éolienne	3
I.3 Avantages et désavantages de l'énergie éolienne	6
I.3.1 Les avantages	6
I.3.1 Les deavantages	8
I.4 Définition d'une éolienne	8
I.5 Type d'éoliennes	10
I.5.1 Les éoliennes à axe vertical	10
I.5.2 Les éoliennes à axe horizontal	13
I.6 Description d'une éolienne	16
I.7 Fonctionnement d'une éolienne	20
I.8 Parcs éoliens	23
I.9 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne	22
I.9.1 Machines asynchrones à cage (MAS).....	22
I.9.2 Machines asynchrones à double alimentation (MADA) (<i>rotor bobiné</i>).....	24
I.9.2.1 Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée.....	25
I.9.2.2 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer.....	25
I.9.2.3 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.....	26
I.9.2.4 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec convertisseurs MLI	27
I.10 Conclusion	29

Chapitre II : Modélisation et présentation de la machine asynchrone à double alimentation

II.1 introduction	30
II.2 Structure de la machine	31
II.3 Modes de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation	32
II.3.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone	32
II.3.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone	32
II.3.3 Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone	33
II.3.4 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.....	34
II.4 Avantages et inconvénients de la MADA	34
II.5 Modèle dynamique d'une machine asynchrone à double alimentation dans le plan ABC	36
II.5.1 Hypothèses simplificatrices de la modélisation.....	36
II.5.2 Equations électriques de la machine	37
II.5.3 Equations mécaniques de la machine	39
II.6 Modèle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans le plan DQ	39
II.6.1 La transformation de Park.....	39
II.6.2 Matrices de passage.....	40
II.6.3 Equations des tensions	40
II.6.4 Choix du référentiel	41
II.6.5 Equations des flux	42
II.6.6 Equations des courants	42
II.7 Mise sous forme d'équations d'état	43
Schéma bloc de la MADA	44
II.8 Modélisation de l'alimentation de la GADA	45
II.8.1 Modélisation du filtre	45
II.8.2 Modélisation de l'onduleur de tension	46
II.9 Conclusion	48

Chapitre III : Modélisation et simulation du système éolien	
III.1 Introduction	50
III.2 Modélisation de la turbine éolienne	50
III.2.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine	50
III.2.2 Modélisation de la vitesse du vent	51
III.2.3 Modélisation de la turbine	52
III.2.4 Modèle du multiplicateur	53
III.2.5 Equation dynamique de l'arbre de la génératrice	54
III.3 La stratégie de commande par MLI (triangulo-sinusoidale)	55
a) Equation de la porteuse	55
a) Equations de la référence	56
Caractéristiques de la MLI	56
a) Indice de modulation M	56
b) Taux de modulation T_M	56
III.4 Concept et modélisation	57
III.5 Simulation et interprétation	58
III.6 Conclusion	61
Conclusion générale	62
annexe	63
Les references	64

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

La puissance du vent a été utilisée pendant au moins les 3000 dernières années. Jusqu'au début du 20ème siècle l'énergie éolienne a été utilisée comme moyenne de fournir la transmission mécanique de pomper l'eau ou de rectifier le grain. Au début de l'industrialisation moderne, l'utilisation de la ressource énergétique de fluctuation éolienne a été substituée par les moteurs mis le feu de combustible fossile, qui ont fourni une source d'énergie plus cohérente. [17] [09]

La population globale augmente jour après jour. La croissance démographique est plus rapide dans les pays en voie de développement que les pays industrialisés. En raison de cette croissance démographique et activités développementales, la demande énergétique augmente également. Pendant les dernières années, l'utilisation d'énergie primaire dans les pays industrialisés a augmenté à un taux de 1.5 pour cent par an. Le changement correspondant des pays en voie de développement était de 3.2 pour cent. Avec cette tendance, la demande énergétique globale augmenterait considérablement dans les années prochaines. Les futures projections indiquent que tout le approvisionnement en énergie primaire devrait être augmenté (pendant la dernière décennie du 20ème siècle, la capacité mondiale de vent a doublé approximativement tous les 3 ans). [1] [17]

En outre, les énergies classiques "non renouvelables" (le charbon, le pétrole, le gaz naturel...) sont polluantes et aussi nous ne pouvons pas construire notre avenir comme si nous avions du pétrole et de gaz pour toujours le contexte dramatique des "chocs pétroliers" des années 1970 l'approuvé et ces combustibles fossiles sont les ressources finies et seront complètement épuisés pendant un jour ou l'autre. [4] [1]

Le changement climatique et la raréfaction des ressources traditionnelles sont maintenant bien présents dans tous les esprits. Il est nécessaire de changer nos habitudes et de mettre en avant toutes les démarches vertueuses pour inverser les tendances.

Dans le domaine de l'énergie, les économies sont bien entendu indispensables, mais les sources d'énergies renouvelables devront également connaître une croissance sans précédent dans les prochaines décennies.

En particulier, parmi toutes les ressources possibles (biomasse, soleil, vent, houle, etc.), l'énergie éolienne est aujourd'hui la plus accessible en termes de technologie et de

coûts. Elle est donc tout naturellement appelée à prendre une place importante dans le « mix » énergétique mondial. [18]

Au début des années 70, avec le premier choc pétrolier, l'intérêt pour la puissance du vent a réapparu. Cette fois, cependant, le foyer principal était sur l'énergie éolienne fournissant l'énergie électrique au lieu de l'énergie mécanique. De cette façon, il est devenu possible de fournir une source d'énergie fiable et cohérente en employant d'autres technologies d'énergie.

Les premières turbines de vent pour la production d'électricité avaient été déjà développées au début du 20ème siècle. La technologie a été améliorée point par point depuis le début des années 70. Vers la fin des années 90, l'énergie éolienne a réapparu en tant qu'une des ressources énergétiques soutenables les plus importantes. [17]

C'est donc dans ce contexte nous allons développer notre étude à travers les chapitres suivants :

Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art on insiste sur l'histoire de l'éolienne, ses différents types, sa description et sa fonctionnement.

En suite, dans le deuxième chapitre, on va présenter et modéliser la machine asynchrone à double alimentation (MADA), on commence par la structure de la machine, puis les modes de fonctionnement de la MADA et Modèle dynamique d'une machine asynchrone à double alimentation dans le plan ABC.

Puis en troisième chapitre en fait la modélisation du système globale contient le modèle de vent, le modèle de turbine, et le modèle de multiplicateur, et en fin la simulation et interprétation de ce système.

Finalement, on terminera ce mémoire par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et expose quelques perspectives de recherche envisagées.

CHAPITRE I

L'état de l'art du système éolien

I.1 Introduction

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes (P.W.Carlin). Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.[13]

I.2 Historique d'énergie éolienne

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2000 ans avant Jésus Christ environ.[1][2][3][5]

Il ya désaccord sur l'origine du concept de l'utilisation de vent pour la puissance mécanique. Certains croient que le concept trouve son origine dans l'ancienne Babylonie. [1]L'empereur babylonien Hammourabi a prévu d'utiliser l'énergie éolienne pour son projet ambitieux d'irrigation au cours du dix-septième siècle avant Jésus Christ.[1][2][3]

D'autres arguent du fait que le lieu de naissance des moulins de vent est l'Inde [1]; la première conception documentée de l'utilisation des moulins à vent en Inde datant d'environ 400 ans avant J.-C. Les Persans ont employé des moulins de vent pour mouliner les grains au cours de cette période. Telles étaient les machines à axe verticale ayant des voiles faites avec des paquets de roseaux ou de bois. La pierre de meulage a été fixée à

l'axe vertical. Les voiles ont été fixées à l'axe central utilise les contrefiches horizontales. La taille des voiles a été décidée par les matières utilisées pour sa fabrication, habituellement 5 m de long et 9 m de grand.[1][2][3]

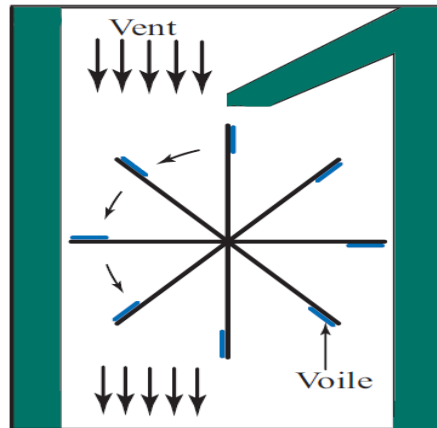


Figure I-1:Principe du premier moulin à vent persan à axe vertical. [5]

En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Age. [2] Les Français ont adopté cette technologie depuis 1105 A.D. et les anglais depuis 1191 A.D. contrairement à la conception persane d'axe vertical, les moulins européens ont eu un axe horizontal. Ces postes de moulins ont été construits avec de belles structures.[1]

Les Néerlandais, avec le concepteur renommé Janv Adriaenzoon, étaient les pionniers en faisant ces moulins. Ils ont apporté beaucoup d'améliorations de la conception et ont inventé plusieurs types de moulins. Utilisés tout d'abord pour moudre le grain, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés.[1][5]

Dés le 13ème siècle, les moulins à vent étaient populaires partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. Seulement en Hollande et Danemark, vers le milieu du 19^{ème} siècle, le nombre des moulins est estimé respectivement à plus de 30000 et dans toute l'Europe à 200000. A l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive. [2][3]



Figure I-2:Un ancien moulin à vent antique dans les îles britanniques. [1]

En les Etats-Unis, ce sont les colons espagnols qui introduisent les premiers moulins a vent dans le nouveau monde au 16^{ème} siècle, durant 1^{ère} coloniale, ils ont utilises pour moudre le grain. Vers le milieu du 19^{ème} siècle, un nouveau type de moulin à vent apparait aux Etats-Unis beaucoup moins élégants que les moulins de type européens, qu'on le nome éolienne multi-pales "éoliennes américaines". Elle reste pour de nombreuses personnes, l'image traditionnelle d'une éolienne diffusée dans le grand public par les westerns [4].

C'est en 1802 que l'on a songé pour la première fois à transformer l'énergie éolienne en énergie électrique. Lord Kelvin en effet essaya d'associer une génératrice d'électricité à un moteur éolien, mais en fait il faudra attendre 1850 et l'avènement de la dynamo pour qu'on puisse voir ce que l'on appellera les « aérogénérateurs ». Cette nouvelle application de l'énergie éolienne a connu un certain succès, et l'on comptait en 1920 jusqu'à 300constructeurs d'aérogénérateurs.

Les premières recherches aérodynamiques sur l'aéronautique ont participé au développement des moteurs éoliens, et réalisation de grandes machines allant de 100 à 1000 kW.

« Malheureusement », à cette époque, le faible coût du pétrole avait mis le kilowatt fourni par l'énergie thermique à un niveau de compétitivité inaccessible à l'énergie éolienne.

Dés 1973, le processus inverse a, petit à petit, relancé les programmes d'études et de réalisation d'aérogénérateurs. Mais les budgets de recherche et de développement ainsi que les aides gouvernementales fluctuent avec le prix du baril de pétrole et les aides accordées aux autres énergies (photovoltaïque en particulier). Toutefois au cours des dernières années se dessine une nette tendance au développement de « fermes éoliennes » ou « parcs éoliens » raccordés aux réseaux de distribution avec les machines de 300KW à 1.5MW. Les travaux sur les machines pour site isolés sont peu nombreux. [3]

Ainsi, l'énergie en provenance du vent a dû être « redécouverte » et de nouveau utilisée (dans les années 40 au Danemark 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde. A la fin des années 80, le nombre de machines installées n'a cessé d'augmenter avec une forte croissance à la fin des années 90.

Le coût de l'énergie éolienne est en baisse constante ces dernières années. Parmi les facteurs ayant provoqué cette baisse, on peut citer la baisse de prix des aérogénérateurs, l'augmentation de la rentabilité et la baisse des coûts de maintenance. Avec la tendance vers des turbines plus grandes, la baisse des coûts d'infrastructures, et les réductions du coût des matériaux, le prix de l'énergie éolienne continue à diminuer régulièrement. En prenant surtout en compte le coût correspondant à la pollution causée par les autres sources d'énergie, le prix de l'énergie éolienne est encore compétitif.[3]

I.3 Avantages et désavantages de l'énergie éolienne

I.3.1 Les avantages

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie.

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.[3][9]

- L'énergie éolienne est une énergie propre, Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du CO_2 . L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de CO_2 . [3][9]
- 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 CO_2 , 21 mille tonnes de SO_2 et 17,5 mille tonnes de NO . Ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides. [9]
- 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 dont on connaît la durée de vie. [3] [9]
- 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. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique. [3] [9]
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace. [9]
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- 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. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle. [3][9][14]

I.3.2 Les désavantages

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement:

- L'impact visuel. Ca 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.
- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
- L'impact sur les oiseaux: certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéro turbines.
- La qualité de la puissance électrique : 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 suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques: bien qu'en terme de coût, l'éolien puisse sur les meilleurs sites. c'est à dire là où il y a le plus de vent. concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.[9]

I.4 Définition d'une éolienne

L'énergie éolienne est une des formes d'énergie renouvelable. Elle est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie directement tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent.

L'origine du mot "éolienne" provient du nom Eole, dieu de vent dans la mythologie grecque.

Une éolienne "moteur à vent" est une haute tour (le vent souffle davantage en hauteur) en béton ou en métal, ressemblant à des derricks pétroliers, au sommet de laquelle tourne une hélice (généralement de 10 à 40mètre de diamètre).

L'éolienne fonctionne sur le même principe que le moulin à vent. En d'autres termes, une éolienne est une machine qui capte l'énergie cinétique présentée dans le vent et la transformée en énergie mécanique de rotation, cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières [3][4][6]:

- Soit directement pour entrainer par exemple des moulins ou des pompes de relevage d'eau.
- Soit pour entrainer une génératrice électrique.

Dans le cas de production d'énergie électrique, on peut distinguer deux types de configuration :

- L'énergie est stockée dans des accumulateurs.
- L'énergie est utilisée directement par injection sur un réseau de distribution.

Dans la deuxième configuration, le générateur éolien peut fonctionner isolément ou en parallèle avec une autre source d'énergie électrique. Dans ces deux cas, les considérations économiques seront différentes. Pour un fonctionnement en parallèle avec d'autres sources d'énergie électrique, les puissances sont beaucoup plus importantes (100 kw et plus) ; le prix de revient minimal du kilowattheure produit est l'objectif qui imposera le dimensionnement, le choix, et la disposition des différents composants.

Selon la gamme de puissance produite par l'aérogénérateur, on distingue les catégories des éoliennes suivantes: [4]

- Eolienne de petite puissance : couvre la gamme de puissance de 20w à 50kw réparties en trois catégories : micro éoliennes, 100w maximum, mini éoliennes de 100w à 10kw et petites éoliennes de 10 à 50kw.
- Eolienne de moyenne puissance : de 50 à quelques centaines de kw.

- Eolienne de forte puissance : supérieur à 1MW.

