

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA
BADJI MOKHTAR –ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار- عنابة

Faculté :Sciences de l'Ingéniorat

Département : Électrotechnique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Électrotechnique

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de LICENCE

Thème :

Analyse et exploitation l'énergie éolienne

Présentées Par:

- Boukhalfa Rayane
- Boukhalfa Nesrine

Encadrant : KSENTINI Abdelhamid

Grade : MCB

Université : UBMA

Jury de Soutenance:

Pr : ABDERRZAK Abdallah

Année Universitaire : 2019/2020

Dédicace :

*C'est avec profonde gratitude et sincères mots,
que nous dédions ce modeste travail de fin d'étude
à nos chers parents ; qui ont sacrifié leur vie pour
notre réussite et nous ont éclairé le chemin par
leurs conseils judicieux.*

*Nous espérons qu'un jour, nous pourrons leurs
rendre un peu de ce qu'ils ont fait pour nous, que
dieu leurs prête bonheur et longue vie.*

*Nous dédions aussi ce travail a nos familles, mes
amis, tous nos professeurs qui ont enseignent et à
tous ceux qui nous sont chers*

Remerciement

Grace à dieu, nous avons terminé ce modeste

Travail, qu'absolument à remercier

A tous ceux qui ont participé, aidé encourage à son

Élaboration de près ou de loin

Nos remerciement les plus vifs sont adressés au

Dr : ksentini abdelhamid

Pour avoir accepté de diriger ce travail et qui par esprit ouvert, sa disponibilité et ses conseils son précieuse,

A si nous faire partager son gout pour la recherche

Nous tenons également à exprimer notre jury le
professeur : *ABDERREZAK Abdallah*

Qui nous honorer par leur présence.

En fin, sans oublier de remercier tous ceux qui nous

Encouragé modeste travail.

Sommaire

Sommaire	I
Liste des Figurs	IV
Liste des abréviations	VII
Résumé	IX
Introduction générale	1

Chapitre 1 : Généralité sur les énergies renouvelables

I.1.Introduction.....	03
I.2.Historique	04
I.3.Energie renouvelables	04
I.4.Différentes types de l'énergie renouvelables	05
I.4.1.Energie hydraulique	06
I.4.1.1.hydrolienne	06
I.4.1.2.Marémotrice	07
I.4.1.3.Barrages hydrauliques	07
I.4.2.Energie de la biomasse	08
I.4.2.1.Les biocarburants	08
I.4.2.2.Bioéthanol	09
I.4.2.3.Biogaz ou méthanisation.....	09
I.4.3.Energie géothermique	09
I.4.4.Energie solaire	10
I.4.4.1.L'énergie solaire thermique	10
a) Chauffe eau solaire	11
b) Le capteur parabolique	12
c) Le capteur cylindro parabolique	13
I.4.4.2.Energie photo voltaïque.....	13
I.4.5.Energie éolienne.....	14
I.5.Conclusion	14

Chapitre 2 : L'énergie éolienne

II.1.Introduction	15
II.2.La production éolienne	16

Sommaire

II.3.Définition de l'énergie éolienne	16
II.4.Principe de fonctionnement d'une éolienne	17
II.5.Les différent type des turbines éoliennes	17
II.5.1.Les éoliennes a axe vertical.....	17
a) DARRIEUS.....	18
b) SAVONIUS.....	19
II.5.2.Les éoliennes a axe horizontal	19
II.6.Principaux composant d'une éolienne	20
A- Le mât	21
B- La nacelle	21
C- Le Rotor	21
C-1- Les rotors à vitesse fixe variable	21
C-2- Les rotors à vitesse	21
II.7.Protection contre la corrosion	22
II.8.Energie cinétique du vent	22
II.9.Étude comparative des machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne	25
II.9.1.Type de machines électriques	25
II.9.1.1.Générateur synchrone.....	25
II.9.1.2.Générateur asynchrone.....	26
A) Machine asynchrone à cage d'écureuil	26
B) Machine asynchrone à double alimentation.....	29
a-Structure des machines asynchrones à double alimentation.....	29
a.1-double alimentation par le stator.....	30
a.2-Double alimentation par le stator et le rotor.....	31
b-Applications des asynchrones à double alimentation	32
c-Fonctionnement en génératrice à vitesse variable	32
d-Fonctionnement à vitesse fixe.....	34
e-Intérêt de la MADA	34
II.10.Conclusion.....	35

Sommaire

Chapitre 3 : Modélisation du Système

III.1.Introduction.....	36
III.2.Hypothèses simplificatrices	36
III.3.Modélisation des machines asynchrones à double alimentation.....	36
III.3.1.Modèle et identification des paramètres de la machine	37
a- équations électriques	38
b- équations des flux	38
c- L'équation mécanique	39
III.4.Changement de repère	39
III.5.La transformation de Park	39
III.6.Modélisation de l'onduleur	41
III.7.Modélisation de la turbine éolienne.....	45
III.7.1.Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine.....	45
III.7.2.Modélisation de la turbine	46
III.7.3.Modélisation du multiplicateur	48
III.7.4.Equation dynamique de l'arbre	48
III.8.Schéma de la simulation.....	50
III.9.Résultats de la simulation	51
III.10.Interprétation	54
III.11.Conclusion	54
Conclusion Générale.....	55
Référence	56

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur les énergies renouvelables

Figure I.1 : Energies Renouvelables	03
Figure I.2 : Sources D'énergie utilisée dans le monde	05
Figure I.3 : schéma de différentes énergies renouvelables	05
Figure I.4 : Energie hydraulique	06
Figure I.5 : L'énergie Hydrolienne	06
Figure I.6 : l'énergie marémotrice	07
Figure I.7 : Barrage hydraulique	07
Figure I.8 : Énergie de la biomasse	08
Figure I.9 : Energie Les biocarburants végétale	08
Figure I.10 : le Bioéthanol	09
Figure I.11 : Energie géothermique	10
Figure I.12 : Energie solaire	10
Figure I.13 : Energie solaire	11
Figure I.14 : chauffe eau solaire.....	11
Figure I.15 : Le capteur parabolique	12
Figure I.16 : Capteur cylindro parabolique	13
Figure I.17 : Photo voltaïque	13
Figure I.18 : Energie éolienne	14

Chapitre II : L'énergie éolienne

Figure II.19 : Conversion de l'énergie cinétique du vent	16
Figure II.20 : Eolienne à axe vertical	18
Figure II.21 : Eoliennes à axe vertical darious	18
Figure II.22 : Eoliennes à axe vertical Savonuis	19
Figure II.23 : Eolienne à axe horizontal	20
Figure II.24 : Differnetes composante d'une eolienne à axe horizontale	22
Figure II.25 : Tube de courant autour d'une éolienne	23
Figure II.26 : Coefficient de puissance	24
Figure II.27 : Coefficient de puissance pour les différents types d'éoliennes	24
Figure II.28 : Machine synchrone connectée directement au réseau	26

Liste des figures

Figure II.29 : Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.....	26
Figure II.30 : Caractéristique couple- vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles.....	27
Figure II.31 : Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.....	28
Figure II.32 : Eolienne connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance	28
Figure II.33 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA	29
Figure II.34 : Cascade hypo synchrone	30
Figure II.35 : Machine asynchrone à double bobinage statorique	30
Figure II.36 : Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor	31
Figure II.37 : Schéma de la machine asynchrone à rotor bobiné avec des bagues collectrices.....	32
Figure II.38 : Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation	33

Chapitre III : Modélisation du système

Figure III.39 : Représentation de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique.....	36
Figure III.40 : Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné	37
Figure III.41 : Représentation de la machine asynchrone triphasée dans le repère de Park	40
Figure III.42 : Schéma d'un onduleur de tension.....	42
Figure III.43 : Représentation les signaux de l'entrée du commande MLI	43
Figure III.44 : Représentation les signaux de sortie du commande MLI.....	44
Figure III.45 : Représentation la tension de l'onduleur	44
Figure III.46 : Système mécanique de l'éolienne	45
Figure III.47 : Modèle mécanique simplifiée de la turbine	46
Figure III.48 : Schéma de la turbine éolienne	46
Figure III.49 : Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine ..	47

Liste des figures

Figure III.50 : Schéma bloc du modèle de la turbine	49
Figure III.51 : schéma de simulation, en SIMULINK sous MATLAB, du modèle de la MADA dans le repaire lié au stator	50
Figure III.52 : Evolution du couple électromagnétique en fonction du temps (ce=6.4N/m).....	51
Figure III.53 : Evolution de la vitesse en fonction du temps.....	51
Figure III.54 : Courants statoriques à la sortie de la génératrice dans la référence lié au stator	52
Figure III.55 : Tensions statoriques à la sortie de la génératrice dans la référence liée au stator.....	52
Figure III.56 : tensions rotoriques de la génératrice dans la référence lié au stator.....	53
Figure III.57 : courants rotoriques de la génératrice dans la référence lié au stator	53

Liste des abréviations

<p>GES : Gestion Des Energies Renouvelables ER : Energie renouvelable</p>	<p>Chapitre 1</p>
<p>MADA : Machine à double alimentation V_1 : Vitesse du vent en amont V_2 : Vitesse du vent en aval ρ : La densité d'air S : La surface active de la voileure m : La masse d'aire en mouvement P_m : La puissance extraite du vent P_{mt} : La puissance totale théorique C_p : Le coefficient de puissance λ : La vitesse relative P_{max} : La puissance maximale R : Le rayon de la voileure Ω_1 : La vitesse de rotation avant multiplicateur Ω_2 : La vitesse de rotation après multiplicateur P_{mg} : La puissance mécanique disponible sur l'arbre du générateur g : Le glissement ρ : La puissance transmise entre le stator et le rotor</p>	<p>Chapitre 2</p>
<p>Fmm : La force magnétomotrice V_{sa} : La tension à la phase statorique a V_{sb} : La tension à la phase statorique b V_{sc} : La tension à la phase statorique c V_{ra} : La tension à la phase rotorique a V_{rb} : La tension à la phase rotorique b V_{rc} : La tension à la phase rotorique c R_s : La résistance statorique R_r : La résistance rotorique I_{sa} : L'intensité de courant à la phase statorique a I_{sb} : L'intensité de courant à la phase statorique b I_{sc} : L'intensité de courant à la phase statorique c Φ_{sa} : Le flux statorique à la phase a Φ_{sb} : Le flux statorique à la phase b Φ_{sc} : Le flux statorique à la phase c Φ_{ra} : Le flux rotorique à la phase a Φ_{rb} : Le flux rotorique à la phase b Φ_{rc} : Le flux rotorique à la phase c $[L_S]$: La matrice de l'inductance propres statorique $[L_r]$: La matrice de l'inductance propres rotorique $[M_{sr}]$: Mutuelle inductance entre les deux bobi Γ_e : Le couple électromagnétique Γ_c : Le couple résistant</p>	<p>Chapitre 3</p>

Liste des abréviations

<p> J : L'inertie Ω : La vitesse mécanique du rotor ω_r : Pulsation des courants rotorique P : Le nombre de paire de pole V_{sd}, V_{sq} : Les tensions statorique en composante directs et en quadrature V_{rd}, V_{rq} : Les tensions rotorique en composante directs et en quadrature $[p(\theta)]$: La matrice de park. modifie $[p(\theta)]^{-1}$: La matrice de park modifie inverse Φ_{sd}, Φ_{sq} : Le flux statorique en composante directs et en quadrature Φ_{rd}, Φ_{rq} : Le flux rotorique en composante directs et en quadrature R : Longueur d'une pales $\Omega_{turbine}$: La vitesse de la turbine G : Gain du multiplicateur K_b : Coefficient d'élasticité f_{pale} : Le coefficient de frottement des pales D_h : Le coefficient de frottement des pales par rapport au multiplicateur C_g : Le couple transmis par le rotor T_{b1} : Forces de poussées β : L'angle de l'orientation des pales C_{aer} : Le couple aérodynamique p_{aer} : La puissance aérodynamique Ω_{mec} : La vitesse mécanique J_g : l'inertie de la génératrice $J_{turbine}$: L'inertie de la turbine C_{mec} : Le couple mécanique C_{vis} : Le couple des frottements visqueux f : Le coefficient de frottement </p>	
---	--

Résumé

ملخص :

تحتاج المناطق المعزولة إلى الطاقات المتجددة التي تمكننا من إنتاج الطاقة الكهربائية، تؤدي إلى توزيع الكهرباء لتحسين مستواهم المعيشي. في هذه المذكرة قمنا بدراسة كل أنواع الطاقة المتجددة، الطاقة الشمسية، الطاقة الهوائية..... إلخ، وقد خصصنا في دراستنا هذه الطاقة الهوائية التي نتطرق إليها بالتفصيل في المحاور الثلاثة.

الكلمات المفتاحية : الطاقة الهوائية، مولد، محول الطاقة، محرك متزامن، مروحة.

Résumé :

Les sources d'énergie renouvelable, permettant une production décentralisée de l'électricité, peuvent contribuer à résoudre le problème de l'électrification des sites isolés où un grand nombre d'individus est dépourvu de tout apport énergétique, ne pouvant ainsi satisfaire aucun besoin même minime et améliorer ses conditions de vie.

Mots clés : les énergies renouvelables, éolienne, le vent, génératrice asynchrone à cage, turbine.

Abstract :

Renewable energy sources, allowing decentralized production of electricity, can

Résumé

help to solve the problem of electrification of isolated sites where a large number of people are deprived of any energy input, thus not being able to meet any need even minimal and improve their living conditions.

Key words : renewable energies, wind turbine, wind, asynchronous cage generator, turbine.

Introduction générale

Depuis l'éclatement du sujet de l'échauffement terrestre et de la préoccupation mondiale pour la protection de l'environnement. Le développement durable est devenu une notion qui accompagne avec consistance toutes les filières industrielles et économiques et marque tous les nouveaux projets. Dans le secteur de l'énergie électrique, le monde entier cherche à réduire considérablement sa dépendance aux énergies de source fossile, se caractérisant à la fois par une forte émission de gaz à effet de serre et par des prix instables. Les opérateurs du secteur de l'énergie électrique s'acharnent à diversifier leur bouquet énergétique plus spécialement par une énergie propre et renouvelable de source géothermique, biomasse, solaire ou éolienne.

Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse à la filière éolienne qui semble une des plus prometteuses avec un taux de croissance mondial très élevé, même si l'Algérie reste « à la traîne » dans ce secteur. **11**er ferme éolienne d'Adrar d'une capacité de 10 mégawatts projet pilote.

Dans notre travail en s'intéresse à l'étude et la simulation d'une éolienne à base d'une machines asynchrone à doublement alimentée (MADA) qui sont la plus répondues pour la production de l'énergie électrique d'origine éolienne, sur tous dans des régions isolée.

Nous avons choisi la machine asynchrone à double alimentation (MADA) qui présente plusieurs avantages en comparaison avec la machine à cage, elle permet d'avoir une plage de vitesse de rotation variant de 30% autour de la vitesse de synchronisme, en plus le contrôle des tensions rotoriques nous permet de commander indépendamment les puissances actives et réactives.