I.5 Type d'éoliennes

La langue maturation des technologies dans les années 70-80 a fait émerger deux types de machines : les éoliennes à axe horizontal et celles à axe vertical. Ces deux types peuvent être utilisés indifféremment dépendant principalement des préférences visuelles, des puissances nécessaires et de la ressource en vent.[4]

I.5.1 Les éoliennes à axe vertical

Les éolienne à axe vertical (axe de transmission perpendiculaire au sol) ont été probablement les premières utilisés par la suite elles ont été abandonnées au profit des éoliennes à axe horizontal. C'est assez récemment qu'elles ont été redécouvertes et ont fait l'objet de nombreuses études notamment de la part des chercheurs canadiens car elles présentent plusieurs avantages. Tout d'abord l'accès au générateur et aux principales composantes mécaniques est situé aux pieds de la tour. De plus, elles sont opérationnelles avec des vents multidirectionnels et sont plus efficaces avec des vents à faible vitesse. Deux principes différents sont utilisés pour ce type de machines, à savoir la traînée différentielle ou la variation cyclique d'incidence.[4] [7][8]

➤ La traînée différentielle

Le principe de mise en mouvement de ce type de machine est le suivant: les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes (Figure). Il en résulte donc un couple moteur, que l'on peut utiliser pour entraîner un générateur électrique ou un autre dispositif mécanique tel qu'une pompe.

L'illustration la plus courante de ce type d'éolienne est le rotor de Savonius (figure), du nom de son inventeur, un ingénieur finlandais qui l'a breveté à la fin des années 1920. Le fonctionnement est ici amélioré par rapport à l'anémomètre par la circulation de l'air rendue possible entre les deux demi-cylindres, ce qui augmente le couple moteur [7][8].

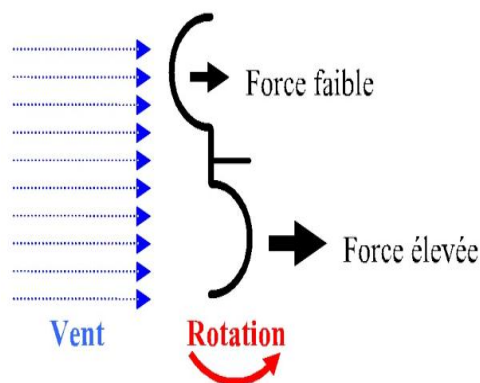


Figure I-3: Effet du vent sur un corps creux. [7]

On peut aisément imaginer que, lors du démarrage de ce type de machine (phase d'établissement du vent), les cylindres soient orientés par rapport au vent de telle manière que le couple résultant soit nul. L'éolienne ne pourra donc pas démarrer spontanément. La superposition de plusieurs rotors identiques, mais décalés d'un certain angle l'un par rapport à l'autre, permet de remédier à ce problème, rendant ainsi la machine totalement autonome. [8]

Le rotor de Savonius, étant très simple, présente un intérêt pour les pays très peu industrialisés car il est facile à fabriquer (Figure). De plus, il démarre à de faibles vitesses de vent, de l'ordre de 2 m/s. Les dimensions des machines à rotor de Savonius restent toutefois modestes, 3 à 4 m de hauteur maximale pour des diamètres de 2 m environ. [7]

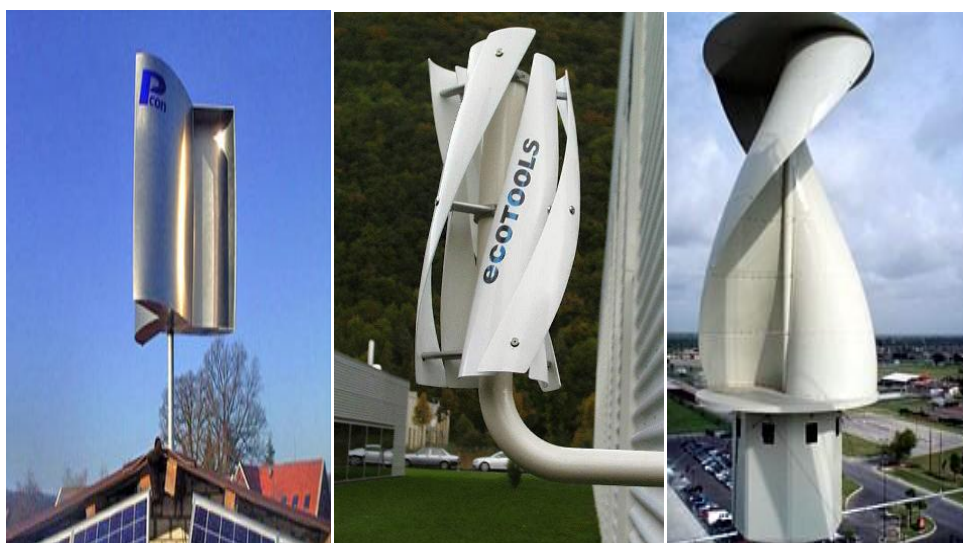


Figure I-4: Différents types de rotor de Savonius. [7]

➤ Variation cyclique d'incidence

Le fonctionnement est ici basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La combinaison de ces forces génère alors un couple moteur. En fait, les différents angles auxquels sont soumis les profils, proviennent de la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil (en rotation autour de l'axe vertical) et de la vitesse du vent. Ce principe de fonctionnement a été breveté au début des années 1930 par l'académicien Français Georges Darrieus. De tels rotors peuvent être de forme cylindrique, tronconique, parabolique... (Figure I-5).

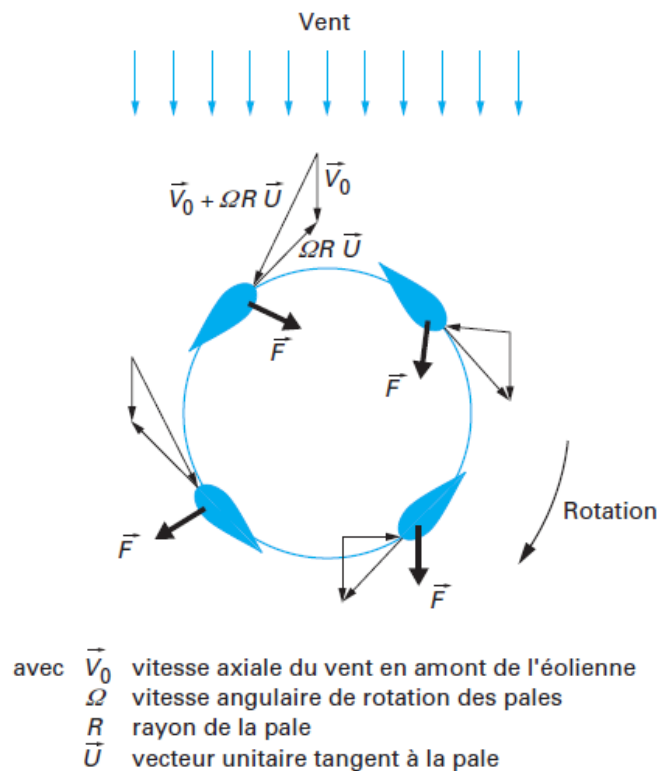


Figure I-5:Principe de l'incidence variable. [8]

Le principal avantage des machines à axe vertical est que le dispositif de génération électrique repose sur le sol, ne nécessitant donc pas l'édification d'une tour. Par ailleurs, une éolienne à axe vertical fonctionne quelle que soit la direction d'où souffle le vent, permettant donc de s'affranchir d'un dispositif d'orientation de la machine.

En revanche, le fait qu'une telle éolienne soit érigée près du sol signifie que le capteur d'énergie se situe dans une zone peu favorable, ce qui réduit significativement l'efficacité de la machine. Aujourd'hui, pratiquement les seules éoliennes commerciales sont à axe horizontales.[7][8]

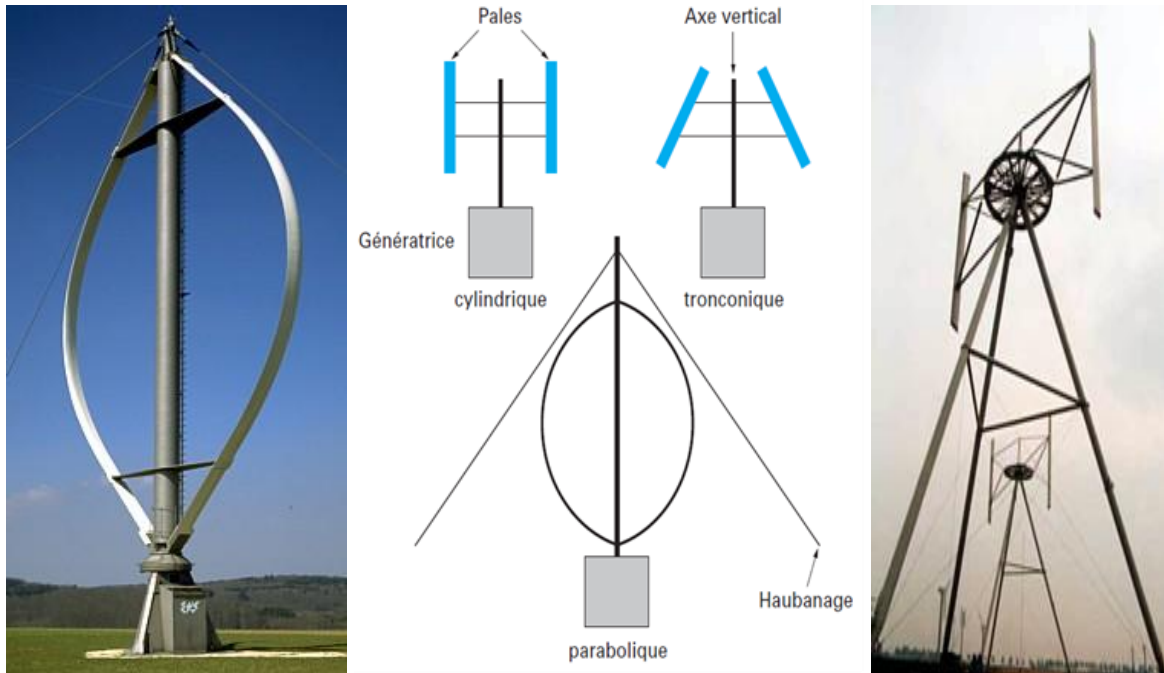


Figure I-6: Différents types de rotor Darrieus. [7] [8]

I.5.2 Les éoliennes à axe horizontal

La plus part des éoliennes modernes sont à axe horizontal (ou à hélice) ce sont les modèles commerciaux actuellement les plus répandus car leur conception est plus simple et leur rendement est supérieur à celui de tous les autres modèles. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, ou des hélices multipales pour le pompage de l'eau.[4][10]

On peut distinguer les capteurs éoliens dont l'hélice est en amont par rapport au vent « hélice au vent », et ceux dont l'hélice est en aval par rapport au vent « hélice sous le vent ». Une machine « aval » est théoriquement auto-orientable dans le lit du vent, alors qu'une éolienne « amont » doit généralement être orientée à l'aide d'un dispositif spécifique. On

constate néanmoins que la majeure partie des éoliennes de grande puissance adoptent la configuration « amont ».[8][10]

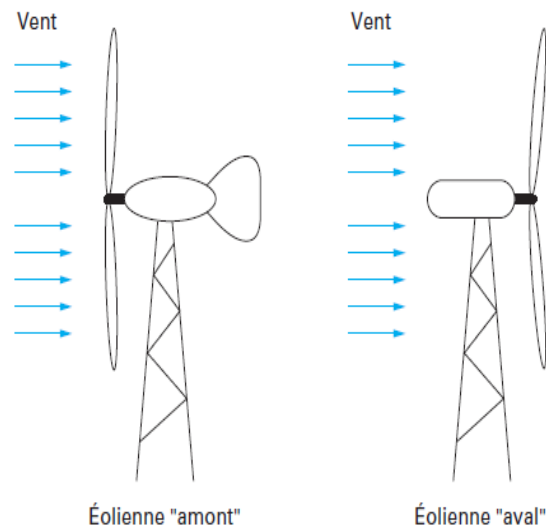


Figure I-7: Capteurs à axe horizontal. [8]

Sur base du nombre de pales que compte l'hélice, on peut distinguer deux groupes : à rotation lente "multipales" et à rotation rapide "aérogénérateurs".

➤ A rotation lente

Construits aux Etats-Unis dès 1870, les éoliennes à rotation lente "multipales" peuvent comporter de 12 à 30 pales. Le plus souvent, ces éoliennes sont de petite taille: la roue à couramment un diamètre de 3 à 8 mètres. Ces éoliennes fonctionnent bien jusqu'à un vent de 7 à 8 m/s; au-delà, il faut prévoir un dispositif d'arrêt et d'éclipsage qui doit mettre la machine en sécurité. Ces éoliennes sont pourvues d'un gouvernail de direction pour orienter le disque normalement à la direction du vent. La masse importante de la roue aubagée, les vitesses de rotation peu élevées (en regard du diamètre) font que ces machines de faible puissance sont utilisées principalement pour le pompage de l'eau.[8][10]

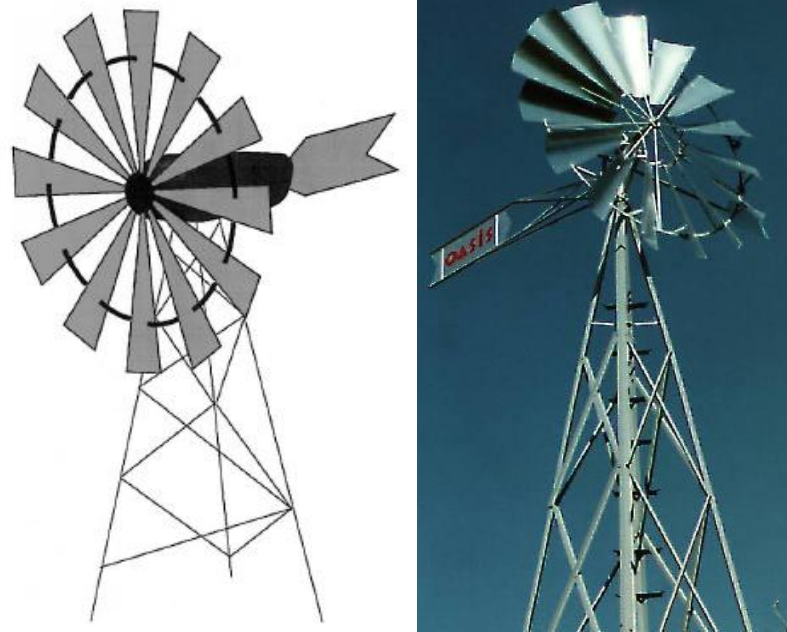


Figure I-8: Eolienne multipale. [8]

➤ **A rotation rapide**

Les éoliennes à rotation rapide, bi ou tripales, en général constituent actuellement la catégorie des éoliennes en vogue et sont essentiellement affectées à la production d'électricité.[4]

La puissance nominale de ces capteurs est très étendue, de quelques dizaines de watts à quelques mégawatts, de même que la taille du rotor (de 1 à 100 mètres de diamètre). L'optimisation du rotor a grandement bénéficié des travaux de recherche de l'aéronautique. Les éoliennes rapides obtiennent des rendements élevés.

Le disque éolien peut être placé en amont (hélice au vent) ou en aval (hélice sous le vent) du support. [10]



Figure I-9: Eolienne rapide

I.6 Description d'une éolienne

Comme mentionné précédemment, il existe deux types de systèmes éoliens : les systèmes à axe vertical et ceux à axe horizontal, mais les éolienne les plus courants sont à axe horizontal donc dans ce mémoire on s'intéressera qu'a ceux à axe horizontal.