Différentes stratégies de commande sont décrites dans le but de contrôler la puissance aérodynamique de la turbine, et limiter cette puissance lorsque la vitesse du vent devient trop élevée. Le système de contrôle le plus répandu des éoliennes traditionnelles directement connectées au réseau électrique de distribution, est basé principalement sur la technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT), Nous présenterons dans ce travail la stratégie de commande MPPT sans mesure de vitesse du vent.

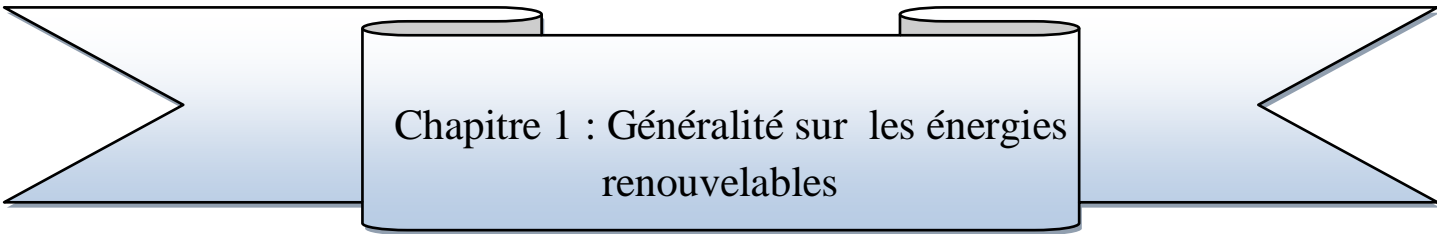
Introduction générale

Dans le 1^{er} chapitre, traite une présentation détaillée des différentes sources d'énergies renouvelables.

Le deuxième chapitre traite l'aspect des énergies éoliennes ; principe de conversion pour la production électrique, ces différents types, leur rendement par la limite de BETZ, en fin les principaux technologies des aérogénérateurs.

Le 3^{ème} chapitre introduit la modélisation d'une chaîne de conversion éolienne basée sur ne génératrice à double alimentation ; il est effectuée dans un repaire diphasé lié au champ statorique, ensuite une modélisation d'un onduleur de tension contrôlés par MLI est effectuée et enfin une modélisation détaillée de la turbine éolienne.

La dernière partie de ce chapitre présente les résultats de simulation qui nous permettrons de passer à la commande.



Chapitre 1 : Généralité sur les énergies
renouvelables

Généralité sur les énergies renouvelables

I-1-Introduction

On considère comme renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considéré comme inépuisable à l'échelle de l'homme mais aussi dans certains cas de l'humanité.

Aujourd'hui, on assimile souvent les énergies renouvelables aux énergies propres et non polluantes. Car ces énergies sont beaucoup moins « sales » que les énergies fossiles.

Les sources d'énergies renouvelables présentent l'avantage d'être disponibles en quantité illimitée.

Leur exploitation répond aux besoins en énergies tout en préservant l'environnement. Les formes principales d'énergies renouvelables sont l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie biomasse, l'énergie géothermique et l'énergie hydraulique. Chacune d'entre elle s'est vue fixer un objectif quantitatif pour 2020 en France, dans le cadre du Grenelle de l'environnement.

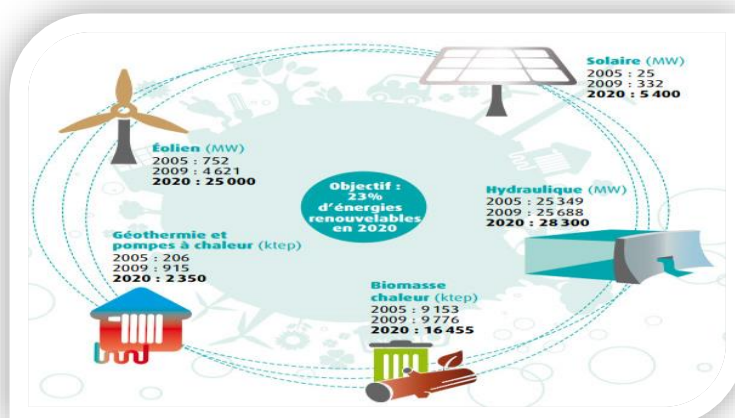


Fig I.01 Energies Renouvelables

Généralité sur les énergies renouvelables

I-2-Historique

L'utilisation des énergies renouvelable n'est pas nouvelle. Celles-ci sont exploitées par l'homme depuis la nuit des temps. Autrefois, moulins à eau, à vent, bois de feu, traction animale, bateaux à voile ont largement contribué au développement de l'humanité. Elles constituaient une activité économique à part entière, notamment en milieu rural ou elles étaient aussi importantes et aussi diversifiées que la production alimentaire.

Mais dans les pays industrialisés, des le XIXème siècle, elle furent progressivement marginalisées aux profils d'autres sources d'énergie que l'on pensait plus prometteuses. Depuis lors, la pollution atmosphérique, le réchauffement climatique, les risques du nucléaire et les limites des ressources ont fait prendre conscience qu'un développement économique respectueux de l'environnement, dans lequel nous vivons, est nécessaire.

Les chocs pétroliers successifs depuis les années 70 ont démontré les risques économiques et géopolitiques de la production d'énergie reposant sur l'exploitation des ressources fossiles, dont les réserves sont mal réparties et épuisables.

De plus, une grande partie du monde ne sera sans doute jamais raccordée aux réseaux électriques dont l'extension s'avère trop coûteuse pour les territoires isolés, peu peuplés ou difficiles d'accès. Même au sein de l'Europe occidentale de tels « sites isolés » ne sont pas exceptionnels. Actuellement deux milliards et demi d'habitant, principalement dans les zones rurales des pays en développement, ne consomment que 1% de l'électricité produite dans le monde.

I-3- Energie renouvelables

Les énergies renouvelables (ER) utilisent des flux inépuisables d'énergies d'origine naturelle (soleil, vent, eau, croissance végétale...). Ces énergies de l'avenir ne couvrent pourtant que 22% de la consommation mondiale d'électricité avec l'importance de l'hydroélectricité qui représente les trois quarts de l'électricité issue des ER. Les principaux intérêts des énergies renouvelables sont leur non épuisement et leurs émissions très limitées de gaz à effet de serre (GES) comme en témoigne l'analyse du cycle de vie de leur exploitation. Évaluation des émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie pour les grandes catégories de technologies de production d'électricité par :

- Hydraulique (Eau : turbines).
- Biomasse (bois CO₂ de combustion = CO₂ de la croissance des arbres: photosynthèse).
- Energie géothermique.
- Solaire (thermique et photovoltaïque)
- Eolienne (Vent) [1].

Généralité sur les énergies renouvelables

Aujourd'hui, les énergies renouvelables représentent 13,5 % de la consommation totale d'énergie comptabilisée dans le monde et 18,9 % de la production mondiale d'électricité pendant que les autres sources d'énergie continuent à se tailler la part du lion (67,6% pour les énergies fossiles et 13,5% pour le nucléaire).

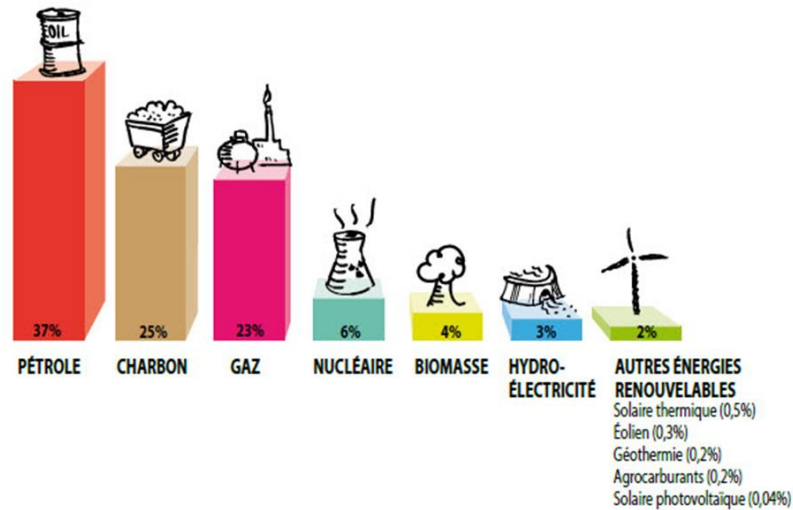


Fig I.02 Sources D'énergie utilisée dans le monde

I-4-Différentes types de l'énergie Renouvelable

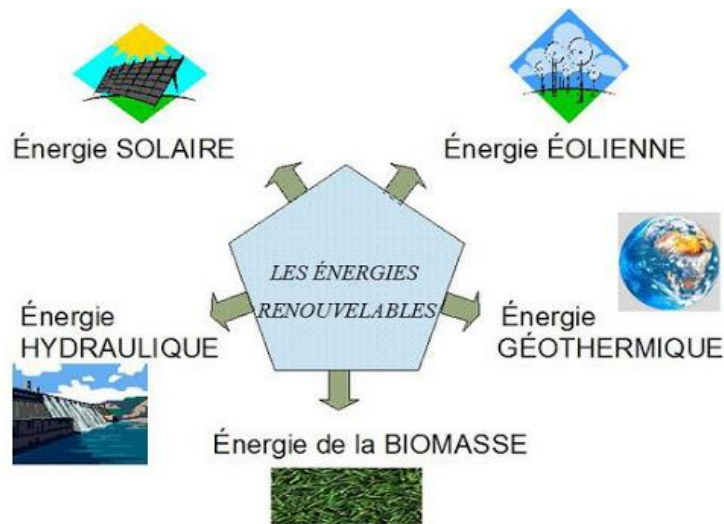


Fig I.03 schéma de différentes énergies renouvelables

Généralité sur les énergies renouvelables

I-4-1-Energie hydraulique

L'énergie hydraulique est l'énergie mise en jeu lors du déplacement ou de l'accumulation d'un fluide incompressible telle que l'eau douce ou l'eau de mer .Ce déplacement va produire un travail mécanique qui est utilisé directement ou converti sous forme d'électricité (Marémotrice ; Hydrolienne, Barrage).

Une centrale hydraulique est composée de 3 parties :

- le barrage qui retient l'eau
- la centrale qui produit l'électricité
- Les lignes électriques qui évacuent et transportent l'énergie électrique.

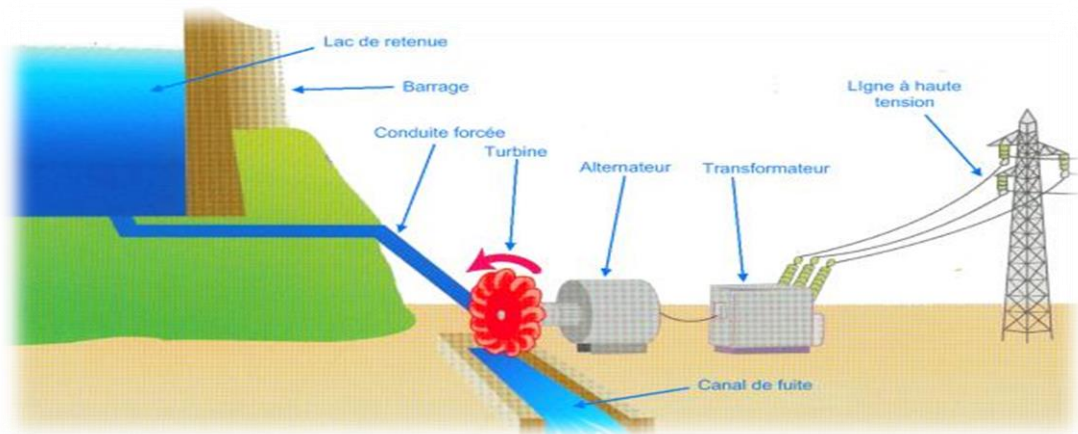


Fig I.04 Energie hydraulique

I-4-1-1- Hydrolienne

Les sortes d'hydroliennes anglais de (Sea Genont) ont une capacité de 1,2MW. Les courants marins représentent une énergie fabuleuse qui contrairement aux vents sont constants et prévisibles.

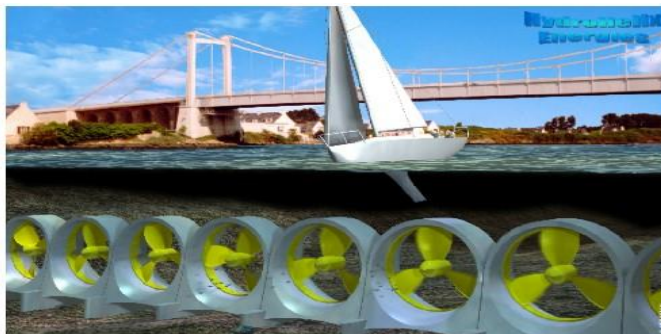


Fig I.05 L'énergie Hydrolienne

Généralité sur les énergies renouvelables

I-4-1-2-Marémotrice

L'usine marémotrice de la Rance (la France) est une centrale électrique tirant son énergie de la force de la marée.



Fig I.06 l'énergie marémotrice

I-4-1-3-Barrages hydrauliques

Le 1/5 des besoins en énergie totaux de la terre sont couverts par l'énergie hydraulique. Elle est produite dans le monde entier par environ 45.000 barrages.



Fig I.07 Barrage hydraulique

Généralité sur les énergies renouvelables

I-4-2- Énergie de la biomasse

Dans le domaine de l'énergie, le terme de biomasse regroupe l'ensemble des matières organiques pouvant devenir des sources d'énergie. Comprend trois familles principales:

-Le biogaz ou La méthanisation.

-Les bois énergie ou biomasse solide.

-Les granules de bois sont le combustible au rendement le plus élevé de la gamme (Viessmann)

Le bois peut être considéré comme une énergie renouvelable tant que le volume prélevé ne dépasse pas l'accroissement naturel de la forêt 1 mètre cube, pour un contenu énergétique de 1500 à 2000kWh.



Fig I.08 Énergie de la biomasse

I-4-2-1-Les biocarburants

Un biocarburant est un carburant produit à partir de matériaux organiques.

Les trois principales catégories sont : Huile- végétale –carburant Dès 1891, Rudolph Diesel, convaincu que l'huile végétale est utilisable au même titre que le pétrolée et le charbon. Peut être mélangé avec le diesel.



Fig I.09 Energie Les biocarburants végétale

Généralité sur les énergies renouvelables

I-4-2-2-Bioéthanol

Fabriqué à partir du saccharose (betterave, canne à sucre...) ou de l'amidon (blé, maïs...) par fermentation.

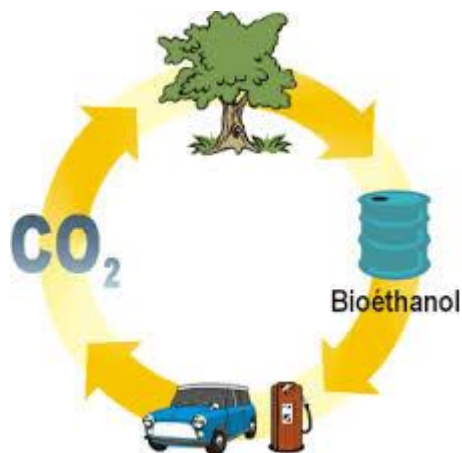


Fig I.10 le Bioéthanol

I-4-2-3-Biogaz ou Méthanisation

La méthanisation est un procédé biologique de transformation de la matière organique en biogaz, par l'action de bactéries en absence de l'oxygène: nous parlons de «digestion anaérobie» ou nous utilisons des matières premières:

Déchets organiques des communes: les poubelles des ménages.

Déchets organiques industriels: agro-alimentaire, abattoirs.

Déchets agricoles: lisier, fumier et les résidus de récolte.

Sous-produits de processus industriels: glycérine.

I-4-3-Energie géothermique

La géothermie consiste à capter la chaleur contenue dans la croûte terrestre pour produire du chauffage ou de l'électricité. Nous caractérisons 3 types d'énergie :

- La géothermie à haute énergie.
- La géothermie à basse énergie.
- La géothermie à très basse énergie.

Généralité sur les énergies renouvelables



Fig I.11 Energie géothermique

I-4-4- Energie solaire

Le soleil, bien que distant de plus de 150 millions de kilomètres de nous, demeure notre plus grande source d'énergie même si elle est intermittente avec l'alternance jour / nuit... La source d'énergie renouvelable la plus abondante est sans aucun doute l'énergie solaire. Le Soleil envoie sur Terre une puissance de 90.000 térawatts (TW), à comparer aux 14 TW consommés par la population mondiale, et va continuer à le faire pendant quelques milliards d'années. Cependant, en raison de son caractère intermittent et de sa faible densité, il est capital de pouvoir stocker et concentrer cette énergie solaire sous forme de carburant [2].

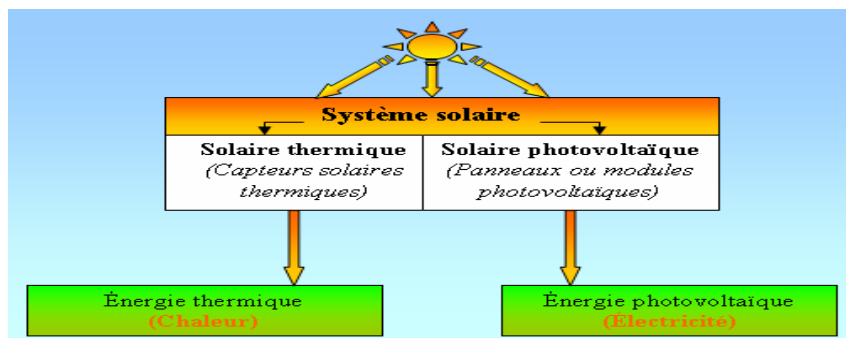


Fig I.12 Energie Solaire

I-4-4-1-L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique est connue depuis les balbutiements de l'humanité. Elle traite simplement à la chaleur du rayonnement solaire, ou pour utiliser le langage des physiciens, à l'énergie calorifique transportée par le rayonnement solaire.

Généralité sur les énergies renouvelables

Précisons d'ailleurs que cette énergie, combinée à l'existence d'une atmosphère autour de notre bonne vieille terre, nous vaut, grâce à ce qu'on appelle l'effet de serre, une température moyenne favorable à la vie, cette température constituant, avec la pression atmosphérique, la présence d'oxygène et d'eau l'ensemble des conditions de la vie terrestre.



Fig I.13 Energie solaire

a) chauffe eau solaire

L'énergie solaire est principalement utilisée pour le chauffage de l'eau sanitaire et le chauffage de bâtiments.

Le principe de fonctionnement:

Le rayonnement solaire est reçu par un absorbeur qui à son tour chauffe soit un fluide caloporteur soit l'eau directement.

Un vitrage est placé devant l'absorbeur, ainsi le rayonnement est « capturé » : en d'autres termes, c'est l'effet de serre.



Fig I.14 chauffe eau solaire

Généralité sur les énergies renouvelables

b) Le capteur parabolique

Le capteur parabolique obéit aux mêmes lois physiques que ce qu'il est convenu d'appeler paraboles, (en fait des paraboloïdes) et qui sont des antennes paraboliques destinées à recevoir et à concentrer les ondes électromagnétiques émises par les satellites de communication en un point appelé foyer, et qui ont l'avantage obligatoire d'être géostationnaires et de ne nécessiter qu'un seul alignement définitif.

Dans le cas d'un capteur parabolique solaire, le problème est la nécessité d'orienter ce capteur vers le soleil dans sa course. Un asservissement électronique est alors nécessaire et des dispositifs idoines existent. Le (très) gros avantage est la température énorme qui est atteinte par un tel capteur.

La réflexion vers le foyer sera d'autant plus efficace que le miroir qui tapisse le capteur sur sa face ensoleillée sera de bonne qualité. Pour prendre un exemple, les résultats seront plus probants avec de vrais miroirs qu'avec des feuilles d'aluminium.

Un bricoleur averti peut sans trop de problèmes construire une « cocotte solaire ou autocuiseur solaire » sur une parabole.

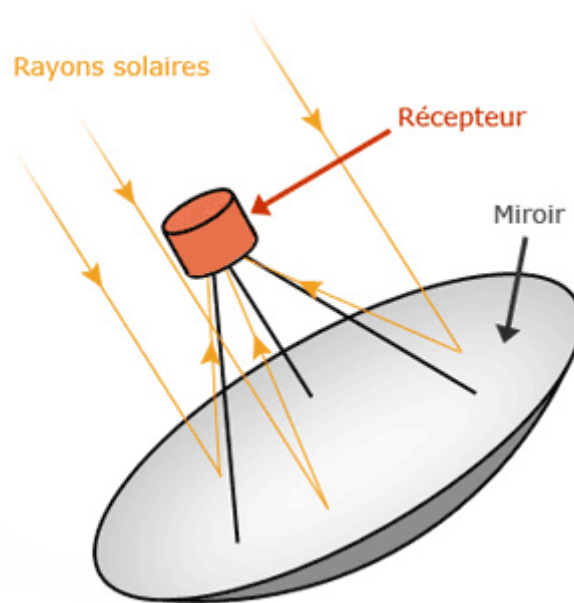


Fig I.15 Le capteur parabolique

Généralité sur les énergies renouvelables

c) Le capteur cylindro parabolique

Un moyen terme intéressant est celui du capteur cylindro-parabolique. Dans cette configuration, le foyer, qui était grosso modo un point dans le capteur parabolique, devient une ligne dans le capteur cylindro parabolique. Les rayons du soleil seront réfléchis par le capteur vers une même ligne horizontale qui serait donc l'endroit d'établissement d'un tuyau qui renfermerait le fluide caloporteur. Là encore nous pouvons atteindre des températures de 300 degrés

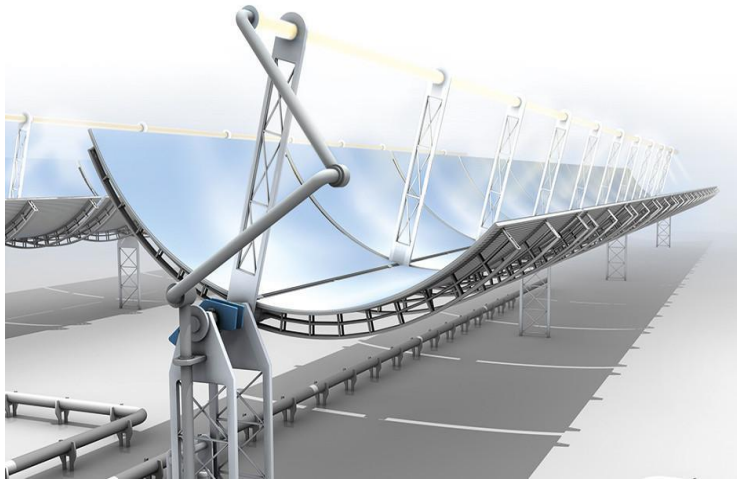


Fig I.16 Capteur cylindro parabolique

I-4-4-2- L'énergie Photo voltaïque

Produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque.

Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module). Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire sont appelés champ photovoltaïque.



Fig I.17 Photo voltaïque

Généralité sur les énergies renouvelables

Outre l'utilisation de la composante calorifique du rayonnement solaire, la nature utilise couramment des effets physiques plus sophistiqués. Ainsi la photosynthèse utilise l'énergie lumineuse pour produire de la matière organique, plus particulièrement de la matière végétale. Ce processus fait intervenir les photons, ou grains de lumière, et leur énergie. Pour absorber ces photons la nature a doté les végétaux de pigments et le plus répandu de ces pigments est la chlorophylle [3].

I-4-5- Energie Eolienne

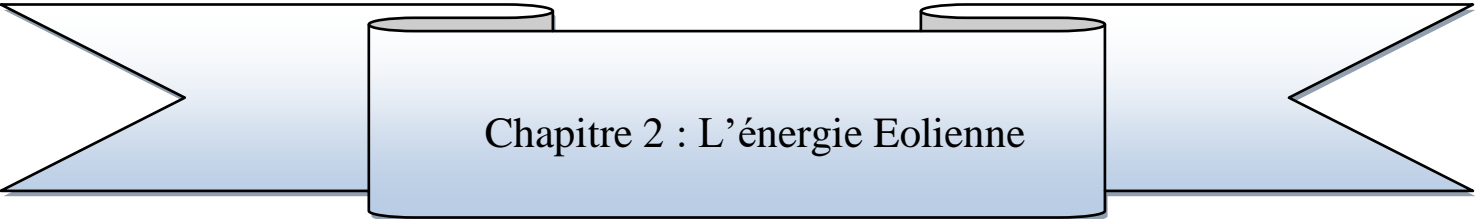
Cette énergie est produite par la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice. Cette hélice est montée sur un arbre qui est relié à des systèmes mécaniques qui servent à moulinet le grain ou à pomper de l'eau, soit à un générateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique [4]. Les éoliennes sont une forme très ancienne d'exploitation du vent. Une importante évolution 1970-2000. Une éolienne qui est un dispositif pour extraire de l'énergie cinétique du vent en la transformant en énergie mécanique ou en énergie électrique. En enlevant une certaine partie de son énergie cinétique le vent doit ralentir mais seulement cette masse d'air qui traverse le disque du rotor sera affectée [5].



Fig I.18 Energie éolienne

I-5- Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une présentation détaillée des différentes sources d'énergies renouvelables qui existent, tel que l'énergie solaire, hydraulique, géothermique, biomasse, éolienne, et ...etc.



Chapitre 2 : L'énergie Eolienne

L'énergie éolienne

II-1-Introduction

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique ; d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable.

Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes.

Une éolienne doit comporter :

- un système qui permet de la contrôler électriquement (machine électrique associée à la commande).
- Un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des paliers de l'éolienne, orientation de la nacelle).

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'à l'étude de l'énergie cinétique du vent et les différents types de génératrices.

La dernière partie de ce chapitre illustre les différentes structures des machines asynchrones à double alimentation, leur principe de fonctionnement, leurs applications et leur intérêt.

L'énergie éolienne

II-2-La production éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est directement lié à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps été oublié, cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, connaît depuis environ 30 ans un développement sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers.

II-3- Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [6]

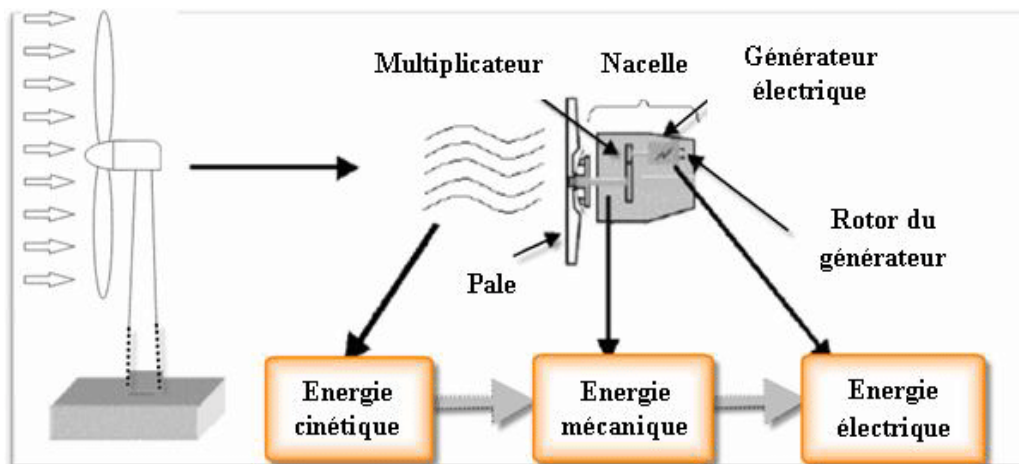


Fig II.19 Conversion de l'énergie cinétique du vent [6]

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffusée et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif ; elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des masts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes des plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement de turbulences [10].

L'énergie éolienne

L'éolienne se compose d'une nacelle, d'un mât, de pales et d'un multiplicateur de vitesse. La fabrication de ces différents éléments est d'une technologie avancée, ce qui les rend par conséquent onéreux.

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produit étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également en mer où la présence du vent est plus régulière.

II-4- Principe de fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite. La puissance mécanique est ensuite transformée soit en puissance hydraulique par une pompe, soit en puissance électrique par une génératrice.

II-5- Les différents types des turbines éoliennes

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. On peut diviser les éoliennes en deux grandes familles [21],[6] :

- les éoliennes à axe vertical
- les éoliennes à axe horizontal

II-5-1- Les éoliennes à axe vertical

Ce type d'éolienne (figure II.20) a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance, en revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [11].

L'énergie éolienne



Fig II.20 éolienne à axe vertical [12]

Il existe deux modèles d'éoliennes à axe vertical: SAVONIUS et DARRIEUS.

a) DARRIEUS

Elles sont peu encombrantes, ne nécessitent pas de systèmes d'orientations et sont simples à installer. Par contre, elles ont un faible rendement et ne démarrent pas toutes seules.

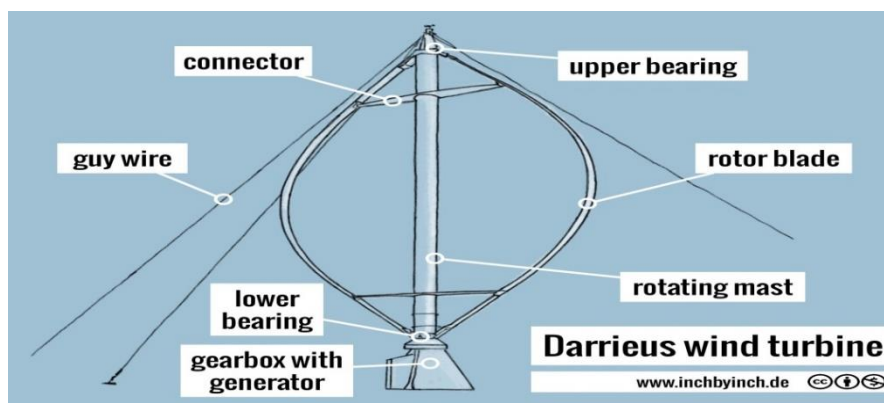


Fig II.21 éoliennes à axe vertical darious

L'énergie éolienne

b) SAVONIUS

Cette éolienne a également un faible rendement par rapport à une éolienne classique mais elle a l'avantage de fonctionner avec toutes les directions du vent. L'éolienne est compact et le fait d'être sur un axe vertical diminue les vibrations ce qui peut être très contraignant sur un bâtiment.