On peut considérer trois composants essentiels dans une éolienne, la tour (axe centrale), le rotor pourvu le plus souvent de trois pales et la nacelle abritant les machines pour une machine de type « amont ». [6][7][8]

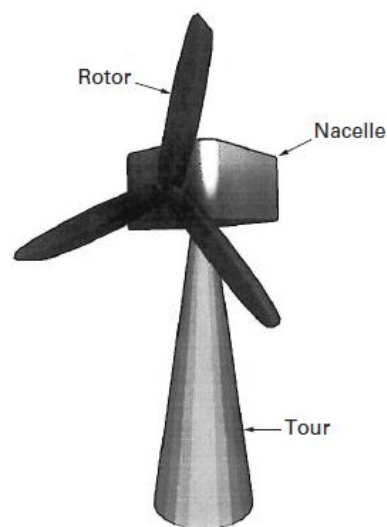


Figure I-10: Les composants essentiels d'une éolienne. [8]

➤ **La tour "mat"**

La tour est l'un des principaux composants d'une éolienne, Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble (la nacelle et le rotor) 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 la captation de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble (nacelle et rotor) de manière à s'adapter au mieux à différents sites d'implantation. Elle a une hauteur allant de 40m pour les plus petites (~400kW) à 140m pour les plus grandes (~3.5MW).[4][8]

Trois grands types de tour peuvent se rencontrer :

— mât haubané : il est simple de construction mais s'adresse essentiellement aux machines de faible puissance. Une intervention au niveau de la nacelle nécessite en général de coucher le mât. Il présente toutefois l'avantage de pouvoir soustraire l'éolienne à des conditions météorologiques extrêmes (forte tempête, cyclone). L'emprise au sol du haubanage peut devenir un obstacle à son utilisation ;

— tour en treillis : son avantage essentiel est sa simplicité de construction, qui la rend attractive pour les pays en voie de développement. Pour des machines de grande taille, son aspect inesthétique devient un handicap certain ;

— tour tubulaire : bien que de construction plus complexe, elle a la faveur des constructeurs car elle permet d'abriter certains dispositifs de régulation ou de commande et apporte une protection évidente aux personnels chargés de la maintenance qui doivent grimper jusqu'à la nacelle (installation aisée d'une échelle voire d'un ascenseur intérieur). Son aspect esthétique est de plus un atout pour l'intégration visuelle harmonieuse de l'éolienne.[8]

➤ **Le rotor et ses pales**

C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué des pales (d'un nombre variable), d'un moyeu, d'un capot de moyeu 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 variable, freinage du rotor...), Les pales sont faites de polyester ou de bois époxy renforcé par de fibre de verre et parfois en matériaux composites, notamment avec de la fibre de carbone (légère et résistante). La forme des pales est dessinée pour faire tourner le rotor au moyen de l'air qui passe dessus.[4][8]



Figure I-11: Rotor d'une éolienne

➤ **La 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 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.[8]

— la génératrice : Le cœur de l'éolienne est une génératrice qui se loge à l'intérieur de la nacelle (Figure) elle transforme l'énergie mécanique de rotation en énergie électrique. Il existe des éoliennes où sont utilisés plusieurs générateurs, l'un pour les basses vitesses et l'autre pour les régimes de vents élevés. La grande majorité des sources d'énergie électrique utilise des machines électriques tournantes qui réalisent une conversion d'énergie mécanique en énergie électrique, en utilisant un champ magnétique de couplage entre la partie fixe ou stator et la partie mobile ou rotor de la machine.[4]

— 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.

— divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile.

— un groupe hydraulique et ses servitudes si nécessaire.

— le dispositif d'orientation de la nacelle : Il 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. Le dispositif d'orientation comprend un compteur de tours, de manière à éviter de tordre inconsidérément le câble acheminant l'énergie électrique provenant de

la génératrice jusqu'au pied de la tour. En effet, l'utilisation d'un collecteur tournant n'est guère envisageable au vu des intensités élevées qui transitent (parfois plusieurs centaines d'ampères). Au bout d'un certain nombre de tours de la nacelle, celle-ci est alors manœuvrée en sens inverse à l'aide des moteurs d'orientation pour dévriller le câble. Celui-ci est généralement muni d'un interrupteur (actionné par la traction du câble résultant de son vrillage) qui empêche toute rotation supplémentaire de la nacelle en cas de défaillance du compteur.[8]

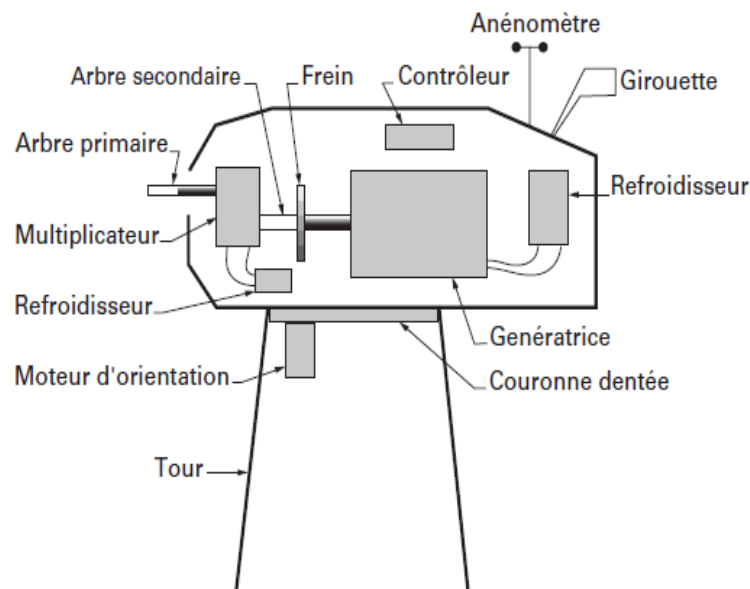


Figure I-12: Éléments d'une nacelle. [8]

I.7 Fonctionnement d'une éolienne

Si l'on se réfère à l'histoire de l'aventure éolienne et plus précisément au début de l'utilisation de l'énergie éolienne pour produire de l'énergie électrique en 1891, on ne constate pas vraiment de changements fondamentaux dans les principes de fonctionnement.

Il faut d'abord lever bien haut l'éolienne pour qu'elle puisse profiter au maximum des vents, ceci nécessite une tour toujours élevée par rapport à la taille de l'éolienne proprement dite « Une petite éolienne va être installée au moyen à 10 mètres de hauteur,

c'est-à-dire au moins aussi haut que le sommet des poteaux électriques. Une grande éolienne s'élèvera à plus de 100 mètres ce qui correspond à la hauteur d'un immeuble de 30 étages ».

Lorsque le vent se met à souffler (à partir de 2 ou 3 m/s soit environ 7 km/h), il exerce un système de forces sur les pales qui alors se met à tourner, le mouvement du rotor est transmis à une génératrice de courant.

Les génératrices étant prévues pour tourner plus vite que les rotors d'éoliennes, la transmission se fait alors à travers un multiplicateur de vitesse qui a pour rôle de démultiplier la vitesse de rotation, dans le but d'obtenir une vitesse suffisamment importante pour la génératrice. Certains constructeurs ont mis au point des modèles qui fonctionnent avec des génératrices à basse vitesse qui ne nécessitent pas de multiplicateur.

Lorsque la vitesse du vent dépasse 90 km/h (plus de 25m/s), 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 subiraient 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 génératrice délivre alors un courant électrique qui est ensuite stockée dans des batteries pour les plus petits modèles d'éoliennes ou transféré sur le réseau électrique pour les autres.[23] [4]

I.8 Parcs éoliens

Même en prenant en compte les plus grandes turbines éoliennes actuelles, d'une puissance nominale de quelques mégawatts, la puissance délivrée par une seule turbine reste une quantité petite par rapport à celle d'une centrale conventionnelle. D'autre part, dans la majorité des pays, les zones proposant des vitesses de vent techniquement utilisables sont restreintes à quelques régions seulement. Ceci crée la nécessité d'assembler dans ces lieux autant d'éoliennes que possible, indépendamment de la demande

énergétique locale. De cette façon apparaissent les parcs ou fermes éoliennes, qui consistent en une concentration de nombreuses éoliennes en groupes spatialement organisés et interconnectés. Ce groupement offre de nombreux avantages techniques.

De plus, d'un point de vue économique, il est plus intéressant en termes de coût d'installation et de raccordement au réseau, car de longues lignes d'interconnexion au réseau sont justifiées uniquement pour un nombre relativement élevé de turbines éoliennes. Entre les années 1982 et 1985, les premiers grands ensembles d'éoliennes ont été installés en Californie, avec de petites unités élémentaires dont la puissance varie entre 20 et 100 kW. En Allemagne, l'utilisation de l'énergie éolienne s'est basée dès le commencement sur l'installation de grandes turbines éoliennes en nombre important.

Les parcs éoliens de plusieurs mégawatts forment déjà une partie de la matrice énergétique de nombreux pays.

I.9 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne

Une machine par définition est un ensemble d'appareils ou d'organes qui sont combinés pour «Recevoir» une forme d'énergie. La «transformer» ou la «convertir», pour la «restituer» par la suite sous une autre forme pour «PRODUIRE» un effet donné.

On peut classer dans cette catégorie et cela du point de vue physique : une turbine, une pompe un compresseur, un moteur, un générateur etc..... , puisqu'ils transforment, convertissent, ou produisent une certaine énergie.

D'une manière générale, on ne classe dans catégorie des «Machines électriques» que les ensembles utilisant ou produisant de l'énergie électrique

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques.

Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la voilure. Certaines machines typiquement utilisées dans les constructions éoliennes sont succinctement décrites dans ce paragraphe en tenant compte de leurs spécificités [14] [15].

I.9.1 Machines asynchrones 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 et présentent un taux de défaillance très peu élevé. Dans les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Or, il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse. Le changement de la configuration de bobinage du stator (nombres de pôles) est donc l'utilisation des machines de type Dahlander est une solution parfois utilisée (Figure 1.13), mais là encore le rendement est loin d'être optimal sur toute la plage de vent. Une autre possibilité consiste à utiliser un variateur de fréquence, mais cette solution est globalement coûteuse (variation de fréquence et multiplicateur de vitesse) et donc très rarement exploitée (Figure 1.14).

Ces machines peuvent être facilement utilisables dans le petit éolien car la vitesse de rotation des pales est importante et l'entraînement direct possible. Mais, au delà d'une efficacité énergétique moindre par rapport aux systèmes à fréquence variable, la rigidité de ces chaînes dont on a déjà dit qu'elle occasionne des variations brusques de puissance, ainsi que les problèmes de décrochage du réseau en cas de chute de vent sont leurs principaux inconvénients.[10]

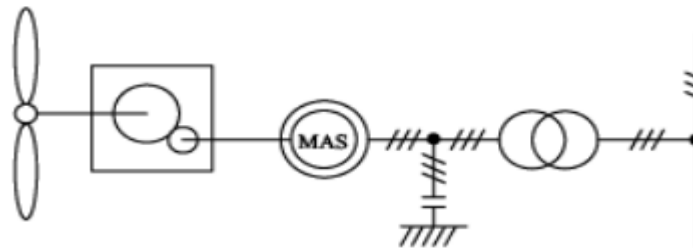


Figure I-13: Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage. [10]

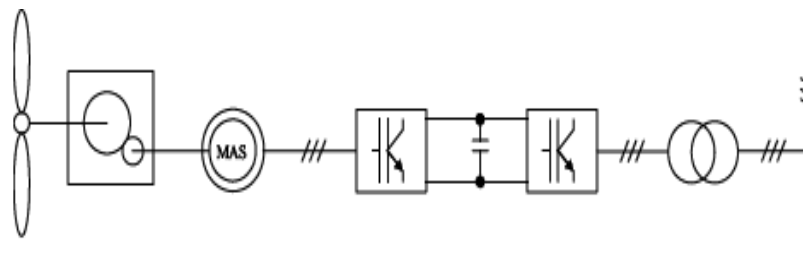


Figure I-14: Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable. [15]

I.9.2 Machines asynchrones à double alimentation (MADA) (rotor bobiné)

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 compensée par l'économie réalisée sur le convertisseur.

La MADA comme son nom l'indique est une machine doublement alimentée. Elle a le surnom de « Machine généralisée » vu sa flexibilité de fonctionnement. Grâce à l'accès au rotor et via une interface électronique il est possible de contrôler la vitesse de rotation ainsi que le facteur de puissance.

Le fonctionnement de la MADA se base sur le principe du contrôle de l'écoulement de la puissance de glissement. Au lieu de dépenser en pertes Joule la puissance rotorique on peut la récupérer et l'injecter dans le réseau. La difficulté étant que la fréquence des courants rotorique f_r est égale à 9 fois la fréquence du réseau. Durant des années cette difficulté était surmontée grâce à un groupement de machine. Avec l'apparition des semi-conducteurs une solution plus pratique a été mise au point. Une interface électronique composée d'un redresseur et d'un onduleur permettrait le passage de la puissance de glissement vers le réseau. Suivant les sens du transfert de puissance entre le rotor et le réseau mais aussi entre celui-ci et le stator, la MADA devient ainsi génératrice ou moteur. [20] [21]

De plus, grâce à ce mécanisme, sa vitesse de rotation peut être contrôlée. Les différents modes de fonctionnement de la MADA sont décrits ci-dessous :

		Modes	
		Moteur $P_m > 0$	Générateur $P_m < 0$
Régime	Hypo-synchrone $P_s = -(P_m - P_r)$	$P_s < 0$ et $P_r > 0$	$P_s > 0$ et $P_r < 0$
	Hyper-synchrone $P_m = -(P_s - P_r)$	$P_s < 0$ et $P_r < 0$	$P_s > 0$ et $P_r > 0$

Modes opérationnels de la MADA [16]

Le tableau résume les différentes modes et régimes de fonctionnement de la MADA dans les quatre quadrants. Le signe (+) attribué à une puissance signifie que celles-ci est fournie par la MAD A, alors que le signe (-) est attribué dans le cas où la puissance est fournie de l'extérieur à la MADA [16].

I.9.2.1 Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la (Figure 1.15), le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO.

Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur. [10] [14] [15]

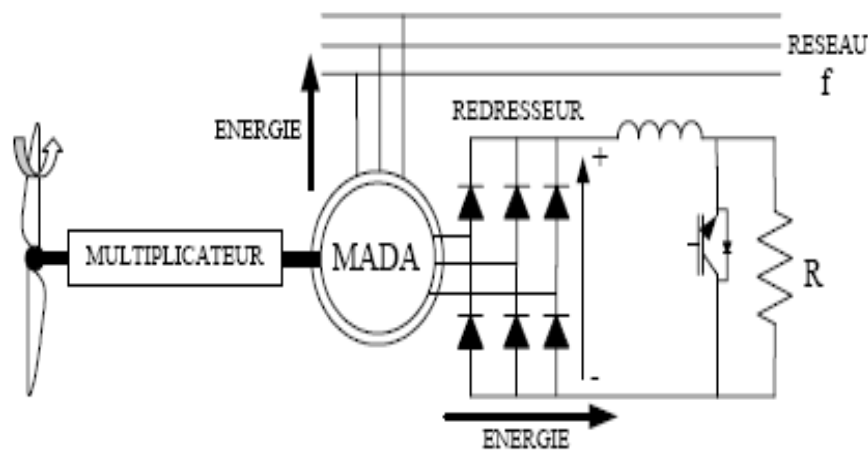


Figure I-15: MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée. [10]

I.9.2.2 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement Vers le réseau (structure de Kramer, Figure.I.16). [17]

L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Ce système est avantageux s'il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine.