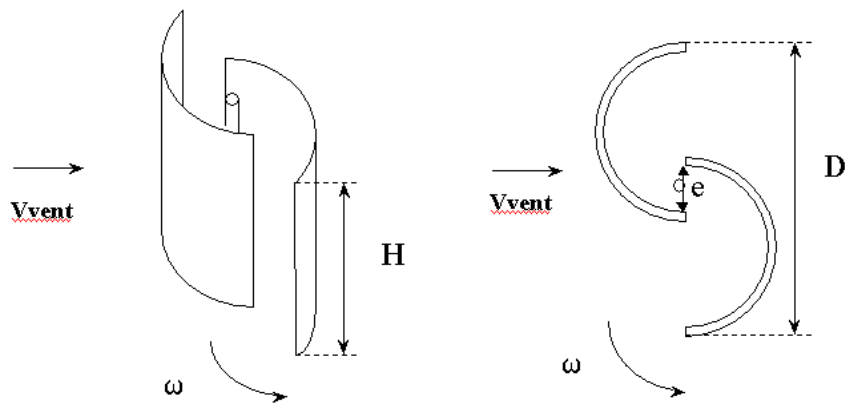


Fig II.22 éoliennes à axe vertical Savonius

II-5-2- Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal (figure II.23) beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrant de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol [12]. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales (les plus courantes) et les multi-pales.

L'énergie éolienne



Fig II.23 éolienne à axe horizontal [12]

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

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

A titre de comparaison, le tableau ci dessous propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice [12]

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 kW
Moyenne	12 m à 45 m	De 40 kW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW et plus

II-6-Principaux composants d'une éolienne

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux.

- le mât
- la nacelle
- le rotor

L'énergie éolienne

A- Le mât

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique. Il doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol [6].

B- La nacelle

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

Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.

C- Le rotor

Le rotor, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit [13].

Il existe deux types de rotor, les rotors à vitesse fixe et les rotors à vitesse variable.

C-1-Les rotors à vitesse fixe

Sont souvent munis d'un système d'orientation de pales permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût [6].

C-2-Les rotors à vitesse variable

Sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié.

Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites, la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique) [6].

L'énergie éolienne

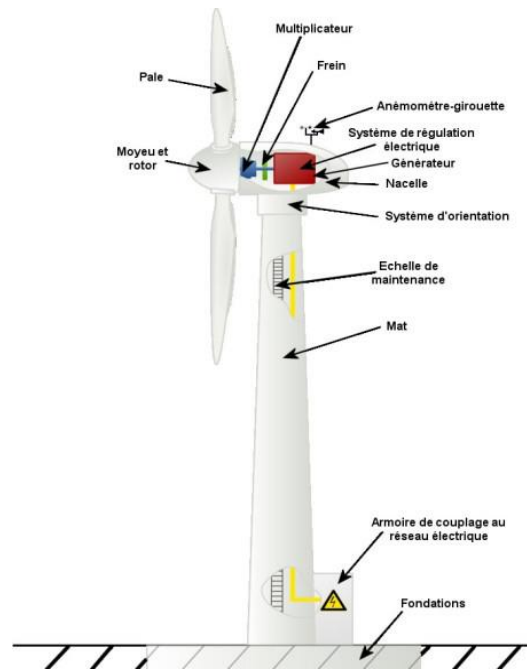


Fig II.24 Schéma des différentes composantes d'une éolienne à axe horizontale [15]

II-7-Protection contre la corrosion

Les différentes parties de l'éolienne sont protégées contre la corrosion par un revêtement spécial à plusieurs couches. Les éléments particulièrement exposés aux intempéries, comme par exemple le moyeu du rotor, sont galvanisés.

II-8-Energie cinétique du vent

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la surface active S de la voilure [8].

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure 1.5 sur lequel on a représenté la vitesse du V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval en supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit $\frac{V_1+V_2}{2}$, la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est :

$$m = \frac{\rho S (V_1+V_2)}{2} \quad (1-1)$$

La puissance P_m alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton).

$$P_m = \frac{m (V_1^2+V_2^2)}{2} \quad (1-2)$$

L'énergie éolienne

Soit en remplaçant m par son expression

$$Pm = \frac{\rho S (V_1 + V_2)(V_1^2 + V_2^2)}{4} \quad (1-3)$$

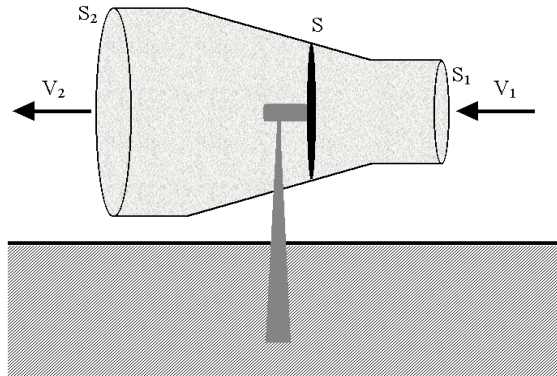


Fig II.25 tube de courant autour d'une éolienne [8].

Le vent théorique non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance Pmt correspondante serait alors :

$$Pmt = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (1-4)$$

La relation entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible et alors :

$$\frac{Pm}{Pmt} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right)\left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad (1-5)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus, on s'aperçoit que la ratio $\frac{pm}{pmt}$ appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de $\left(\frac{16}{27}\right)$ soit 0.59 ; c'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

L'énergie éolienne

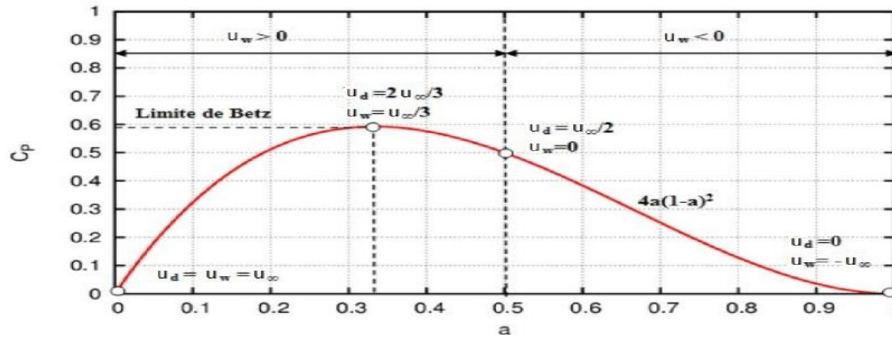


Fig II.26 coefficient de puissance

La figure II.26 donne un aperçu sur les coefficients de puissance C_p habituels en fonction de la vitesse réduite λ pour différents types d'éoliennes.

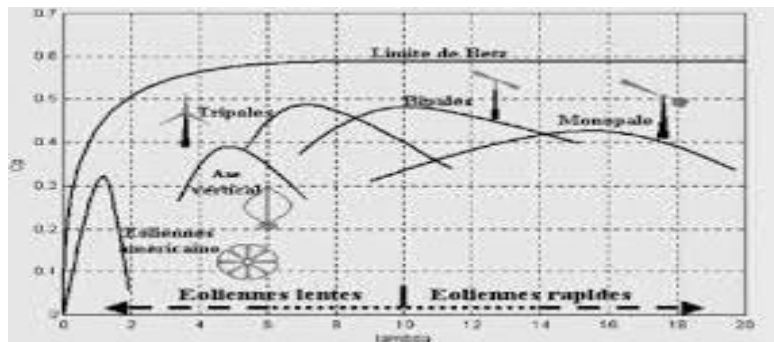


Fig II.27 coefficient de puissance pour les différents types d'éoliennes [8]

Selon la loi de Betz, la puissance maximale est :

$$P_{max} = \frac{16}{27} P_{mt} = 0.59 P_{mt} \quad (1-6)$$

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde ; de cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini [8] :

$$C_p^{opt} = \frac{P_{max}}{P_{mt}} = \frac{2 P_{max}}{\rho S V_1^3} = 0.59 \quad (1-7)$$

En combinant les équations (1-1), (1-4) et (1-5), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} P_{mt} = C_p P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3$$

$$\text{Avec : } \lambda = \frac{\Omega_1 R}{V_1}$$

Ω_1 : Vitesse de rotation avant multiplicateur de vitesse K

L'énergie éolienne

La puissance mécanique P_{mg} disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_2 R}{K V_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (1-9)$$

Avec Ω_2 : vitesse de rotation après multiplicateur [6] [17] [8]

II-9-Etude comparative des machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne

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 [14].

On décrit dans cette étude, les principales caractéristiques technologiques et concepts liés aux aérogénérateurs.

II-9-1-Types de machines électriques

Les deux types de machines électriques les plus utilisées dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et asynchrones.

II-9-1-1 Générateur synchrone

C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grandes puissances (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones de 500 kW à 2 MW utilisés dans le domaine éolien, sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille.

De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite.

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

Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplés. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance.

Certaines variantes de machines synchrones peuvent fonctionner à de faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aéroturbine. Elles permettent ainsi de se passer

L'énergie éolienne

du multiplicateur, élément présent sur la plupart des aérogénérateurs et demande un important travail de maintenance [9].

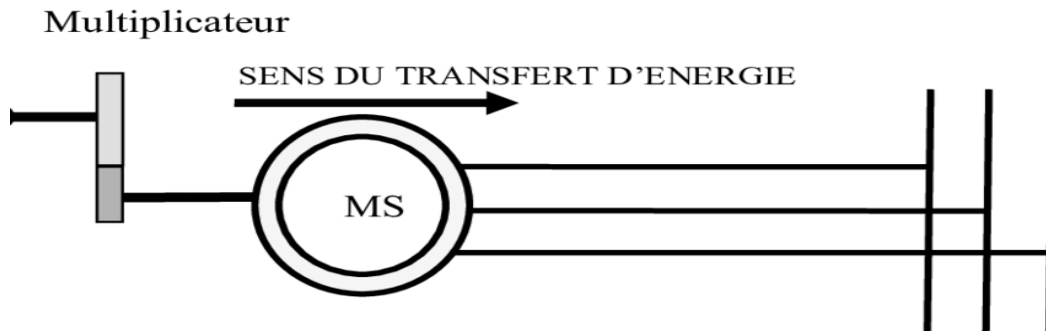


Fig II.28 Machine synchrone connectée directement au réseau

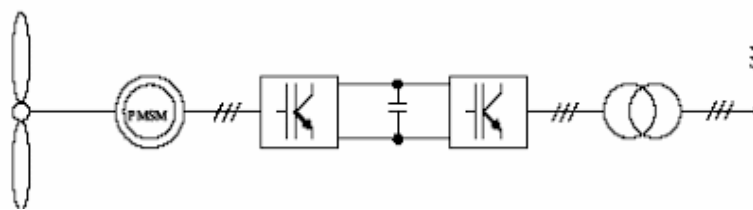


Fig II.29 Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance

II-9-1-2Générateur asynchrone

La connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. Ceci explique pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction. Il existe deux catégories de machine asynchrone: les machines asynchrones à cage d'écureuil et les machines asynchrones à rotor bobiné.

A- Machine asynchrone à cage d'écureuil

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde.

Ainsi pour 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.

La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale

L'énergie éolienne

d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais et collecteur ou de contacts glissants sur des bagues, la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne.

A titre d'exemple, la caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la figure (II.30) [6].

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point $g=0$), dans le cas de la caractéristique suivante, la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 tr/min.

Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau figure (II.31).

La machine a un nombre de paire de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important, les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs.

La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine. Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau, celui-ci peut être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la figure (II.31), qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

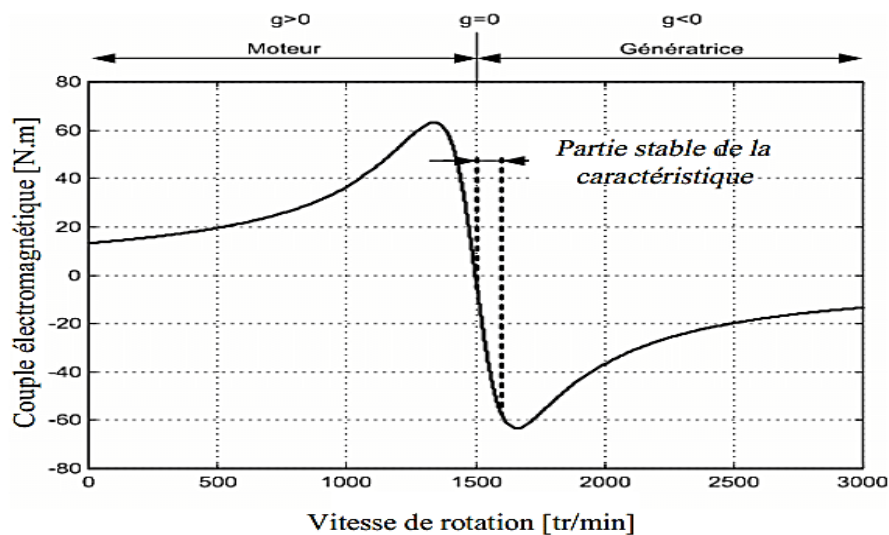


Fig II.30 Caractéristique couple- vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles [7]

L'énergie éolienne

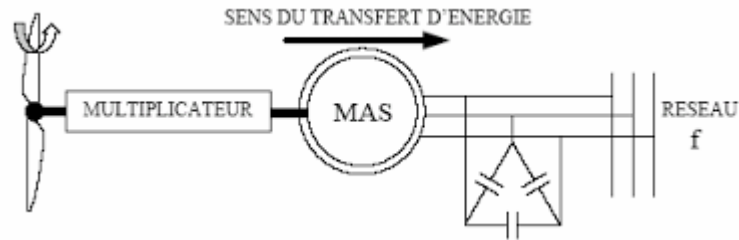


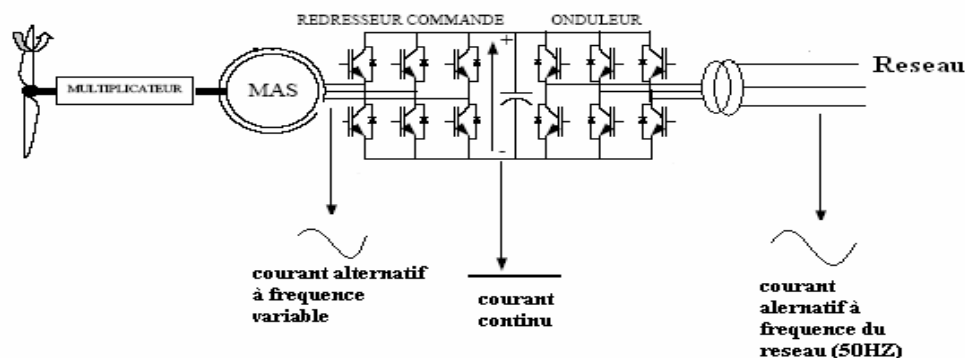
Fig II.31 Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau [7]

Une autre solution consiste à utiliser la génératrice asynchrone triphasée car la connexion de l'éolienne au réseau se fait par l'intermédiaire d'un dispositif électronique de puissance figure (II.31).

L'éolienne fonctionne à vitesse variable, le générateur produit un courant alternatif de fréquence variable. L'emploi de deux convertisseurs de puissance permet de découpler la fréquence du réseau de la fréquence variable des courants de la machine par création d'un bus continu intermédiaire.

Avec une telle structure, les fluctuations rapides de la puissance générée peuvent être filtrées par le condensateur en autorisant une variation de la tension du bus continu sur une plage donnée [7].

Les différents inconvénients de ce système sont le coût, la fiabilité de l'électronique de puissance et les pertes dans les convertisseurs de puissance. Ces convertisseurs sont dimensionnés pour 100% de la puissance nominale de la génératrice, ceci augmente significativement le coût de l'installation et les pertes. Une étude économique approfondie est nécessaire avant d'adopter ce type d'installation.



FigII.32 Eolienne connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance [7]

Malgré sa simplicité et ses qualités de robustesse et son coût, la machine asynchrone à cage reste uniquement pour l'utilisation dans un système éolien, lorsque elle est directement connectée au réseau, la vitesse de rotation doit rester pratiquement constante de façon à ce que la machine reste proche de la vitesse de synchronisme. Cette restriction entraîne une efficacité réduite de l'éolienne aux vitesses de vent élevées.

L'énergie éolienne

Partant de ce constat, nous pouvons utiliser la machine asynchrone à double alimentation (MADA) comme alternative à la machine à cage.

B-Machine asynchrone à double alimentation

Avec les générateurs synchrones, c'est actuellement l'une des deux solutions concurrentes en éolien à vitesse variable [20]. Le stator de la génératrice est directement couplé au réseau, le plus souvent par un transformateur. A la place du rotor à cage d'écureuil ces machines ont un rotor bobiné dont le réglage électrique assure la variation du glissement [8] [24].

Actuellement, la majorité des projets éoliens supérieurs à 1 MW repose sur l'utilisation de la machine asynchrone pilotée par le rotor. Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.

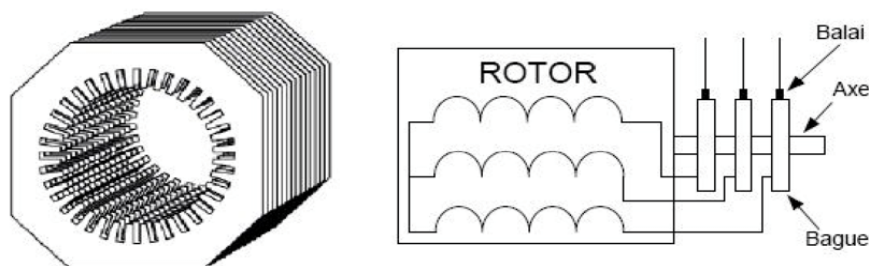
Etant donné que la puissance rotorique qui transite est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance.

C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion où est injectée cette génératrice [7].

a-Structure des machines asynchrones à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasés classiques (asynchrone à cage ou synchrone), constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements [22].

L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne.



FigII.33 Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA [7]

L'énergie éolienne

En fonctionnement moteur, le premier intérêt de la machine asynchrone à rotor bobiné a été de pouvoir modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse.

Plutôt que de dissiper l'énergie rotorique dans des résistances, l'adjonction d'un convertisseur entre le bobinage rotorique et le réseau permet de renvoyer cette énergie sur le réseau (énergie qui est normalement dissipée par effet joule dans les barres si la machine est à cage), le rendement de la machine est ainsi amélioré, c'est le principe de la cascade hypo synchrone [6].

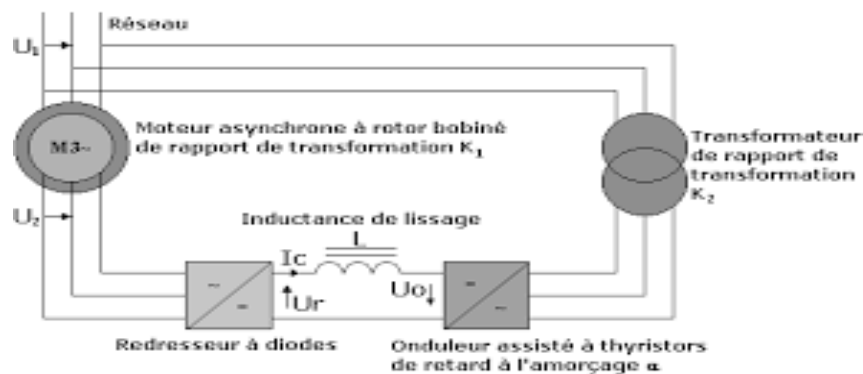


Fig II.34 Cascade hypo synchrone

Il existe plusieurs technologies de la machine asynchrone à double alimentation et plusieurs dispositifs d'alimentation sont envisageables. Chaque structure a ses inconvénients et ses avantages.

a-1- Double alimentation par le stator

Pour réaliser une double alimentation par le stator, la machine asynchrone est munie de deux bobinages statoriques distincts (figure II.35)

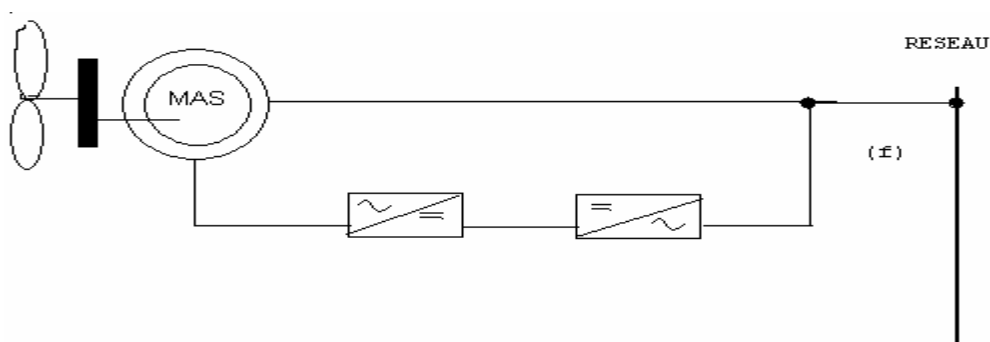


Fig II.35 Machine asynchrone à double bobinage statorique

L'énergie éolienne

Un bobinage statorique de la génératrice est directement connecté au réseau et constitue le principal support de transmission de l'énergie générée. En agissant sur les tensions appliquées au second bobinage statorique, la vitesse de la génératrice est contrôlée autour d'un point de fonctionnement. Ce second enroulement sera appelé enroulement d'excitation. Ce dernier possède un autre nombre de paire de pôles que celui du premier bobinage.

L'enroulement d'excitation a donc une masse de cuivre généralement inférieure, car seule une partie du courant nominal de la génératrice y circule. Cet enroulement est connecté à des convertisseurs électroniques de puissance qui sont dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la turbine, le coût s'en trouve réduit.

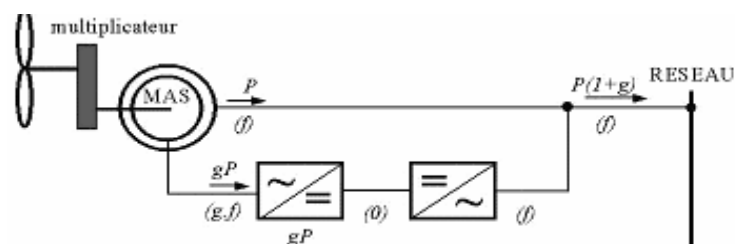
Le convertisseur de puissance connecté à l'enroulement d'excitation permet de contrôler le flux statorique de la machine ; le glissement peut être ainsi contrôlé et donc la vitesse de la génératrice. En augmentant le flux, les pertes au rotor augmentent, le glissement aussi. En diminuant le flux, les pertes diminuent et le glissement également. Un second convertisseur est nécessaire pour créer le bus continu.

Comme les machines asynchrones ont un facteur de puissance faible à cause de l'inductance magnétisante, le convertisseur relié au réseau peut être commandé de manière à minimiser la puissance réactive. Comme pour toutes les machines asynchrones à double alimentation, la puissance nominale du convertisseur de puissance est proportionnelle au glissement maximum. Il a été vérifié que cette structure génère des puissances fluctuantes sur le réseau induisant ce qu'on appelle des flickers.

a-2- Double alimentation par le stator et le rotor

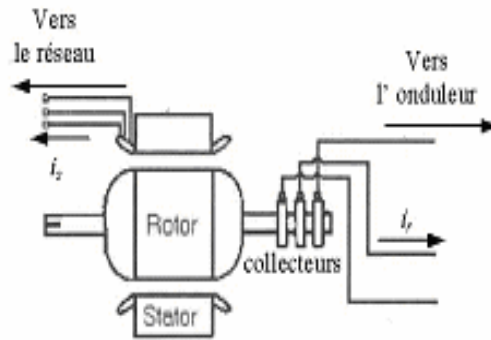
La structure de conversion est constituée d'une génératrice asynchrone à rotor bobiné entraînée par une turbine éolienne (figure II.36).

Pour expliquer le principe de fonctionnement, on néglige toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse, la puissance p est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournit, $(1 - g)p$, est retrouvée sous forme de puissance mécanique ; le reste gp sort par les balais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence $g.f$. Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée, par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Ce réseau reçoit donc $(1 + g)p$; les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un système de balais et de collecteurs (figure II.37). Une fois connecté au réseau, un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la reluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique.



FigII.36 Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor

L'énergie éolienne



FigII.37 Schéma de la machine asynchrone à rotor bobiné avec des bagues collectrices

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement.

Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe où vitesse variable dépend par exemple de cette configuration. Les avantages principaux des deux types de fonctionnement sont les suivants :

b-Applications des machines asynchrones à double alimentation

La première application de la MADA et le fonctionnement moteur sur une grande plage de variation de la vitesse.

Dans les machines synchrones classiques et asynchrones à cage, la vitesse de rotation est directement dépendante de la fréquence des courants des bobinages statoriques. La solution classique permettant alors le fonctionnement à vitesse variable consiste à faire varier la fréquence d'alimentation de la machine. Ceci est généralement réalisé par l'intermédiaire d'un redresseur puis d'un onduleur commande.

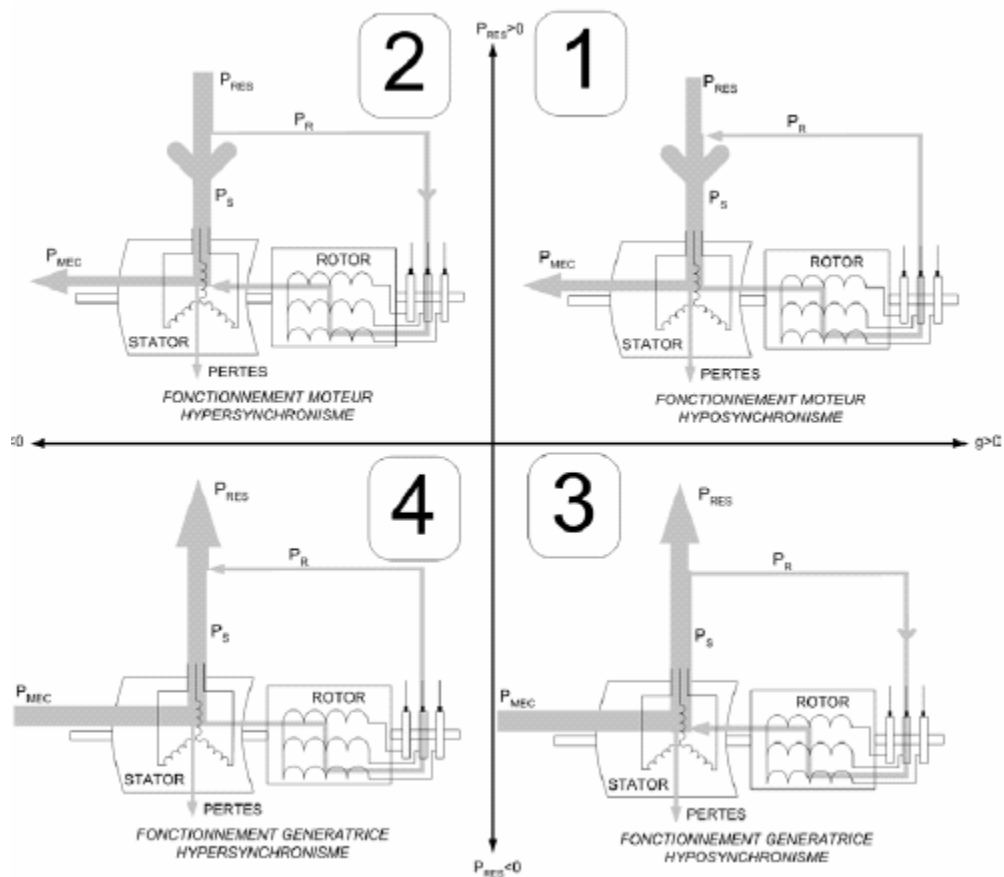
Ces deux convertisseurs sont alors dimensionnés pour faire transiter la puissance nominale de la machine. L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille de ces convertisseurs d'environ 70% en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques [6].

Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur. La même philosophie peut être appliquée au fonctionnement en génératrice dans lequel l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse.

c-Fonctionnement en génératrice à vitesse variable

La figure II.38 donne la configuration de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation dont le stator est relié directement au réseau et dont le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur (structure de Scherbius PWM), P_{RES} est la puissance délivrée au réseau ou fournie par le réseau, P_S La puissance transitant par le stator, P_R la puissance transitant par le rotor, et P_{MEC} la puissance mécanique [6]

L'énergie éolienne



FigII.38 Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation [6]

Lorsque la machine fonctionne en moteur, la puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, la puissance de glissement est renvoyée sur le réseau, c'est la cascade hypo synchrone.

En mode moteur hyper synchrone, une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique.

En fonctionnement génératrice, le comportement est similaire, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique.

En mode hypo synchrone, une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.

En mode hyper synchrone, la totalité de la puissance mécanique fournir à la machine est transmise au réseau aux pertes près.

Une partie de cette puissance correspondant à $P_{MEC} g$ est transmise par l'intermédiaire du rotor.

Pour une utilisation dans un système éolien, les quadrants 3 et 4 sont intéressants. En effet si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas $\pm 30\%$ en deçà ou au delà de la vitesse de synchronisme (ce qui représente un compromis entre la taille du convertisseur et la plage de variation de vitesse), la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale ; le convertisseur est alors dimensionné pour faire transiter uniquement la

L'énergie éolienne

Puissance de glissement c'est-à-dire au maximum 0,3 fois la puissance nominale de la machine [34]. Il est alors moins volumineux, moins coûteux, nécessite un système de refroidissement moins lourd et génère moins de perturbation que s'il est placé entre le réseau et le stator d'une machine à cage.

d-Fonctionnement à vitesse fixe

- Système électrique plus simple.
- plus grande fiabilité.
- peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- pas besoin de système électrique de commande.
- moins cher.