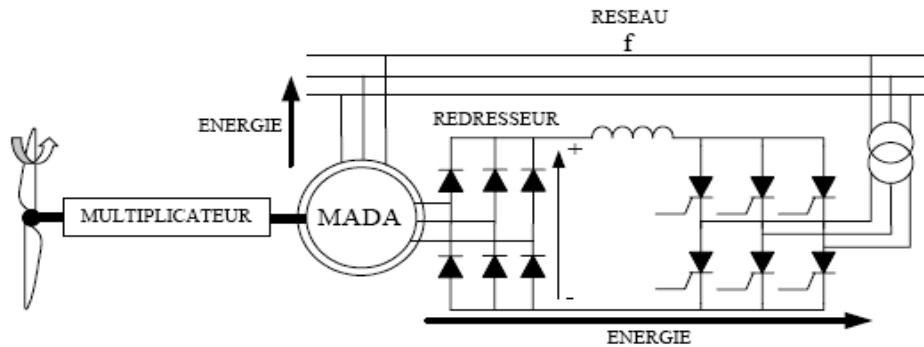


Figure I-16: MADA structure Kramer [10]

Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%. L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance ; de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau) donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de Scherbius avec convertisseurs à IGBT.

I.9.2.3 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur-onduleur peut être remplacée par un cycloconvertisseur (Figure I-17), l'ensemble est alors appelé structure de Scherbius [18].

La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la figure I-16. En effet si la variation du glissement doit rester inférieure à 30% pour maintenir l'efficacité du système, cette variation peut être positive (fonctionnement hyposynchrone) ou négative (fonctionnement hypersynchrone).

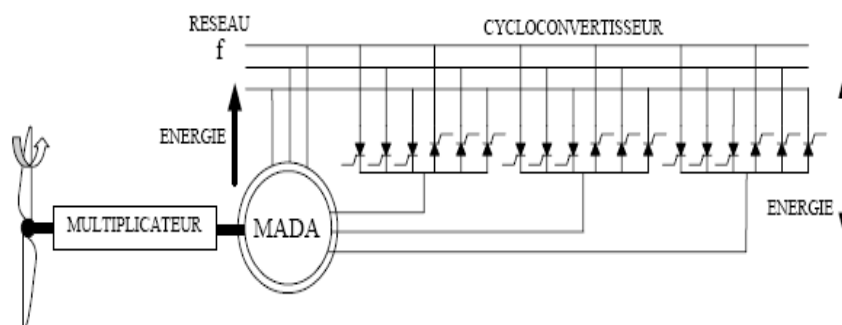


Figure I-17: Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur. [10]

Le principe du cycloconvertisseur est de prendre des fractions des tensions sinusoïdales du réseau afin de reproduire une onde de fréquence inférieure (Figure I-18).

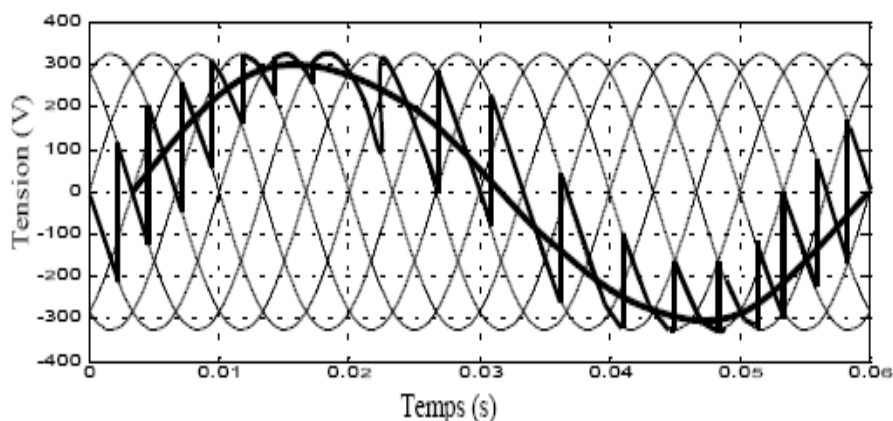


Figure I-18: Principe de fonctionnement du cycloconvertisseur. [10]

Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif. Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cycloconvertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés en MLI.

I.9.2.4 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Cette configuration (Figure I-19) a les mêmes caractéristiques que la structure de Scherbius avec cycloconvertisseur. Toutefois les interrupteurs utilisés ici (transistors IGBT) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO [19]. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsions dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées).

La structure du dispositif et la philosophie de fonctionnement sont semblables à celle de la MADA de type "brushless». Toutefois, malgré la présence de contacts glissants qui doivent être entretenus et remplacés périodiquement, la conception de cette machine est plus conventionnelle et plus simple que la machine brushless (un seul bobinage au stator, un autre au rotor). Plusieurs études récentes, confirmées par des réalisations industrielles, montrent la viabilité de ce dispositif dans un système éolien à vitesse variable. La bi-directionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hyposynchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau.

Si le glissement reste inférieur à $\pm 30\%$ autour du synchronisme, le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représentent moins de 1% de cette puissance.

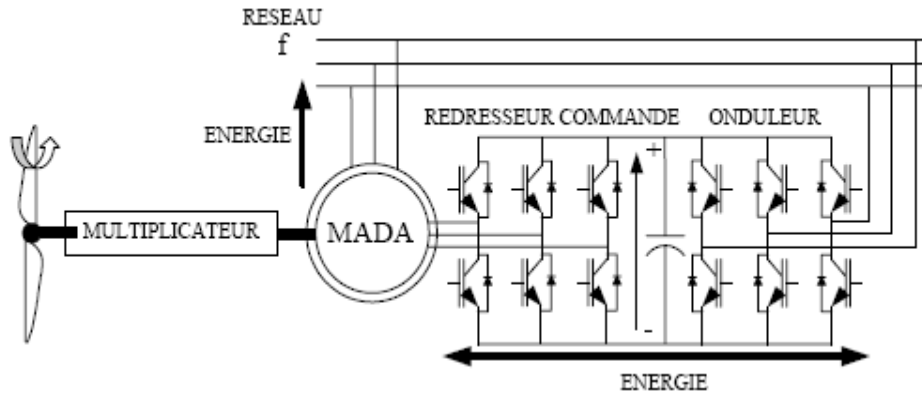


Figure I-19: Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI. [15]

De plus, le fonctionnement hypersynchrone permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau.

La puissance totale ainsi produite peut alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire. La présence d'un convertisseur à MLI peut toutefois entraîner des dv/dt importants dans les enroulements rotoriques et faire circuler des courants de fréquences élevés dans ces mêmes enroulements. [13]

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté l'état de l'art du système éolien, on premier lieu, un historique d'utilisation de l'énergie éolienne et l'exploitation de vent par l'homme. Après, on discutés les parties essentiels d'un système éolien, les différents types d'éolienne utilisés et les avantage et les inconvénients de ce système.

A la fin de ce chapitre, nous avons fait une description des Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne et le raccordement aux réseaux électriques.

Le deuxième chapitre sera consacré pour la présentation et la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation MADA.

CHAPITRE II

Modélisation et présentation de la machine asynchrone à double alimentation

II.1 Introduction

La première apparition de cette machine date de l'année 1899, la machine asynchrone à double alimentation, (MADA) est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures : le stator et le rotor. Elle a été d'abord étudiée pour être utilisée en tant que moteur à grande vitesse. Les problèmes d'instabilités rencontrés dès lors l'ont fait abandonner pour un temps. Grâce au progrès des technologies précitées, diverses applications de la MADA sont alors devenues possibles dont l'intérêt réside principalement dans les possibilités de contrôle du flux des puissances pour les régimes caractéristiques hypo et hyper-synchrones, cela étant aussi bien dans les fonctionnements moteur que générateur. Dans ce contexte, la théorie de l'orientation du flux, apparue dans le début des années 70, appliquée à la MADA avec succès a donné lieu à un outil puissant pour son contrôle.[22][23]

Dans ce chapitre on va faire la présentation et la modélisation de la MADA on basé sur la structure de la MADA et ces modes de fonctionnement, puis on décrit le modèle dynamique d'une machine asynchrone à double alimentation dans le plan ABC, on passe au modèle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans le plan DQ contient la transformation de Park et la matrice de passage à partir de plan ABC au plan DQ, et en fin on va modéliser l'alimentation de la GADA comprend la modélisation du filtre et celle de l'onduleur de tension.

II.2 Structure de la machine

La machine asynchrone à double alimentation est une machine triphasée à courant alternatif avec deux enroulements triphasés accessibles. Son stator est identique à celui de la machine asynchrone à cage d'écureuil (MAS) ou d'une machine synchrone (MS) et son rotor se diffère radicalement puisqu'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 II-2 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.[23] [24] [25]

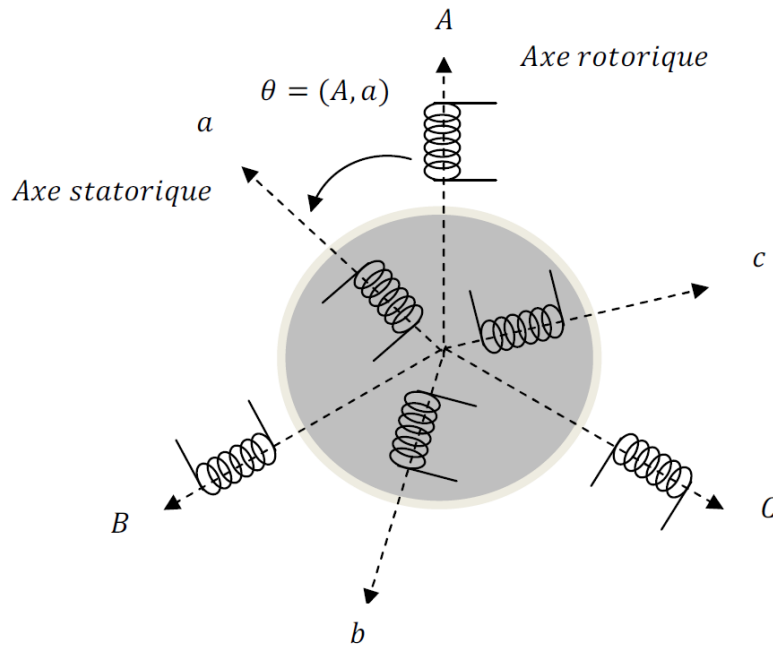


Figure II-1: Représentation schématique d'une machine asynchrone double alimentée

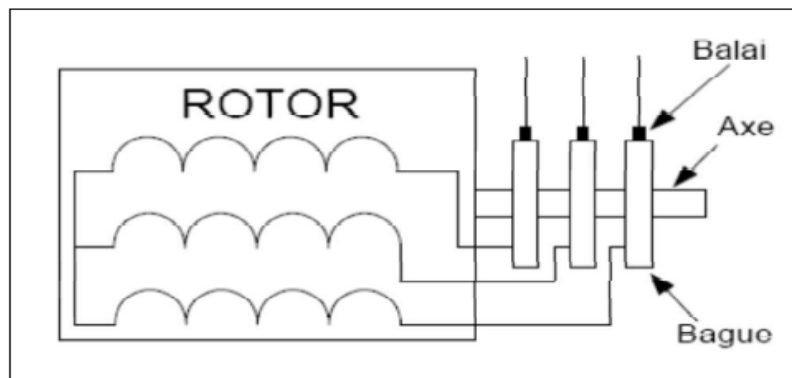


Figure II-2: Principe du rotor bobiné. [24]

II.3 Modes de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation

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. [24]

II.3.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

La figure II.3 montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.

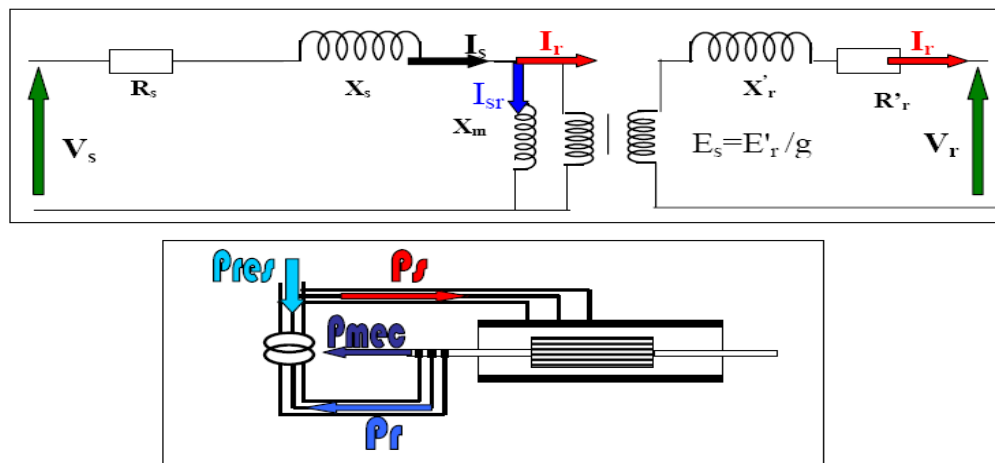


Figure II-3: Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

II.3.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

La figure II.4 montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un

fonctionnement moteur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement.

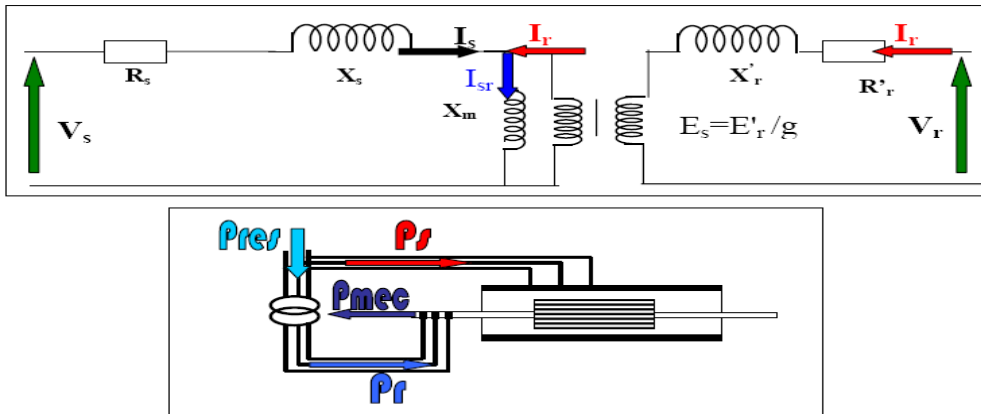


Figure II-4: Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

II.3.3 Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone

La figure II.5 montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

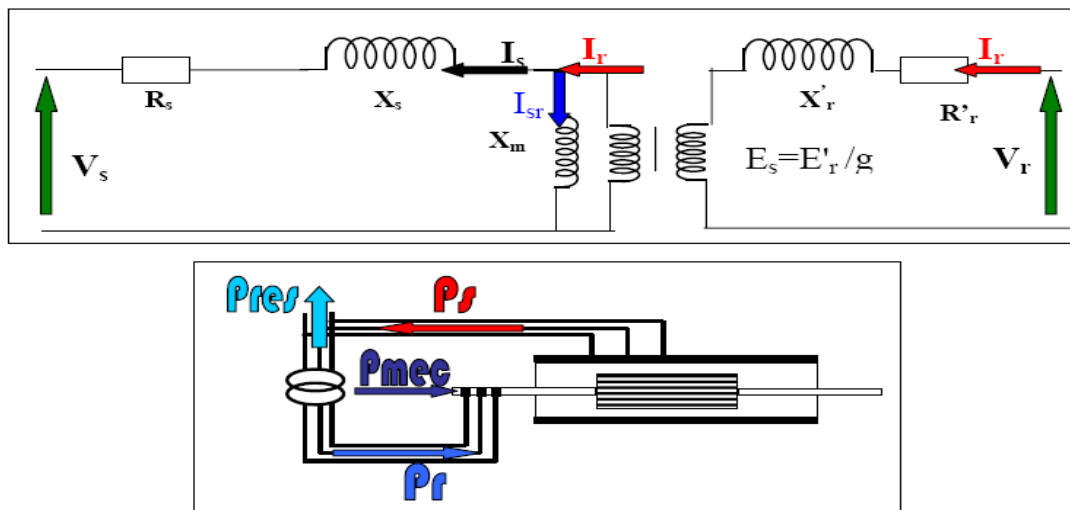


Figure II-5: Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone

II.3.4 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

La figure II.6 montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor.

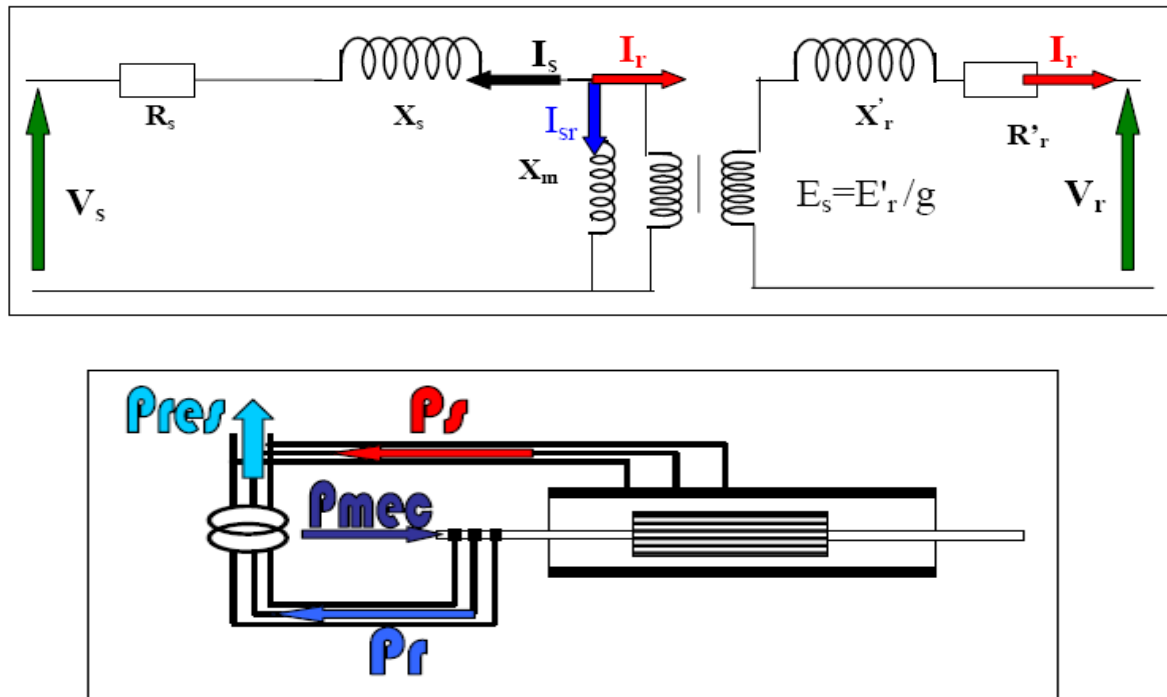


Figure II-6: Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone.

II.4 Avantages et inconvénients de la MADA

Bien que la MADA est caractérisée par leur fonctionnement à vitesse variable, elle présente, aussi, beaucoup des avantages tel que :

- Production de puissance électrique quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo en hyper) et la récupération de la puissance de glissement.
- La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- La partage des fréquences entre le stator et le rotor : en effet, dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la fréquence de

rotation du rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement.

- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale.

Parmi les Inconvénients de la MADA on cite :

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais.
- Nous utilisons un nombre des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur).
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage. Nous soulignons que des études récentes, tenant compte de la chute du prix du silicium, donnent maintenant un petit avantage à la MADA. [26]

II.5 Modèle dynamique d'une machine asynchrone à double alimentation dans le plan ABC

Cette section décrit le modèle dynamique d'une machine asynchrone à double alimentation. La machine asynchrone à double alimentations se compose principalement de deux parties, stator et rotor. Le rotor tourne à l'intérieur de la cavité de la machine et est séparé du stator par un entrefer. En principe les circuits électriques du stator et du rotor sont constitués de trois enroulements identiques couplés en étoile (ou en triangle) à la seule différence est que celui du rotor relié à trois ou quatre bagues sur lesquelles glissent des balais. Les trois enroulements du stator (A, B et C) sont parallèles aux enroulements du rotor et sont distribués sinusoïdalement, décalés de 120 degrés l'un par rapport à l'autre.

La figure II.7 illustre la distribution des enroulements dans une machine asynchrone à rotor bobiné à une paire de pôle $P= 1$. Souvent la machine sera construite avec plusieurs paires de pôles en reliant les enroulements en parallèle et les bobines seront décalées de 120. Dans ce cas la machine donne un couple plus grand et une vitesse de rotation réduite. [27]

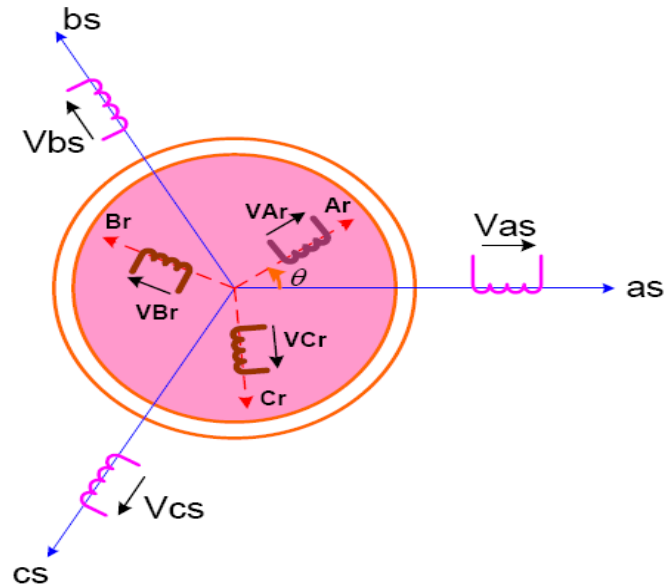


Figure II-7: Représentation de la Machine asynchrone à double alimentation.

a_s, b_s, c_s : Phase du stator.

A_r, B_r, C_r : Phase du rotor.

II.5.1 Hypothèses simplificatrices de la modélisation

A cause de la répartition des enroulements de la MADA et la géométrie propre complexe et afin de faciliter les difficultés, on prend quelques hypothèses simplificatrices avancées habituellement pour modéliser les machines électriques en vu de leur commande en général :

La machine asynchrone à double alimentation (MADA), avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte. De ce fait, la mise en équations nous impose certaines hypothèses simplificatrices, dans le but d'établir un modèle simple, qui sont :

- La machine est de constitution symétrique.

On suppose que le circuit magnétique est parfaitement feuilleté au stator et au rotor (seuls les enroulements sont parcourus par des courants) et que la densité de courant peut être considérée comme uniforme dans la section des conducteurs élémentaires (absence d'effet pelliculaire).

- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.

- On suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé, condition nécessaire pour considérer les flux comme fonction linéaire des courants.

On considère que la force magnétomotrice créée par chacune des phases statoriques et rotoriques est à répartition sinusoïdale.

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligé, les inductances propres sont constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes rotoriques et statoriques.[28]

II.5.2 Equations électriques de la machine

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 : [29]

$$[V_s]_3 = [R_s] \cdot [I_s]_3 + \frac{d}{dt} [\Phi_s]_3 \quad (\text{II.1})$$

$$[V_r]_3 = [R_r] \cdot [I_r]_3 + \frac{d}{dt} [\Phi_r]_3 \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$$[R_s] = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{pmatrix} \quad (\text{II.3})$$

Et

$$[R_r] = \begin{pmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{pmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Avec respectivement :

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

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

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

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

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

$$[\Phi_s]_3 = [L_s] \cdot [I_s]_3 + [M] \cdot [I_r]_3 \quad (\text{II.5})$$

$$[\Phi_r]_3 = [L_r] \cdot [I_r]_3 + [M] \cdot [I_s]_3 \quad (\text{II.6})$$

Avec

$$\begin{cases} L_s = l_s - M_s \\ L_r = l_r - M_r \\ M = \frac{3}{2} M_{sr} \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Sous forme matricielle

$$[L_s] = \begin{pmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{pmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Et

$$[L_r] = \begin{pmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{pmatrix} \quad (\text{II.9})$$

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.

La matrice des inductances mutuelles (matrice de couplage rotor-stator) s'écrit :

$$[M_{sr}] = \begin{pmatrix} M_{sr} \cos(\theta) & M_{sr} \cos(\theta + 2\pi/3) & M_{sr} \cos(\theta - 2\pi/3) \\ M_{sr} \cos(\theta - 2\pi/3) & M_{sr} \cos(\theta) & M_{sr} \cos(\theta + 2\pi/3) \\ M_{sr} \cos(\theta + 2\pi/3) & M_{sr} \cos(\theta - 2\pi/3) & M_{sr} \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (\text{II.10})$$

II.5.3 Equations mécaniques de la machine

Le couple électromagnétique est donné par l'expression générale suivante :

$$C_{em} = p [I_s]^t \frac{d}{d\theta} ([M] \cdot [I_r]) \quad (\text{II.11})$$

Donc l'équation mécanique de la machine s'écrit :

$$j \frac{d}{dt} \omega = C_{em} - C_r - f_r \omega \quad (\text{II.12})$$

II.6 Modèle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans le plan DQ

II.6.1 La transformation de Park

La transformation de Park consiste à transformer les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système.[4]

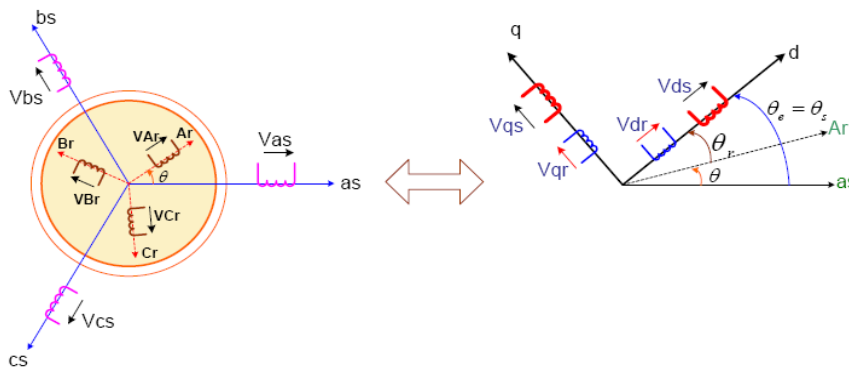


Figure II-8: Passage du triphasé au biphasé

II.6.2 Matrices de passage

On utilise la transformation de Park qui conserve la puissance instantanée.

$$\begin{bmatrix} V_o \\ V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \end{pmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Soit $[V_{odq}] = [P][V_{abc}]$; de même,

$$[i_{odq}] = [P][i_{abc}] \quad ; \quad [\Phi_{odq}] = [P][\Phi_{abc}]$$

De même pour la transformation inverse :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \end{pmatrix} \begin{bmatrix} V_o \\ V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

Soit

$$[V_{abc}] = [P]^{-1} [V_{odq}]$$

Remarque: l'angle θ qui sert à la transformation de Park est à priori quelconque. Il dépend du choix référentiel.

II.6.3 Equations des tensions

Equations des tensions au stator :

$$[V_{sabc}]_3 = [R_s] \cdot [I_{sabc}]_3 + \frac{d}{dt} [\Phi_{sabc}]_3 \quad (\text{II.15})$$

On écrit d'autre part :

$$[V_{sabc}] = [P]^{-1} [V_{sodq}] \quad \text{et} \quad [i_{sabc}] = [P]^{-1} [i_{sodq}] \quad (\text{II.16})$$

$$[P]^{-1} [V_{sodq}] = [P]^{-1} [R_s] \cdot [I_{sodq}] + \frac{d}{dt} ([P]^{-1} [\Phi_{sodq}]) \quad (\text{II.17})$$

On multiplie à gauche par [P]. On obtient alors :

$$[V_{sodq}] = [R_s] \cdot [I_{sodq}] + [P] \frac{d}{dt} ([P]^{-1}) [\Phi_{sodq}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sodq}] \quad (\text{II.18})$$

On démontre que :

$$[P] \frac{d[P]^{-1}}{dt} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{II.19})$$

On obtient donc les équations suivantes, où θ_s est l'angle électrique dont la référence est au stator ; on pose $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$ on appliquant la transformation de Park aux équations de la machine asynchrone à double alimentation, on trouve :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} (\Phi_{ds}) - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} (\Phi_{qs}) + \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} (\Phi_{dr}) - \omega_r \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} (\Phi_{qr}) + \omega_r \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

II.6.4 Choix du référentiel

On peut distinguer trois choix de référentiel possibles :

- **Référentiel lié au stator**

Ce référentiel est mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées $\omega_s = 0$

- **Référentiel lié au rotor**

Ce référentiel est caractérisé par $\omega_r = 0$ il est intéressant dans l'étude des régimes transitoires où la vitesse est supposée constante.

- **Référentiel lié au champ tournant**

Ce référentiel est caractérisé par $\omega_r = \omega_s - \omega$. Dans ce cas les grandeurs statoriques et rotoriques sont connues en régime permanent. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors d'une étude de la commande des machines.

Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de Park lié au champ tournant comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

II.6.5 Equations des flux

On utilise encore la transformation de Park dans les relations donnant les flux.

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

II.6.6 Equations des courants

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{1}{\sigma L_s} \Phi_{ds} - \frac{K^2}{\sigma M} \Phi_{dr} \\ I_{qs} = \frac{1}{\sigma L_s} \Phi_{qs} - \frac{K^2}{\sigma M} \Phi_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

$$\begin{cases} I_{dr} = \frac{1}{\sigma L_r} \Phi_{dr} - \frac{K^2}{\sigma M} \Phi_{ds} \\ I_{qr} = \frac{1}{\sigma L_r} \Phi_{qr} - \frac{K^2}{\sigma M} \Phi_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Avec

$$C_{em} = p \frac{M}{L_r} (\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds}) \quad (\text{II.28})$$

$$j \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - C_f$$

II.7 Mise sous forme d'équations d'état

Nous considérons le flux statorique et le courant rotorique comme étant les variables d'état et les tensions statoriques et rotoriques les variables commandes.