Il existe plusieurs types de génératrices utilisées dans le fonctionnement à vitesse variable représentées par le tableau suivant [18]:

Génératrices utilisées	Caractéristiques
Machine asynchrone en autonome	Nécessité de capacités d'auto excitation pour magnétiser la machine.
Machine asynchrone à cage débitant sur un réseau	Obligation de fonctionner au voisinage du synchronisme.
Machine à double alimentation ou MADA	Autorise le fonctionnement à vitesse variable
Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)	Bon rendement, faibles puissances, adaptée aux faibles vitesses mais prix élevé.
Machine à réluctance variable (MRV)	Permettant de supprimer totalement ou partiellement le multiplicateur de vitesse.

e-Intérêt de la MADA

Le principal avantage de la MADA est la possibilité de fonctionner à vitesse variable. Les machines asynchrones à vitesse fixe doivent fonctionner au voisinage de la vitesse de synchronisme car la fréquence est imposée par le réseau. La vitesse du rotor est quasi constante. Le système de la MADA permet de régler la vitesse de rotation du rotor en fonction de la vitesse du vent. En effet la MADA permet un fonctionnement en génératrice hypo synchrone et hyper synchrone. On arrive ainsi à extraire le maximum de puissance possible.

L'énergie éolienne

L'intérêt de la vitesse variable pour une éolienne est de pouvoir fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et de pouvoir en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent [25] [7].

II-10- Conclusion

Dans ce chapitre une synthèse bibliographique a été présentée et qui concerne les différents types éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnements. Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, on présente les machines électriques et leurs applications ainsi que leur adaptation à un système éolien. A la fin de ce chapitre on présente la structure de la machine asynchrone à double alimentation, son application et son intérêt.



Chapitre 3 : Modélisation du système

Modélisation du système

III-1-Introduction

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne est une étape primordiale dans la compréhension du système éolien. Cette étape permet de premier lieu d'abord de comprendre le comportement dynamique et l'interaction électromécanique de la génératrice. Avec le modèle approprié, nous pouvons nous orienter facilement à une commande optimale.

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation de la turbine éolienne. Notre choix se porte sur la génératrice asynchrone à double alimentation de part sa robustesse, qui a été justifiée dans le premier chapitre. Nous modéliserons la chaîne de conversion éolienne à vide.

Nous verrons ensuite la modélisation et la commande en MLI de l'onduleur en tension ainsi que la turbine.

Des résultats de simulation permettront de juger l'efficacité de ce modèle.

III-2-Hypothèses simplificatrices

Pour l'étude de la génératrice asynchrone à double alimentation idéalisée, on introduit les hypothèses simplificatrices suivantes [16]:

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encochage est négligeable. - La saturation de circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
 - Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau.
 - On admet de plus que la fmm créée par chacune des armatures est à répartition sinusoïdale.
- Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer :
- L'additivité des flux.
 - La constance d'inductances propres.
 - La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor en fonction de l'angle de leurs axes magnétiques.

III-3-Modélisation des machines asynchrones à double alimentation

La machine est représentée par six enroulements dans l'espace électrique ; l'angle θ repère l'axe d'une des phases rotoriques par rapport à l'axe fixe de la phase statorique. Les flux sont comptés positivement selon les axes des phases ; Les sens des enroulements sont repérés conventionnellement par un point (\cdot), un courant de signe positif entrant par ce point crée un flux positif dans l'enroulement. (Voir figure III.39)

Modélisation du système

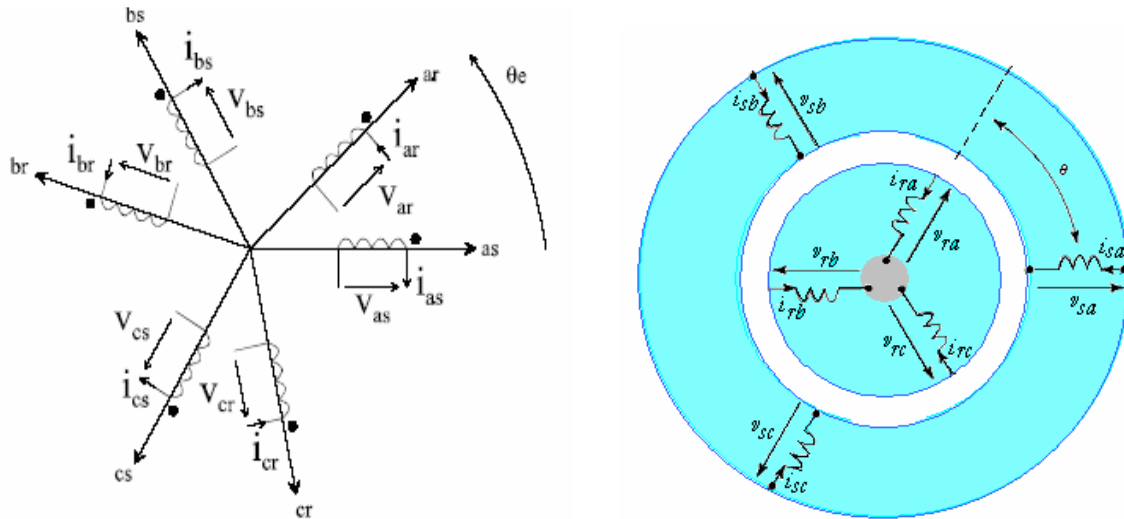


Fig III.39 Représentation de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique

III-3-1-Modèle et Identification des paramètres de la machine

Le modèle de la MADA est équivalent au modèle de la machine asynchrone à cage d'écureuil. A cet effet, lors de cette modélisation, on assimile la cage d'écureuil à un bobinage triphasé (voir figure III.40). La seule différence réside dans le fait que ces enroulements ne sont plus systématiquement en court-circuit, par conséquent les tensions triphasées rotoriques du modèle que l'on rappelle ci-après, ne sont pas nulles.

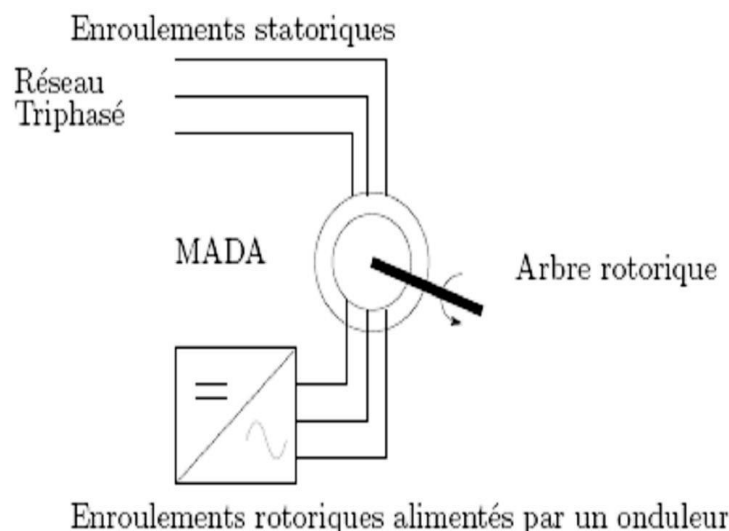


Fig III.40 Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné.

Modélisation du système

Rappel du modèle triphasé de la MADA

a- Equations électriques :

Les équations électriques en notation matricielle [19], [23], [27] sont:

Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{III-1})$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{III-2})$$

b- Equations des flux :

Une matrice des inductances établit la relation entre les flux et les courants.

Les équations sous forme matricielle seront représentées comme suit [26], [28] :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} = [L_S] \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{III-3})$$

De façon similaire on aura au rotor :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = [L_r] \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + [M_{rs}] \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{III-4})$$

Avec

$$[L_S] = \begin{bmatrix} I_S & M_S & M_S \\ M_S & I_S & M_S \\ M_S & M_S & I_S \end{bmatrix} \quad [L_r] = \begin{bmatrix} I_r & M_r & M_r \\ M_r & I_r & M_r \\ M_r & M_r & I_r \end{bmatrix}$$

Et

$$[M_{sr}] = [M_{rs}] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_e) & \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_e) \end{bmatrix}$$

Modélisation du système

c- L'équation mécanique :

L'expression générale du couple est :

$$\Gamma_e = \frac{1}{2} [\dot{i}]^t \left[\frac{\delta}{\delta \theta} [L] \right] [i] \quad (\text{III-5})$$

Avec : $[i] = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc} \ i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc}]^t$

Et $[L] = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}] & [L_r] \end{bmatrix}$

L'équation mécanique découle : $J \frac{d\Omega}{dt} = \Gamma_e - \Gamma_c$ (III-6)

Et $\Omega = \frac{\omega_r}{p}$

Nous constatons la complexité des équations électriques et l'équation mécanique de la machine asynchrone qui ne peuvent être facilement exploitées à cause des dimensions des matrices entrant dans les calculs et de la dépendance de la matrice inductance vis à vis de la position de l'axe rotorique par rapport à l'axe statorique, qui est variable dans le temps.

III-4-Changement de repère

Le but d'un changement de repère est de rendre l'écriture des équations électriques et mécanique plus simple à exploiter. Dans notre étude nous avons utilisé la transformation de Park

III-5-La transformation de Park

La modélisation de la machine asynchrone s'effectue en partant du système à trois axes dit réel, difficilement identifiable expérimentalement vers celui de Park (à deux axes). (Voir figure III.41)

Modélisation du système

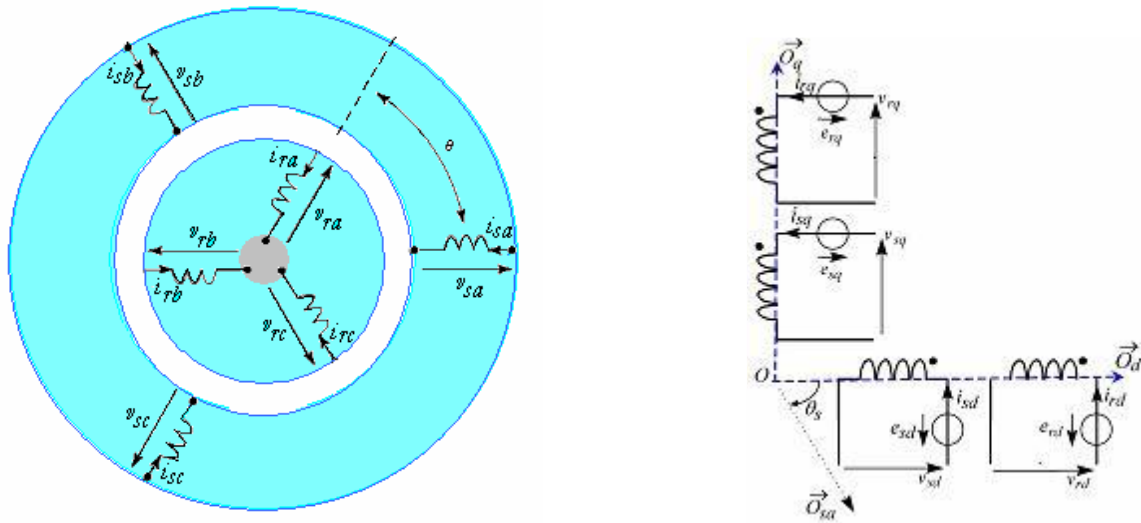


Fig III.41 : Représentation de la machine asynchrone triphasée dans le repère de Park

Les tensions rotorique $v_{ran}, v_{rbn}, v_{rcn}$ et les tensions statoriques $v_{san}, v_{sbn}, v_{scn}$ sont transformées en composantes directes et en quadratures $v_{rd}, v_{rq}, v_{sd}, v_{sq}$.

Les tensions de rotor et stator sont :

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = [P(\theta_r)]^{-1} \begin{bmatrix} V_{ran} \\ V_{rbn} \\ V_{rcn} \end{bmatrix} \quad (\text{III-7})$$

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = [P(\theta_s)]^{-1} \begin{bmatrix} V_{san} \\ V_{sbn} \\ V_{scn} \end{bmatrix} \quad (\text{III-8})$$

$P(\theta)$ est la matrice de Park modifiée définie par :

$$[P(\theta_s)]^{-1} = \sqrt{\frac{1}{2}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

Les équations dynamiques de la machine sont exprimées par :

$$\begin{aligned} V_{sd} &= R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} &= R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} - \omega_s \phi_{sd} \end{aligned} \quad (\text{III-9})$$

Modélisation du système

$$V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \phi_{rq} \quad (\text{III-10})$$

$$V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} - \omega_r \phi_{rd}$$

R_s et R_r et sont respectivement les résistances des bobinages statoriques et rotoriques, L_s, L_r et M_{sr} sont respectivement les inductances propres statoriques, rotoriques et la mutuelle inductance entre les deux bobinages.

$\phi_{sd}, \phi_{sq}, \phi_{rd}, \phi_{rq}$ sont les composantes directes et en quadratures des flux statoriques et rotoriques :

$$\begin{bmatrix} \phi_{sq} \\ \phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_{sr} \\ M_{sr} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{III-11})$$

$$\begin{bmatrix} \phi_{sd} \\ \phi_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_{sr} \\ M_{sr} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{rd} \end{bmatrix} \quad (\text{III-12})$$

Le couple électromagnétique développé par la machine est :

$$C_{em} = P \frac{M_{sr}}{L_s} (\phi_{sd} i_{rq} - \phi_{sq} i_{rd}) \quad (\text{III-13})$$

III-6-Modélisation de l'onduleur

Il existe plusieurs structures de conversion utilisées dans la machine à double alimentation comme la structure de Kramer qui a utilisé un pont à diodes et un pont à thyristors [17], ainsi que la structure qui consiste à remplacer les onduleurs à commutation naturelle composés de thyristors, par des onduleurs à commutations forcées. Une autre structure intéressante est celle avec convertisseur MLI utilisée dans les travaux de Salma El Aimani [7], qui consiste en l'utilisation de deux ponts triphasés d'IGBT commandables par la modulation de largeur d'impulsions.

Pour simplifier l'étude supposons que [33] :

- La commutation des interrupteurs est instantanée,
- la chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable, c-a-d

$$K_{ci} (c \in [1,2,3], i \in [1,2])$$

- la charge est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé

Un onduleur de tension est donné par la figure (III.42).