D'après l'équation (II.24) on peut déduire le courant i_{sd} et i_{sq} en fonction du flux statorique Φ_{sd} et Φ_{sq} et le courant rotorique i_{rd} et i_{rq} :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{1}{L_s} (\Phi_{ds} - M \cdot i_{dr}) \\ i_{sq} = \frac{1}{L_s} (\Phi_{qs} - M \cdot i_{qr}) \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

En introduisant les équations (II.29) dans les équations (II.22) on trouve les deux équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{d(\Phi_{ds})}{dt} = V_{ds} - \frac{R_s}{L_s} \cdot \Phi_{ds} + \frac{R_s}{L_s} \cdot M \cdot i_{dr} + \omega_s \cdot \Phi_{qs} \\ \frac{d(\Phi_{qs})}{dt} = V_{qs} - \frac{R_s}{L_s} \cdot \Phi_{qs} + \frac{R_s}{L_s} \cdot M \cdot i_{qr} - \omega_s \cdot \Phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

En exprimant le flux rotorique en fonction du flux statorique Φ_{sd} et Φ_{sq} et le courant rotorique i_{rd} et i_{rq} :

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \sigma \cdot L_r \cdot i_{dr} + \frac{M}{L_s} \cdot \Phi_{ds} \\ \Phi_{qr} = \sigma \cdot L_r \cdot i_{qr} + \frac{M}{L_s} \cdot \Phi_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

En introduisant les équations (II.31) dans les équations (II.23) on trouve les deux équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{di_{dr}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} V_{dr} - \frac{R_r}{\sigma L_r} i_{dr} - \frac{k^2}{\sigma M} \cdot \frac{d\Phi_{ds}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) i_{qr} + \frac{k^2}{\sigma M} \cdot (\omega_s - \omega_r) \cdot \Phi_{qs} \\ \frac{di_{qr}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} V_{qr} - \frac{R_r}{\sigma L_r} i_{qr} - \frac{k^2}{\sigma M} \cdot \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) i_{dr} + \frac{k^2}{\sigma M} \cdot (\omega_s - \omega_r) \cdot \Phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

De plus, les équations représentant le mouvement mécanique sont données par :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_s} (\Phi_{qs} i_{dr} - \Phi_{ds} i_{qr}) \quad (\text{I.33})$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{j} (C_{em} - C_r - f \cdot \Omega) \quad (\text{II.34})$$

Avec

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_r \cdot L_s}} \quad \text{et} \quad \sigma = 1 - k^2$$

Schéma bloc de la MADA

On peut représenter les différentes équations par un schéma bloc dans la figure suivante :

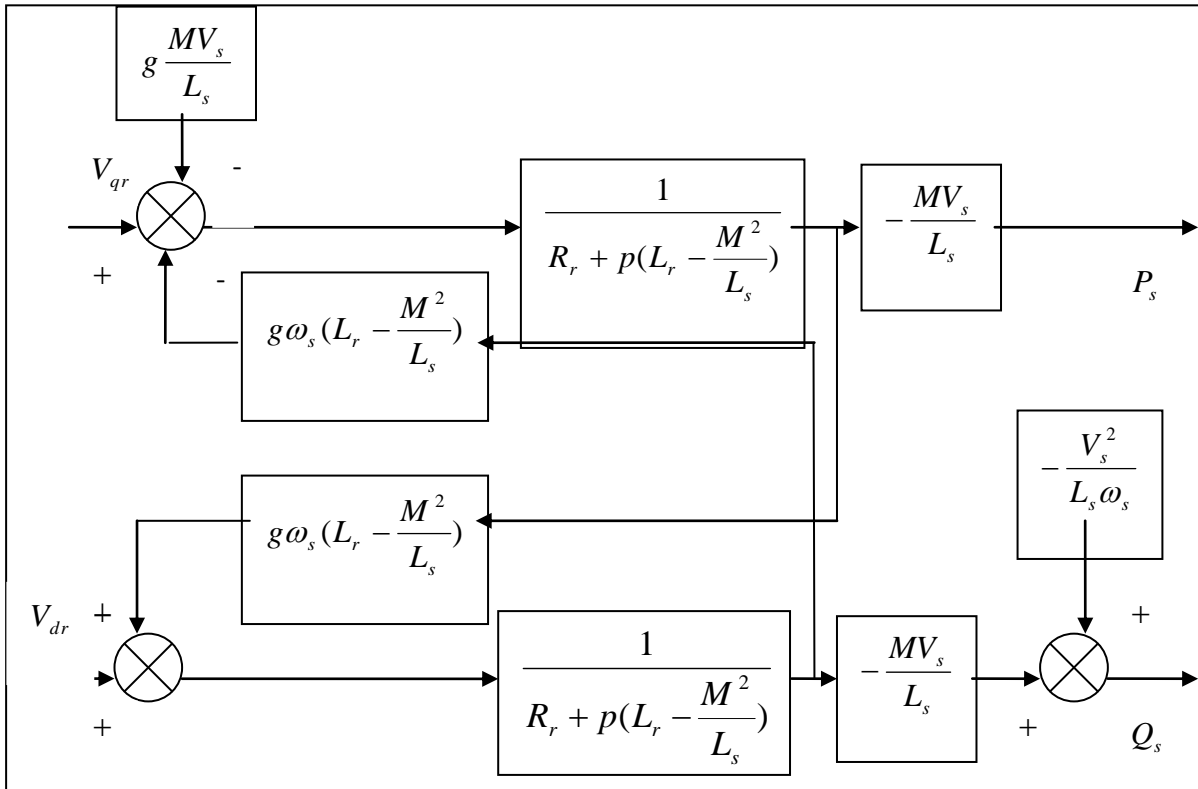


Figure II-9: Schéma bloc de la MADA

II.8 Modélisation de l'alimentation de la GADA

L'échange de puissance entre la machine et le réseau est assuré par un système de deux convertisseurs AC/DC et DC/AC muni d'un bus continu.

Dépend le sens de l'écoulement de puissance, Chaque convertisseur joue le rôle d'un onduleur ou le rôle d'un redresseur. L'emplacement des convertisseurs au niveau du rotor de la machine présente la caractéristique la plus avantageuse de notre système. En effet, les convertisseurs sont dimensionnés uniquement pour faire échanger le 1/3 de la puissance totale de système.

Ce système d'alimentation délivre une tension d'amplitude et de fréquence réglable ce qui donne à la machine des performances plus élevées. A savoir, une meilleure contrôle de puissance, et une plage de variation de vitesse importante.

Les signaux de commande, pour les convertisseurs, peuvent être des tensions (technique triangulo- sinusoïdale) ou des courants (technique de contrôle des courants par hystérésis). Dans notre cas nous étudions l'ensemble convertisseur-GADA où l'onduleur étant commandé par la technique de contrôle triangulo-sinusoïdale. [5]

II.8.1 Modélisation du filtre

On utilise un filtre passe-bas « LC », pour éliminer les hautes fréquences [4]. Ce filtre est schématisé par la figure (II-9).

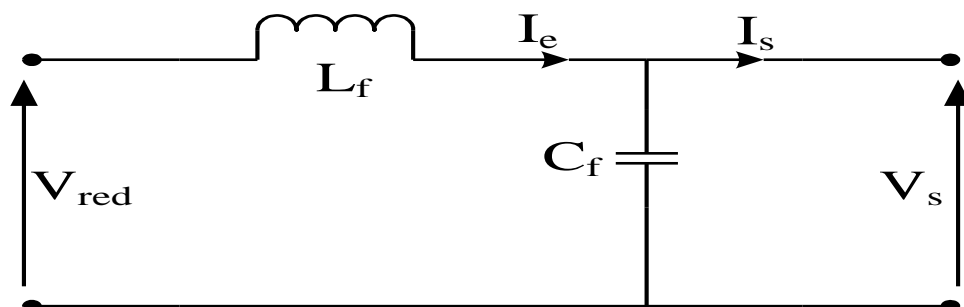


Figure II-10: Représentation du filtre

Le modèle du filtre est défini par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} V_{\text{red}}(t) = L_f \frac{dI_e(t)}{dt} + V_s(t) \\ \frac{dV_s(t)}{dt} = \frac{1}{C_f} [I_e(t) - I_s(t)] \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

La fonction du transfert du filtre est donnée par :

$$F(s) = \frac{V_s(s)}{V_{\text{red}}(s)} = \frac{1}{1 + (\sqrt{L_f C_f} s)^2} \quad (\text{II.36})$$

C'est un filtre du deuxième ordre avec une fréquence de coupure égale à :

$$f_c = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}} \quad (\text{I.37})$$

II.8.2 Modélisation de l'onduleur de tension

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué de cellules de commutation généralement à transistors ou à thyristor GTO pour les grandes puissances. Il permet d'imposer à la machine des ondes de tensions à amplitudes et fréquence variable à partir d'un réseau standard 220/380V-50Hz. Après redressement, la tension filtrée V_s est appliquée à l'onduleur. Il est le cœur de l'organe de commande de la GADA et peut être considéré comme un amplificateur de puissance.

Chaque groupe transistor-diode assemblé en parallèles forme un interrupteur bicommandable (à l'ouverture et à la fermeture) dont l'état apparaît complémentaire à celui qui lui est associé pour former ainsi un bras de commutation par exemple K_1 et K_1' . [5]

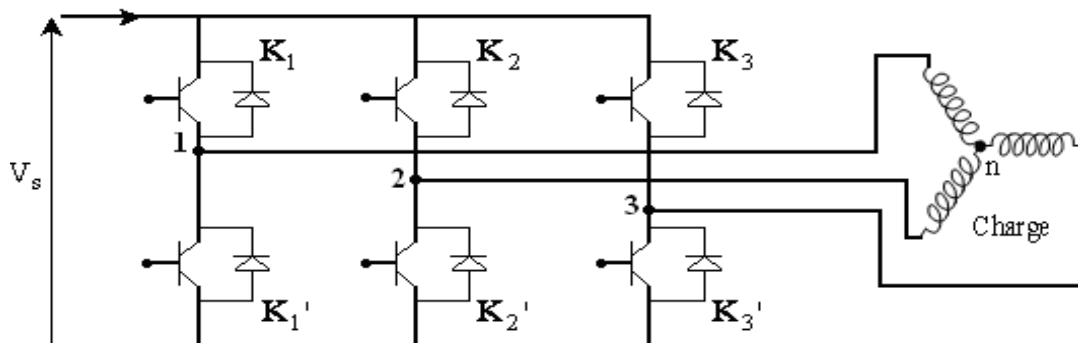


Figure II-11: Schéma de l'onduleur associé à une charge triphasée.

Les couples d'interrupteurs (K_1 et K_1'), (K_2 et K_2'), (K_3 et K_3') doivent être commandés de manière complémentaire pour assurer la continuité des courants alternatifs

dans la charge d'une part et d'éviter le court-circuit de la source d'autre part. Les diodes D_i ($i=1,2,\dots,6$) sont des diodes à roue libre assurant la protection des transistors.

L'entrée de l'onduleur est une source de tension continue. Le récepteur est une charge triphasée équilibrée qui peut être une machine asynchrone à double alimentation

Les interrupteurs K_j, K_j' ($j = 1, 2, 3$), sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant. Ce sont des éléments commandables à l'ouverture et à la fermeture. Ils sont commandés par la technique de modulation de largeur d'impulsion, qui consiste à moduler la tension de sortie. Nous supposons que la commutation des éléments semi-conducteurs est instantanée (composants parfaits).

Ainsi, à chaque bras d'onduleur est associé une fonction logique de commutation S_j , ($j = 1, 2, 3$) définie comme suit :

$$S_j = \begin{cases} 1 & \text{si } K_j \text{ fermé et } K_j' \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } K_j \text{ ouvert et } K_j' \text{ fermé} \end{cases}$$

Conclusion

Dans cette partie, on a présenté une étude générale de la machine asynchrone à double alimentation. Comme il a été montré, la MADA présente les avantages de la machine asynchrone à cage usuelle (robustesse, moins chère....) et Elle est présente aussi, l'avantage de travailler dans des gammes de variation de vitesse importantes.

La souplesse de cette machine la rend de plus en plus capable de remplacer autres machines, particulièrement lorsqu' elle fonctionne en mode générateur. En effet, la présence des convertisseurs bidirectionnels au niveau du rotor la rend capable d'échanger les puissances active et réactive avec le réseau.

Le contrôle de l'échange des puissances est devenu, donc, un aspect important qui caractérise la MADA.

Le troisième chapitre sera consacré pour Modélisation et simulation du système éolien.

CHAPITRE III

Modélisation et
simulation du système
éolien

III.1 Introduction

Dans ce chapitre on aura présenté la modélisation du système éolien qui contient la modélisation de turbine, le multiplicateur et l'arbre de la génératrice asynchrone à double alimentation.

Comme une deuxième partie de ce chapitre on va faire une simulation de système éolien et une interprétation sur les résultats.

III.2 Modélisation de la turbine éolienne

Le système éolien a pour but de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie; mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Ce système, dans notre cas, est constitué mécaniquement de quatre organes :

- Trois pales orientables possédant des coefficients propres d'inertie, d'élasticité et de frottement par rapport à l'air et par rapport au support de la turbine ;
- Un arbre d'entraînement des pales avec sa propre inertie, sa propre élasticité et son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur ;
- Un multiplicateur de vitesse, de gain G ;
- Un rotor de génératrice possédant une inertie J_e et un coefficient de frottement D_e .

III.2.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans le cadre d'étude électromécanique sont relativement simples et obéissent aux hypothèses simplificatrices suivantes :

- Les pales sont considérées à conception identique avec les mêmes paramètres d'inertie, d'élasticité et de frottement ;
- Les coefficients des frottements des pales par rapport à l'air et par rapport au support sont très faibles et peuvent être ignorés ;
- La vitesse du vent est supposée à répartition uniforme sur toutes les pales, ce qui permet de considérer l'ensemble des pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de tous les systèmes mécaniques.

On obtient alors un modèle mécanique simple [20]

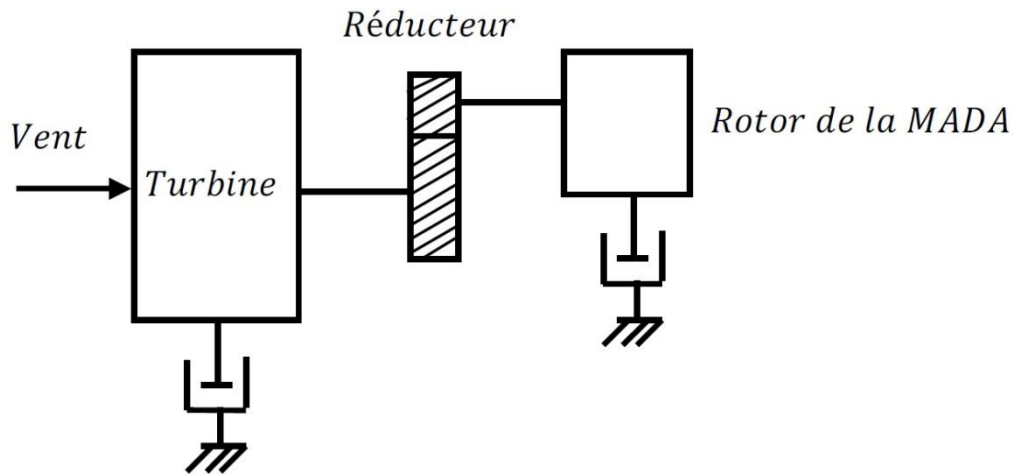


Figure III-1: Modèle mécanique simplifié de la turbine.

III.2.2 Modélisation de la vitesse du vent

Le vent est la raison d'être des aérogénérateurs. C'est l'entrée du système qu'on étudie. L'énergie cinétique contenue dans le vent est récupérée en partie, transformée en énergie mécanique par le biais de la turbine, puis en énergie électrique grâce au générateur. Les propriétés dynamiques du vent sont donc capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, évolue au cube de la vitesse du vent. La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Néanmoins, la direction du vecteur de vitesse du vent considéré dans ce modèle se limite à la dimension horizontale. Le modèle comportemental de vent peut donc être simplifié ; considérablement. La vitesse du vent V est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps.

$$V = f(t) \quad (\text{III-1})$$

Cette fonction du vent, peut être décomposée en une composante moyenne, variant lentement, et des fluctuations : [30]

$$V(t) = V_0 + \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (\text{III-2})$$

Tel que :

V_0 est la composante moyenne ;

A_i , ω_i et φ_i sont respectivement l'amplitude, la pulsation et la phase initiale de chaque composante spectrale fluctuantes.