On a, donc :

$$I_{Kci} = 0, V_{Kci} \neq 0 ; \text{ Interrupteur ouvert.}$$

$$I_{Kci} \neq 0, V_{Kci} = 0 ; \text{ Interrupteur fermé.}$$

Modélisation du système

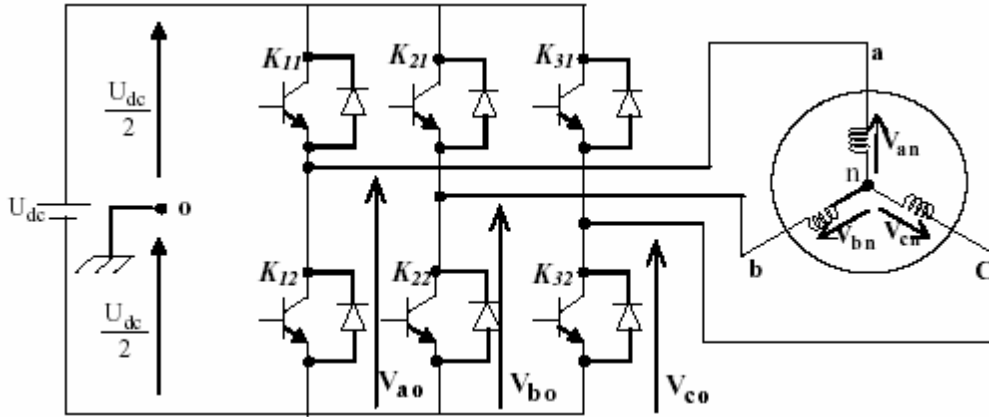


Fig III.42 Schéma d'un onduleur de tension

Les tensions composées V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} sont obtenues à partir de ces relations :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (\text{III-14})$$

V_{ao}, V_{bo} et V_{co} sont les tensions d'entrées de l'onduleur ou tensions continues. Elles sont référencées par rapport à un point milieu « o » d'un diviseur fictif d'entrée.

On peut écrire les relations de Charles, comme suites :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (\text{III-15})$$

V_{an}, V_{bn} et V_{cn} sont les tensions des phases de la charge (valeurs alternatives), V_{no} est la tension de neutre de la charge par rapport au point fictif « o ».

Du système $[V_{an}, V_{bn}, V_{cn}]$ équilibré découle la relation suivante :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{III-16})$$

La substitution de (III-16) dans (III-15) aboutit à :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (\text{III-17})$$

En remplaçant (III-17) dans (III-15), on obtient :

$$\begin{aligned} V_{an} &= \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} &= \frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} &= \frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{aligned} \quad (\text{III-18})$$

Modélisation du système

Donc, l'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice [T] assurant le passage continu- alternatif

$$[V_{AC}] = [T] \cdot [V_{dc}] \quad (III-19)$$

Tel que :

$$\begin{aligned} [V_{AC}] &= [V_{an} \ V_{bn} \ V_{cn}]^T \\ [V_{dc}] &= [V_{ao} \ V_{bo} \ V_{co}]^T \\ [V_{dc}] &= U_{dc} [S_1 \ S_2 \ S_3]^T \end{aligned} \quad (III-20)$$

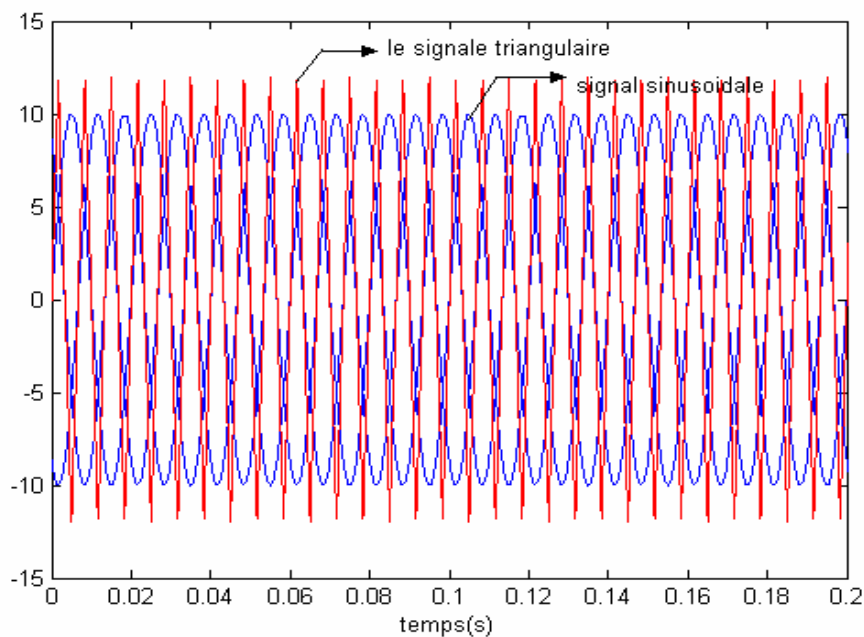
Donc, pour chaque bras il y a deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés comme des grandeurs booléennes.

Commutation supposée idéale : $S_i = (1 \text{ ou } 0) \{i=1,2,3\}$.

La matrice de transfert est la suivante :

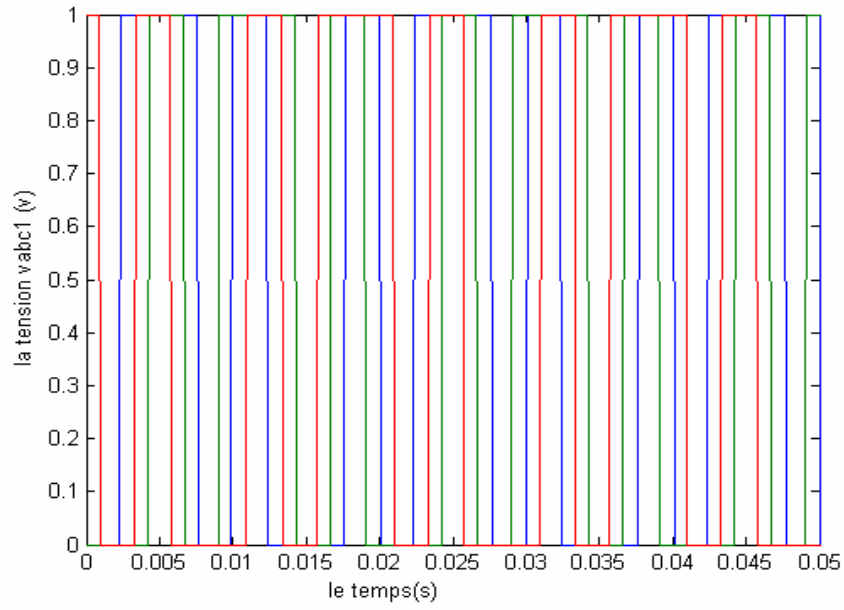
$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \quad (III-21)$$

Dans notre travail, la commande des interrupteurs de l'onduleur est réalisée par l'utilisation de la commande MLI (modulation par largeur d'impulsion) (figure III.43).

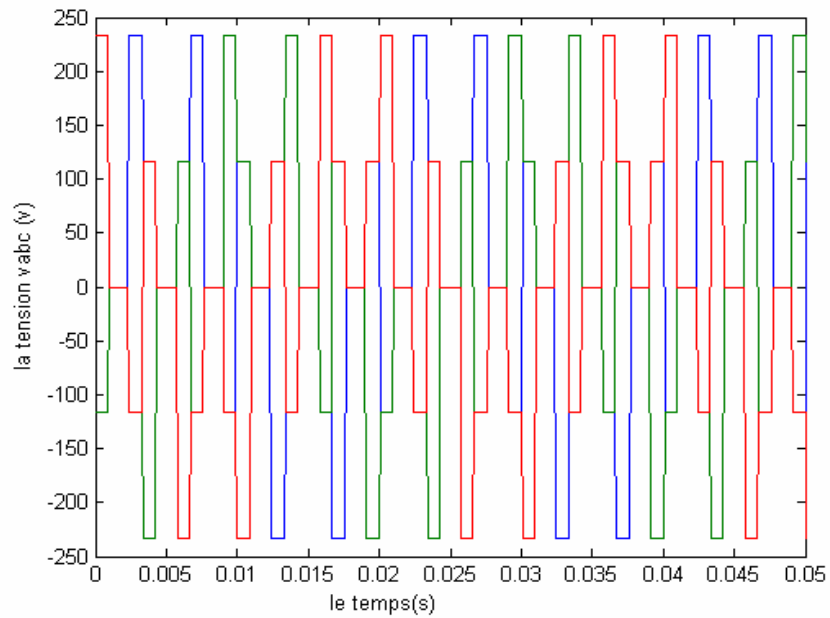


FigIII.43 Représentation les signaux de l'entrée du commande MLI

Modélisation du système



FigIII.44 Représentation les signaux de sortie du commande MLI



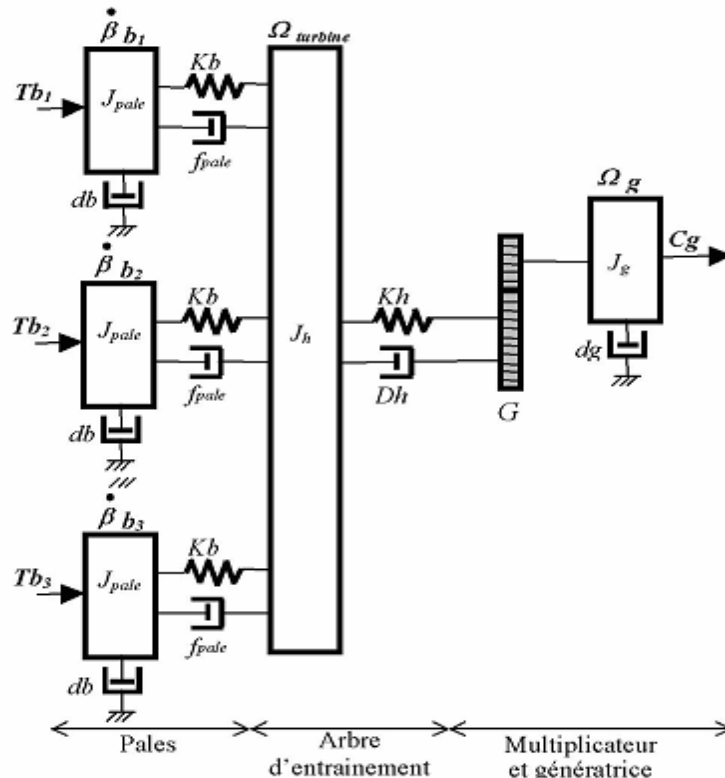
FigIII.45 Représentation la tension de l'onduleur

Modélisation du système

III-7- Modélisation de la turbine éolienne

III-7-1- Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée, comprend trois pales orientables et de longueur R , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse $\Omega_{turbine}$ qui est relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique (figure III.46)



FigIII.46 Système mécanique de l'éolienne

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

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

Ces pales sont orientables et possèdent un même coefficient de frottement par rapport au support f_{pale} . Les vitesses d'orientations de chaque pale sont notées $\beta b_1, \beta b_2, \beta b_3$.

Chaque pale reçoit une force Tb_1, Tb_2, Tb_3 qui dépend de la vitesse du vent, qui lui appliquée [35]. L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

- son inertie J_h
- son élasticité K_h
- son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur D_k

Le rotor de la génératrice possède :

- une inertie
- un coefficient de frottement dg

Ce rotor transmet un couple (Cg) entraînant la génératrice électrique qui tourne à une vitesse Ω_{mec} .

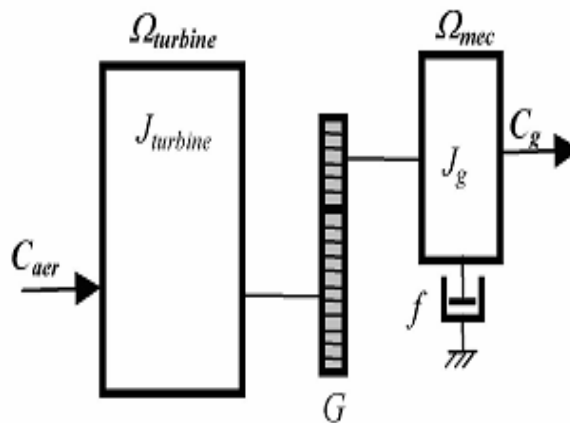
Modélisation du système

Si on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales, on aura une égalité des forces de poussées ($Tb_1 = Tb_2 = Tb_3$).

On peut simplifier l'ensemble des trois pales comme un seul système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. La conception aérodynamique des pales et leurs coefficients de frottement par rapport à l'air (c_d) est très faible, donc on peut l'ignorer.

De même, la vitesse de la turbine est très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice.

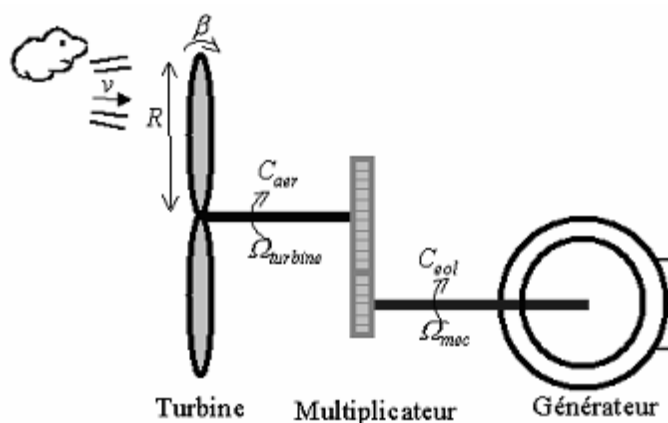
On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses (figure III.47) dont la validité (par rapport au modèle complet) a déjà été vérifiée [30].



FigIII.47 Modèle mécanique simplifiée de la turbine

III-7-2-Modélisation de la turbine

Le dispositif étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G (figure III.48).



FigIII.48 Schéma de la turbine éolienne

La puissance du vent ou la puissance éolienne est définie de la manière suivante [29] :

Modélisation du système

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2}$$

avec :

- ρ : densité de l'air (approxim. 1,22 kg / m³ à la pression atmosphérique à 15 C °)
- S : surface circulaire balayée par la turbine (le rayon du cercle est déterminé par la longueur de pale).
- v : vitesse du vent.

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors :

$$P_{aer} = C_p P_v = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (\text{III-22})$$

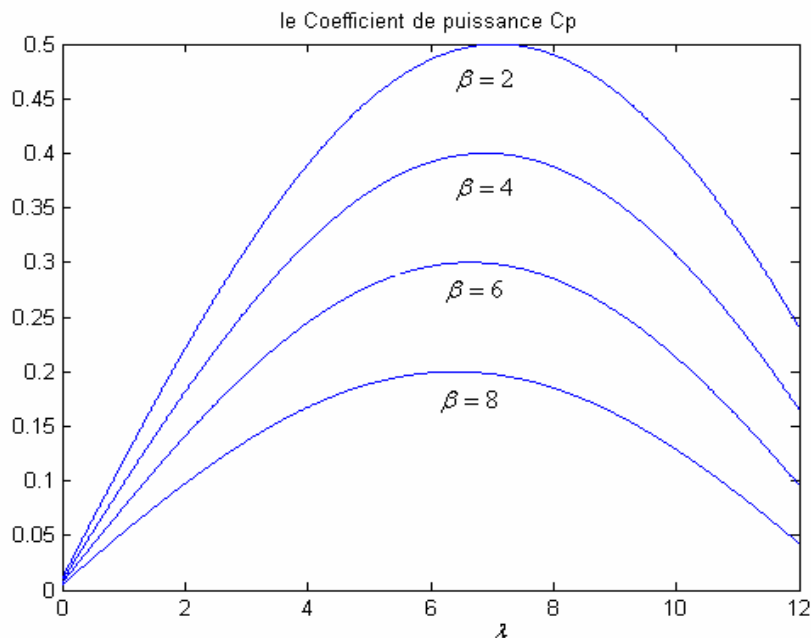
Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine [29], [32].