La figure Figure III-2 présente deux profils de vent différents, l'un reflétant la stochastiquité que l'on peut trouver sur un site éolien et l'autre c'est un profil filtré et adapté à notre système éolien étudié qui a une dynamique lente.

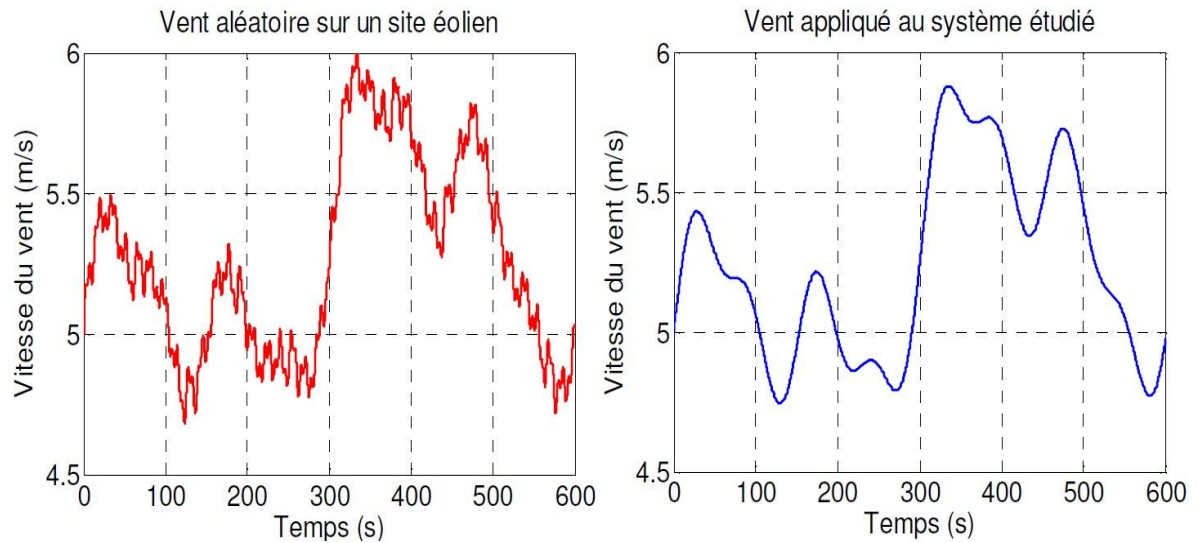


Figure III-2: Différents profils de vent.

III.2.3 Modélisation de la turbine

Précédemment, on a vu que la puissance éolienne du vent est exprimée par la relation comme suite:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (\text{III-3})$$

Et la puissance aérodynamique au niveau du rotor de la turbine s'écrit sous la forme suivante :

$$P_t = C_p P_v = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho S V^3 \quad (\text{III-4})$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne et il dépend de la caractéristique de la turbine. La figure suivante représente la variation de ce coefficient en fonction du ratio de vitesse, et de l'angle de l'orientation de la pale β pour une éolienne de 1.5 MW prise comme exemple d'application dans cette étude.

Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V} \quad (\text{III-5})$$

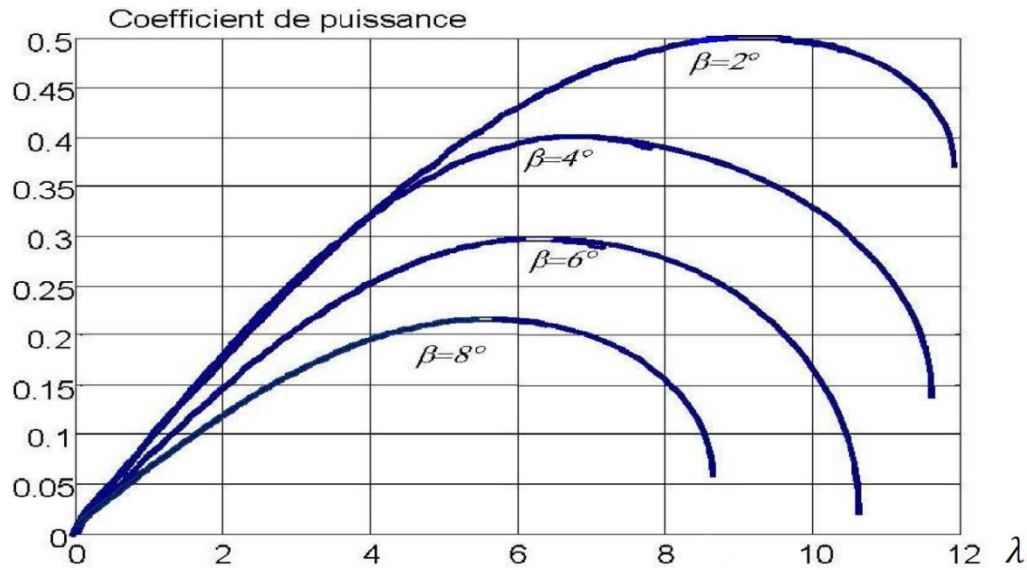


Figure III-3: Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine (λ) pour une éolienne de 1.5 MW

A partir des relevés réalisés sur cette éolienne de 1.5 MW, l'expression du coefficient de puissance est interpolée sous la forme suivante:

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.00167(\beta - 2)) \sin \left[\frac{\pi(\lambda+0.1)}{18.5-0.3(\beta-2)} \right] - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (\text{III-6})$$

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par :

$$T_{aer} = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2\Omega_t} C_p \rho S V^3 \quad (\text{III-7})$$

On peut également définir un autre coefficient dit de couple C_t qui dépend de la vitesse du vent et de la vitesse spécifique de la turbine :

$$C_t = \frac{C_p}{\lambda} = C_p \frac{V}{R\Omega_t} \quad (\text{III-8})$$

On écrit donc :

$$T_{aer} = \frac{1}{2} C_t \rho S R V^2 \quad (\text{III-9})$$

III.2.4 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur de gain G permet d'adapter les grandeurs mécaniques (vitesses et couples) de la turbine et la génératrice qui s'expriment selon les relations mathématiques suivantes :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_e}{G} \quad (\text{III-10})$$

$$T_g = \frac{T_{aer}}{G} \quad (\text{III-11})$$

Où T_g est l'effet du couple de la turbine sur l'arbre de la génératrice.

III.2.5 Equation dynamique de l'arbre de la génératrice

En ramenant les paramètres mécaniques de la turbine à l'arbre de la génératrice, on obtient le modèle défini par la relation suivante :

$$J \frac{d\Omega_e}{dt} + D\Omega_e = T_g - T_{em} \quad (\text{III-12})$$

Avec

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_e \quad (\text{III-13})$$

$$D = \frac{D_t}{G^2} + D_e \quad (\text{III-14})$$

Où :

J_t, D_t, J_e, D_e, J et D : sont respectivement l'inertie et le coefficient de frottement de la turbine, de la génératrice et ceux ramenés sur l'arbre de la génératrice.

Basée sur les équations présentées précédemment, la figure suivante peut définir un modèle physique de la turbine ayant comme entrées l'angle de calage des pales, la vitesse du vent et le couple électromagnétique fourni par la génératrice.

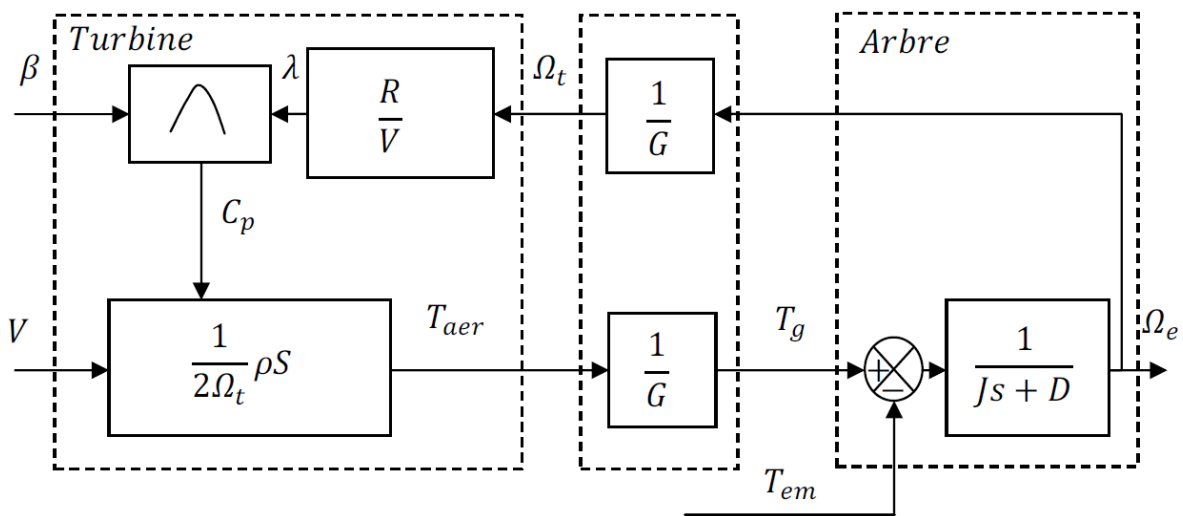


Figure III-4: Schéma bloc du modèle de la turbine.

III.3 La stratégie de commande par MLI (triangulo-sinusoïdale)

La stratégie triangulo-sinusoïdale est obtenue par la comparaison d'un signal de haute fréquence appelé porteuse (V_p) et un signal sinusoïdal de référence (V_{ref}), ce qui permet l'obtention d'une fonction logique S_x comme le montre la figure III-5.

La fonction logique S_x , associée au signal de commande est définie par :

$$S_x = \begin{cases} 1 & \text{si } V_{ref} \geq V_p \\ -1 & \text{si } V_{ref} \leq V_p \end{cases} \quad (\text{III-15})$$

$$V_{ref} \text{ et } V_p \text{ (V)} \quad (\text{III-16})$$

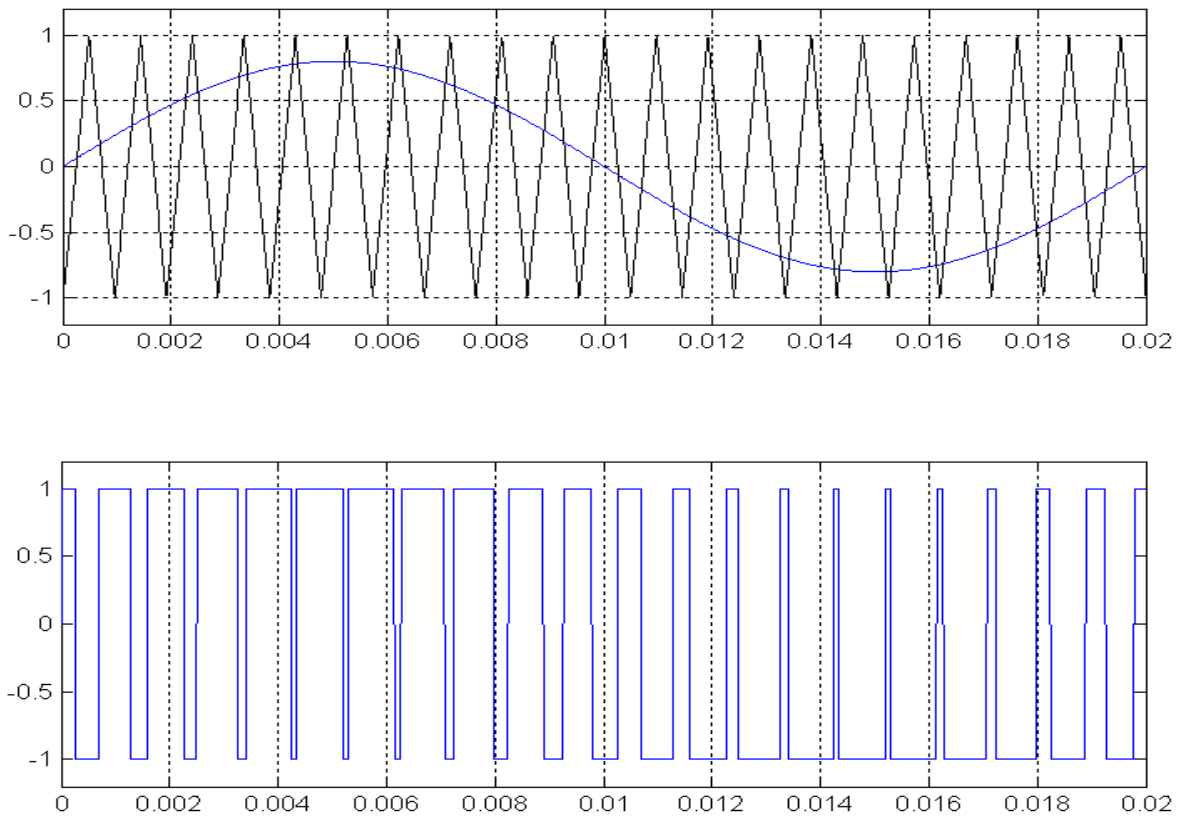


Figure III-5: Principe de la commande à MLI (stratégie triangulo -sinusoïdale).

a) Equation de la porteuse

La porteuse est un signal triangulaire caractérisé par une fréquence f_p ($T_p = 1/f_p$).

Elle est donnée par les équations suivantes [31] :

$$\begin{cases} x_1(t) = V_p \left(-1 + 4 \frac{1}{T_p} t\right) & t \in \left[0, \frac{T_p}{2}\right] \\ x_2(t) = V_p \left(3 - 4 \frac{1}{T_p} t\right) & t \in \left[\frac{T_p}{2}, T_p\right] \end{cases} \quad (\text{III-17})$$

b) Equations de la référence

La référence est un système triphasé de signaux tel que :

$$\begin{cases} v_{ra} = V_{ref} \sin \omega_{ref} t \\ v_{rb} = V_{ref} \sin(\omega_{ref} t - 2\pi/3) \\ v_{rc} = V_{ref} \sin(\omega_{ref} t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (\text{III-18})$$

Caractéristiques de la MLI

a) Indice de modulation M

C'est le rapport entre la fréquence de la porteuse et celle de la référence :

$$M = \frac{f_p}{f_{ref}} \quad (\text{III-19})$$

L'augmentation de la valeur de M conduit à un déplacement vers les fréquences élevées des harmoniques. Mais un choix judicieux de M est indispensable, car l'augmentation de ce dernier provoque en plus de l'avantage annoncé auparavant, des effets indésirables qui peuvent apparaître par l'augmentation du déchet de la tension. [31]

b) Taux de modulation T_M

C'est un coefficient de réglage de la tension, qui est égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à l'amplitude de la porteuse :

$$T_M = \frac{V_{ref}}{V_p} \quad (\text{III-20})$$

III.4 Concept et modélisation

Le schéma de principe de l'onduleur à MLI de tension, alimentant le stator d'une génératrice asynchrone est donné par la figure III-6, le point milieu de la source de tension est fictif.

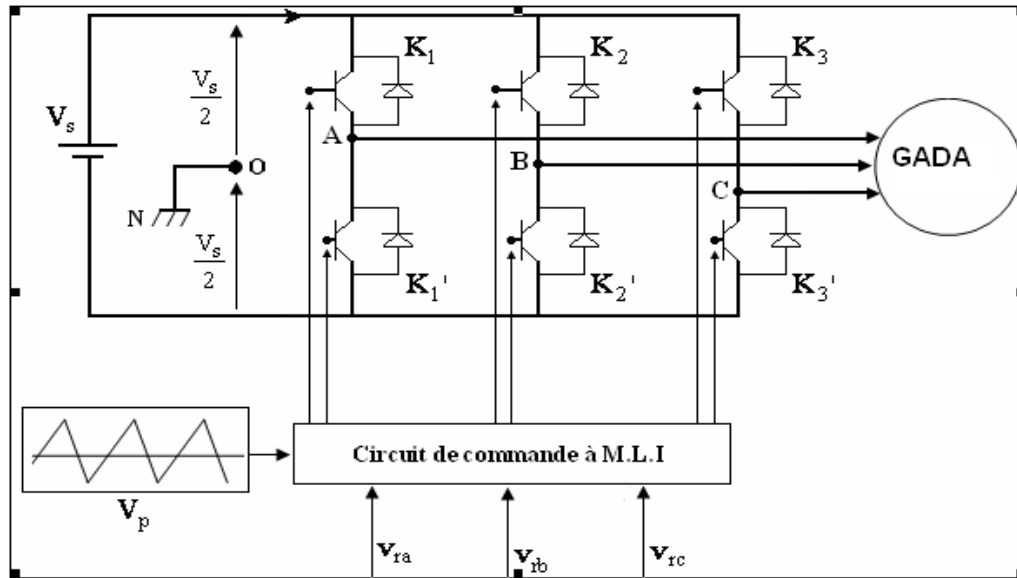


Figure III-6: Schéma de principe d'un onduleur à MLI alimentant une GADA.

Les tensions de sorties aux bornes de l'ondulation MLI sont référencées par rapport au point fictif « O » de la source de l'onduleur, ont pour expression :

$$\begin{cases} V_{AB} = V_{AO} - V_{BO} \\ V_{BC} = V_{BO} - V_{CO} \\ V_{CA} = V_{CO} - V_{AO} \end{cases} \quad (\text{III-21})$$

Sachant que $V_{AN} + V_{BN} + V_{CN} = 0$, nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} V_{AN} = V_{AO} + V_{ON} \\ V_{BN} = V_{BO} + V_{ON} \\ V_{CN} = V_{CO} + V_{ON} \end{cases} \quad (\text{III-22})$$

En faisant la somme des équations du système (III-22), on obtient :

$$V_{AN} + V_{BN} + V_{CN} = V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3V_{ON} = 0 \quad (\text{III-23})$$

D'où :

$$v_{AO} + v_{BO} + v_{CO} = -3v_{ON} \quad (\text{III-24})$$

Donc :

$$v_{ON} = -\frac{1}{3}(v_{AO} + v_{BO} + v_{CO}) \quad (\text{III-25})$$

En substituant l'équation (III-25) dans le système (III-22), il vient alors :

$$\begin{bmatrix} v_{AN} \\ v_{BN} \\ v_{CN} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{AO} \\ v_{BO} \\ v_{CO} \end{bmatrix} \quad (\text{III-26})$$

Selon la condition des interrupteurs statique (SWITCHS) 'SK' (K=A, B, C), dans une branche d'onduleur commandé par MLI, on constate :

$$v_{ra} \geq V_P \quad \Leftrightarrow \quad S_1 = 1 \quad \text{Si non} \quad S_1 = -1$$

$$v_{rb} \geq V_P \quad \Leftrightarrow \quad S_2 = 1 \quad \text{Si non} \quad S_2 = -1$$

$$v_{rc} \geq V_P \quad \Leftrightarrow \quad S_3 = 1 \quad \text{Si non} \quad S_3 = -1$$

Et les tensions de branches V_{KO} peuvent être exprimées en fonction des switchs SK par :

$$V_{KO} = S_K \cdot \frac{V_s}{2} \quad (K=A, B, C) \quad (\text{III-27})$$

On remplace V_{AO}, V_{BO}, V_{CO} dans la relation (III-26), on aura alors :

$$\begin{bmatrix} v_{AN} \\ v_{BN} \\ v_{CN} \end{bmatrix} = \frac{V_s}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III-28})$$

Le système (III-28) représente le modèle mathématique de l'onduleur

III.5 Simulation et interprétation

Afin de simuler la GADA, nous avons opté pour le logiciel MATLAB Simulink. La machine utilisée est une machine de petite puissance de 20kw. Les paramètres de la machine sont donnés en annexe.

Les allures des Figures III-27 nous permettent de voir l'évolution des différentes grandeurs électriques, magnétiques et mécaniques de la MADA. avec les hypothèses écrites au début.

Les figures montrent que toutes les grandeurs de la machine sont de régime transitoire oscillant. Les puissances active et réactive atteignent le régime permanent au bout d'un temps égal à 0.3s.

Les courants rotoriques, et les flux passent par un régime transitoire puis se stabilisent à certain valeur qui dépend, essentiellement, du régime de fonctionnement et de la nature de la machine utilisée.

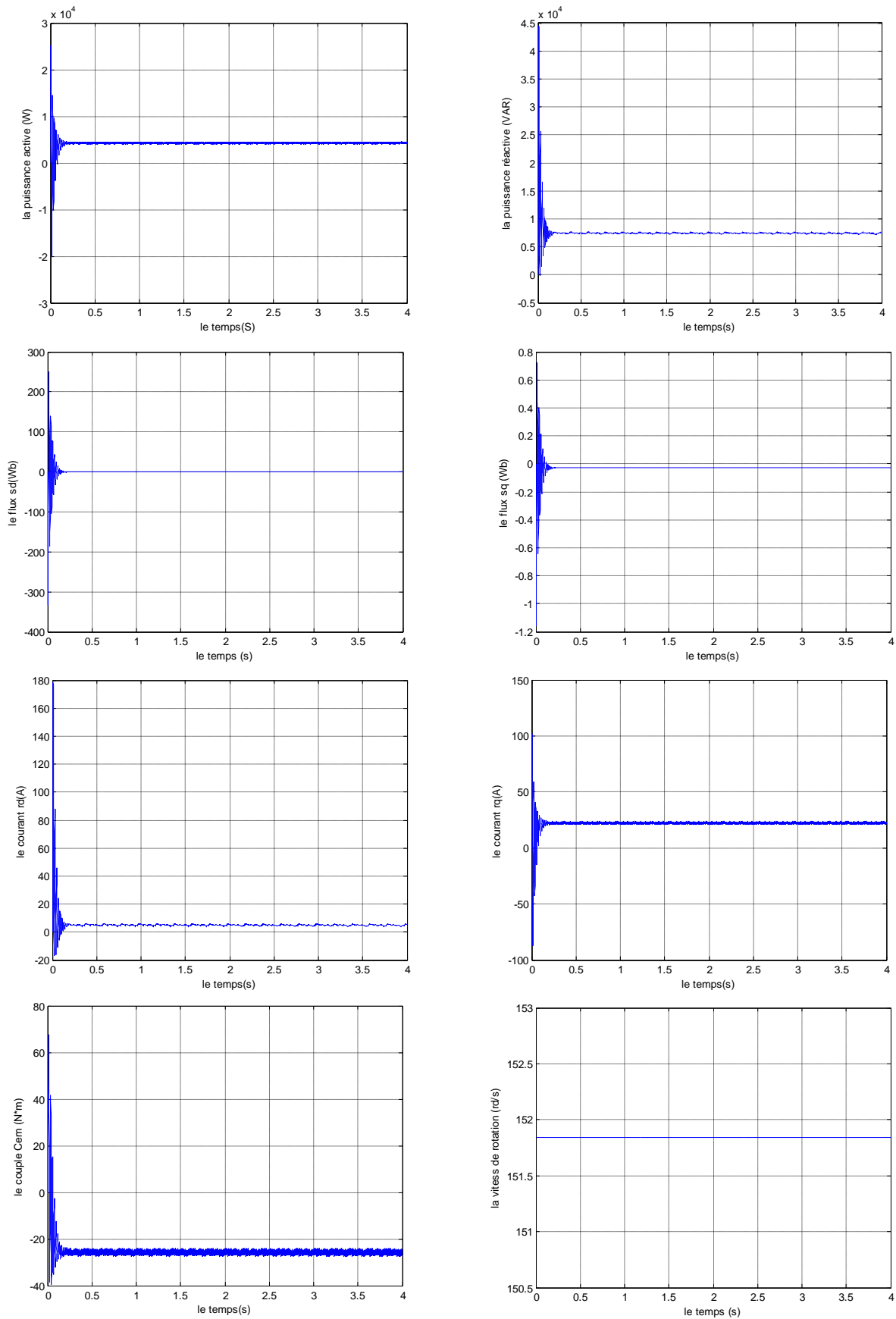


Figure III-7: Résultats de simulation de la GADA Alimentée par un onduleur tension

Conclusion

Dans ce chapitre, en première partie, on a présenté la modélisation du système éolien, basé sur la turbine et son convertisseur mécanique, le multiplicateur, et l'équation dynamique de l'arbre de génératrice.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, l'étude va traiter la commande vectorielle de la machine et convertisseurs électroniques assurant la commande rotorique de la MADA pour exploiter au mieux l'énergie disponible dans le vent, et une interprétation sur la simulation du système éolien globale basé sur la MADA.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le présent travail dans ce mémoire, a comme but de faire la modélisation d'un système éolien basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) qui est utilisée pour la grande dimension pour la production d'énergie électrique.

On a débuté notre travail par le rappelle des concepts fondamentaux de la chaîne de conversion d'énergie éolienne en énergie électrique avec un état de l'art sur les différentes associations machines électriques - convertisseurs pouvant être accouplées à une éolienne.

Par ailleurs, on a consacré l'étude à la modélisation d'une éolienne de puissance fonctionnant à vitesse variable à base d'une machine asynchrone à double alimentation. Les résultats de simulation de la génératrice asynchrone couplée à la turbine éolienne montrent un fort couplage entre la puissance active et la puissance réactive.

Pour cela on a étudié la commande vectorielle qui permet de découpler le modèle de la GADA afin de contrôler l'échange des puissances active et réactive entre la machine et le réseau. Deux méthodes sont envisagées: la commande directe et la commande indirecte. Nous avons effectué une synthèse du régulateur PI et comparé ses performances en suivi de consigne, face aux variations des paramètres de la machine. Le régulateur s'est montré le plus efficace dans le cas du contrôle indirect.

ANNEXE

Les paramètres de la machine asynchrone à double alimentation sont illustrés dans le tableau suivant :

Paramètre	Valeur
Puissance nominale	20KW
Tension nominale	380V
Fréquence nominale	50Hz
Nombre de paire de pole	2
Vitesse nominale	1450N.m
Résistance statorique	0.455Ω
Résistance rotorique	0.19Ω
Inductance statorique	0.07H
Inductance rotorique	0.0213H
Inductance mutuelle	0.034H
Moment d'inertie	0.031Kgm ²
Confisions de frottement	0.008
λ_1	300
λ_2	300
K_i	100
K_p	0.01
K_1	500
K_2	500

Références

- [1]: Sathyajith Mathew, «Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics», livre, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [2]: Adam MIRECKI, «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance», thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse le 05 avril 2005.
- [3]: Mayouf Messaoud, «contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents», mémoire de magister, université de Biskra, année 2008.
- [4]: Youcef Himri, « Optimisation de certains paramètres d'un aérogénérateur situé au sud ouest », mémoire de magister, université de Bechar, année 2005.
- [5]: Munif JOURIEH, «Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien», thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers le 20 décembre 2007.
- [6]: Ameziane Sadek « Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien », mémoire de magister, Université de Batna, Soutenu le 01/07/2009.
- [7]: Mekkaoui Naïma, « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée », mémoire de magister, Université de Batna, année 2004.
- [8] : P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, «Éoliennes », Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie mécanique, BM 4 640.
- [9]: Haritza Camblong, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable », thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Soutenu le 18 décembre 2003.
- [10]: Khettache Laid, « Etude et Commande d'un système Eolien à Base d'une Machine Electrique Double Alimentée », mémoire de magister, Université de Batna, année 2007.
- [11]: <http://www.planete-energies.com/>
- [12] : Redjem Radia, «Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne», mémoire de magistère, université mentouri de constantine, soutenu le : 04 /07/2009.
- [13] : F.POITIERS, «Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome; Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2003.
- [14] : S. Heier, «Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems», Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998.
- [15] : khaled Hamouda, «Modélisation et commande vectorielle d'un système éolien basé sur un générateur asynchrone à double alimentation», mémoire de master en physique énergétique, université d'Adrar, soutenu le : 05 /12/2013.
- [16] : ADEDOUGA, «Contrôle des puissances active et réactive de la machine asynchrone à double alimentation (DFIM) », Thèse de doctorat en électrotechnique, Université de Batna, 02Fervrier 2010.

- [17] : L. Refoufi, B.A.T. Al Zahawi, A.G. Jack "Analysis and modelling of the steady state behavior of the static Kramerinduction generator", IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume 14, Issue 3, 1999, pp 333-339.
- [18] : G.A.Smith, K.A. Nigim, "Wind-energy Recovery by a Static Scherbius Induction Generator", Proc. IEE, 1981, 128, pp. 317-324.
- [19] : N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, "Power Electronics, Converters, Applications and design", Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-58408-8.
- [20] : SALMA EL AIMANI, « Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension », Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Lille (ECL) Co habilité avec l'Université des Sciences et Technologies de Lille 1 (USTL), décembre 2004.
- [21] : G.SEGUIER, « Electrotechnique industrielle », éditions TEC & DOC, pp 513-514.2002.
- [22] : S.DRID. « Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'une machine à induction double alimentée à flux orienté avec optimisation de la structure d'alimentation ». Université de Batna. Thèse de doctorat 2005.
- [23] : Elbia Youcef, « Commande floue optimisée d'une machine asynchrone à double alimentation et à flux orienté », mémoire de magister, université de Batna, Soutenu le 15/06/2009.
- [24] : A.BOYETTE. « Contrôle –Commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne ». Université Henri Poincaré, Nancy I. Thèse de doctorat 2006.
- [25] : AKKARI Nadia, « Contribution à l'amélioration de la commande d'une machine asynchrone à double alimentation », mémoire de magister, université de Batna, Soutenu le 02/06/2010.
- [26] : G.SALLOUM, « Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation », G.E.E.T Thèse de doctorat, 2007.
- [27] : M.ABBAS et M. MECHENTEL, «Modélisation et commande d'une MADA alimentée par une cascade à trois niveau. Application à l'énergie éolienne », ENP, Thèse de PFE, 2006.
- [28] :B.BOUSSIALA et M.IDOUGH, « Commande vectorielle de la machine synchrone autopilotée à pôles saillants par un onduleur trois niveaux commandé en tension » Ecole nationale polytechnique. Thèse de PFE 2006.
- [29] : F .POITIERS, « ETUDE ET COMMANDE DE GENERATRICE ASYNCHRONE POUR L'UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE »
 _Machine asynchrone à cage autonome
 _Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau
 Université de Nantes Thèse de doctorat 2003
- [30] H. Camblong, « Minimisation de l'Impact des Perturbations d'Origine Eolienne dans la Génération d'Electricité par des Aérogénérateurs à Vitesse Variable », Thèse de Doctorat en Automatique, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, France, 2003.
- [31] : K.AMAMRA et A.BENYAMINA, « Commande par mode de glissement avec observateur d'un moteur asynchrone alimenté en tension » UHBBC, Thèse de PFE 2005.