La figure (III.49) représente la variation de ce coefficient en fonction du rapport de vitesse λ et de l'angle de l'orientation des pales β

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

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{v} \quad (\text{III-23})$$

$\Omega_{turbine}$ est la vitesse de la turbine.



FigIII.49 Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine

A partir de relevés réalisés sur une éolienne de 1.5 MW [7], l'expression du coefficient de puissance a été approchée pour ce type turbine, par l'équation suivante [31] :

Modélisation du système

$$C_p = (0.5 - 0.167) \cdot (\beta - 2) \cdot \sin \left[\frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)} \right] - 0.00184 (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (\text{III-24})$$

β : L'angle de l'orientation des pales.

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

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (\text{III-25})$$

III-7-3-Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (figure III.48). Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_s = \frac{C_{aer}}{G} \quad (\text{III-26})$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{III-27})$$

III-7-4-Equation dynamique de l'arbre

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

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (\text{III-28})$$

Il est noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. A titre illustratif, pour une éolienne « Vestas » de 2 MW, une pale a une longueur de 39 m et pèse 6.5 tonnes [33].

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

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (\text{III-29})$$

où J est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte le couple électromagnétique C_{mec} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} et le couple issu du multiplicateur C_g

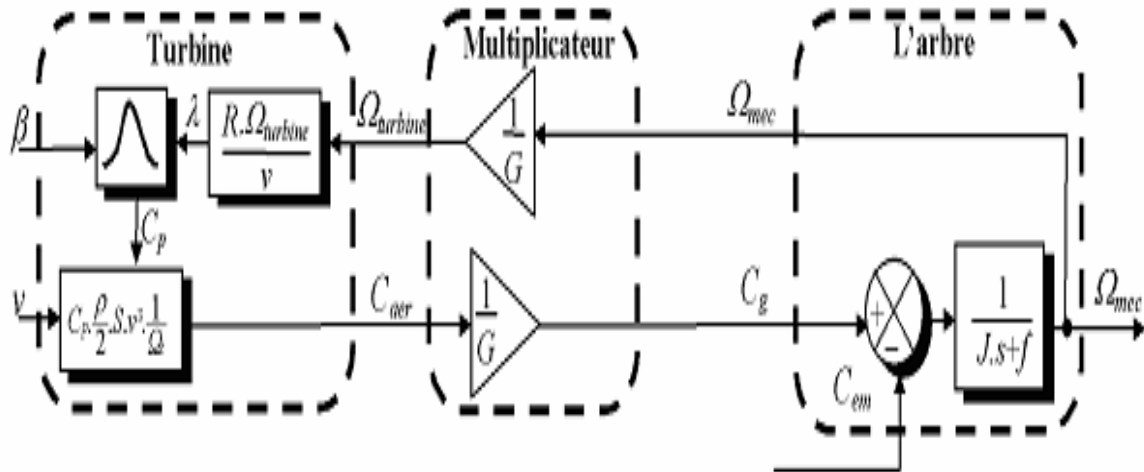
$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{III-30})$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

Modélisation du système

$$C_{vis} = f \Omega_{mec} \quad (III-31)$$

Le schéma synoptique du modèle dynamique de la turbine basé sur ces équations, est donné par la figure suivante :



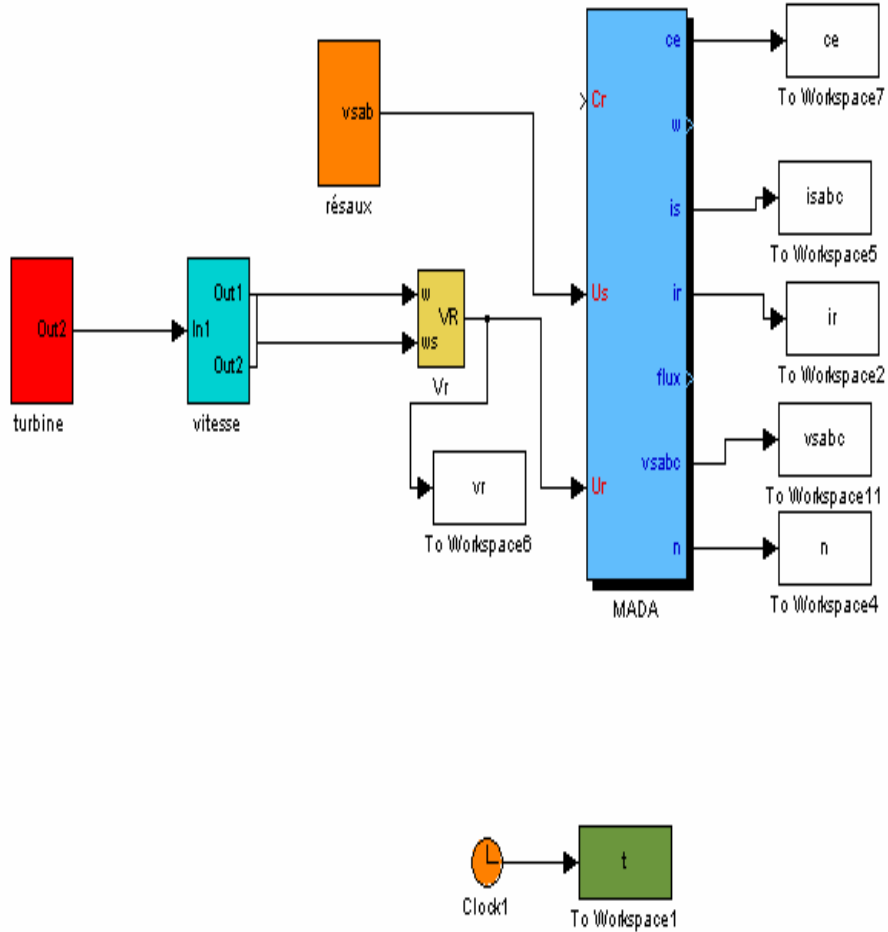
FigIII.50 Schéma bloc du modèle de la turbine

L'entraînement d'une machine électrique par un système éolien constitue une chaîne de conversion complexe dans laquelle le couple mécanique présent sur l'arbre de transmission, dépend uniquement de la vitesse du vent et de l'éventuelle présence d'un dispositif d'orientation des pales. Le vent étant par nature imprévisible et présentant des variations importantes, le couple résultant présente des ondulations dont il est nécessaire de tenir compte dans l'étude de la génération d'électricité par éolienne. Partant de ce constat, la machine à courant continu est destinée à reproduire le comportement d'une éolienne à vitesse variable [6].

Par cette corrélation on remplace dans notre étude le modèle de la turbine par le modèle de la MCC.

Modélisation du système

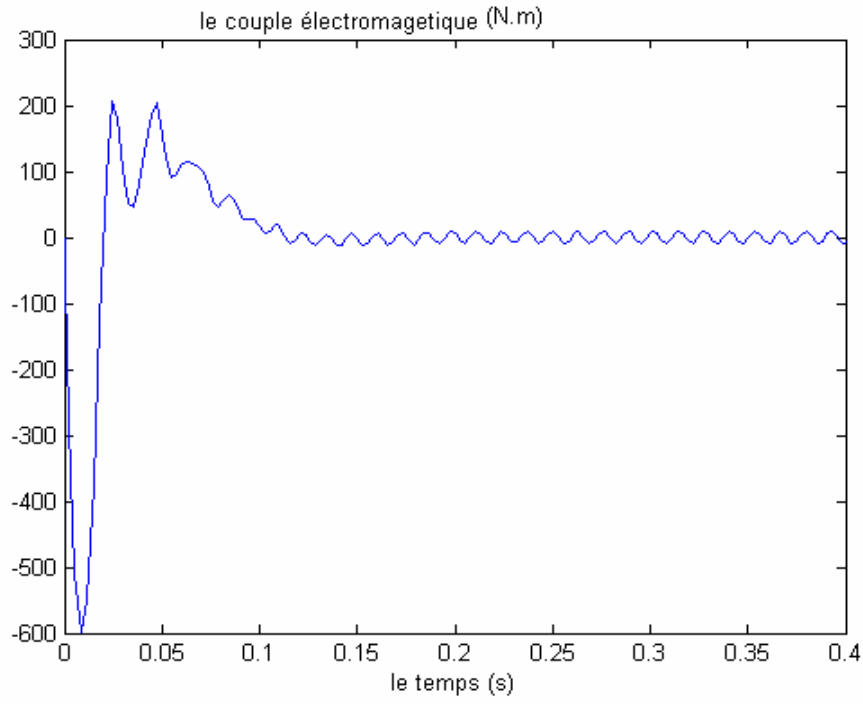
III-8-Schéma de simulation



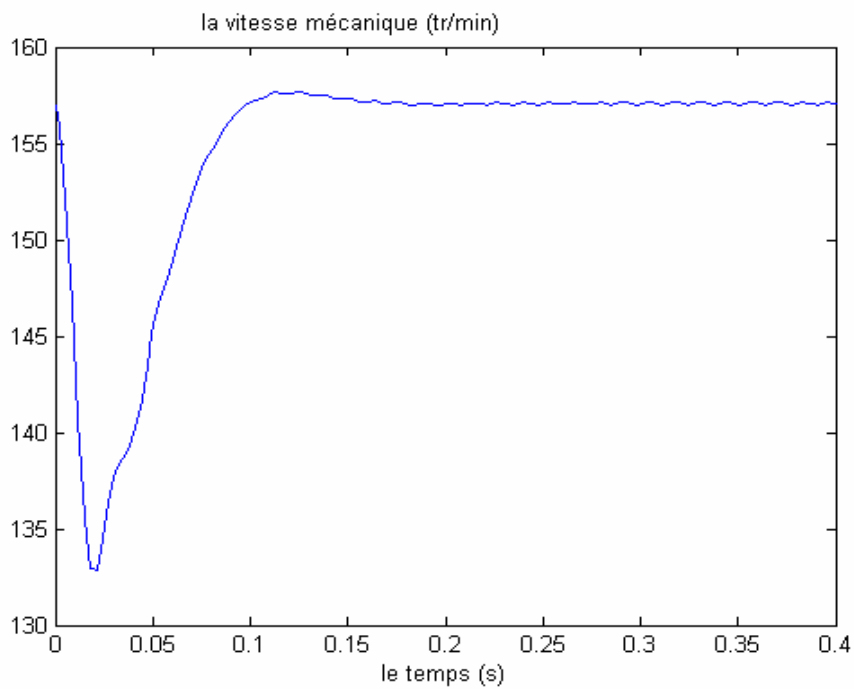
FigIII.51 schéma de simulation, en SIMULINK sous MATLAB, du modèle de la MADA dans le repaire lié au stator

Modélisation du système

III-9-Résultats de la simulation

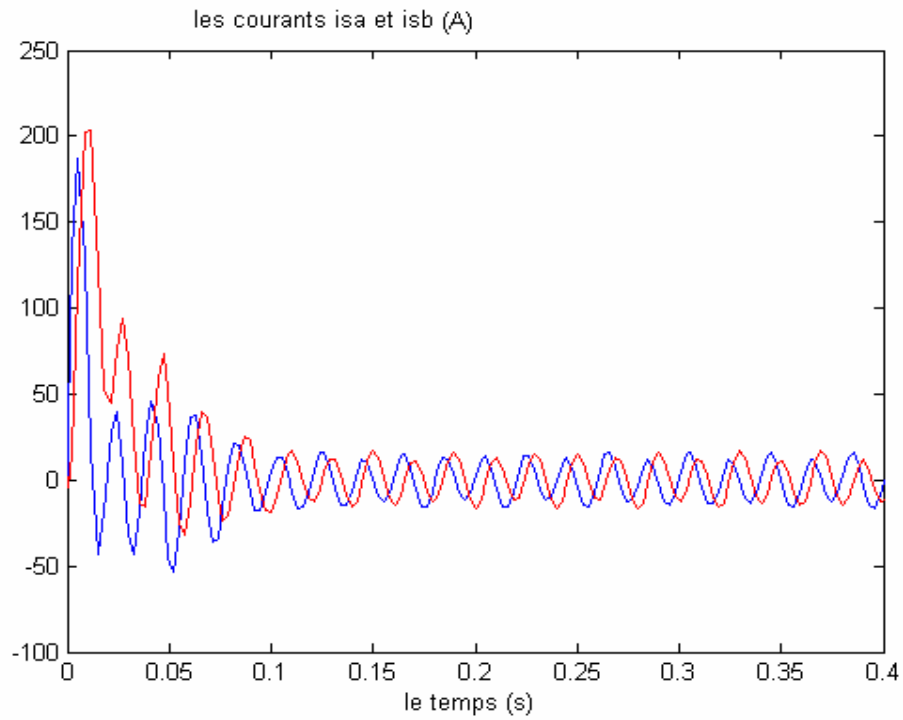


FigIII.52 Evolution du couple électromagnétique en fonction du temps ($c_e=6.4\text{N/m}$)

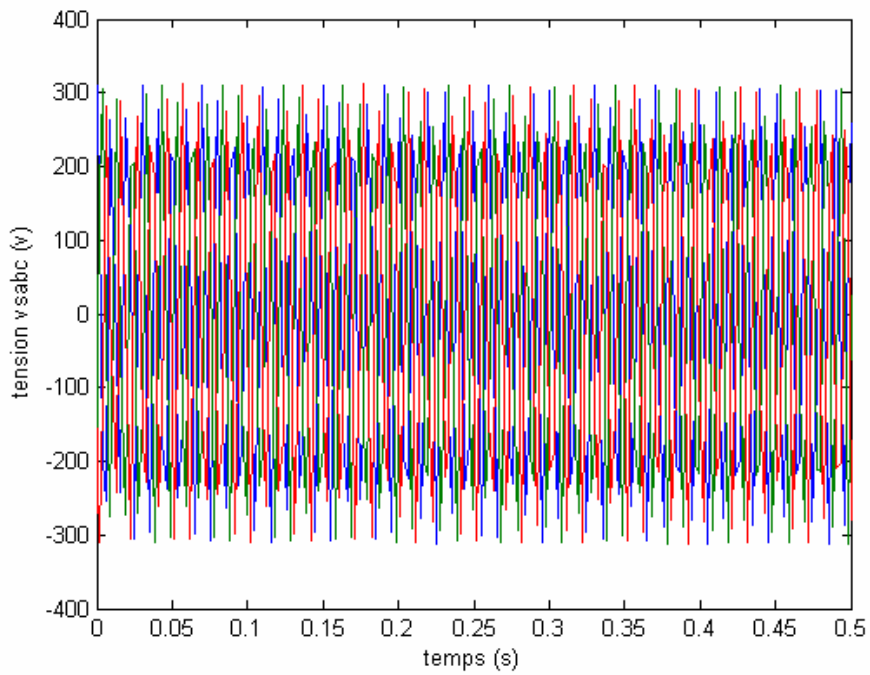


FigIII.53 Evolution de la vitesse en fonction du temps

Modélisation du système

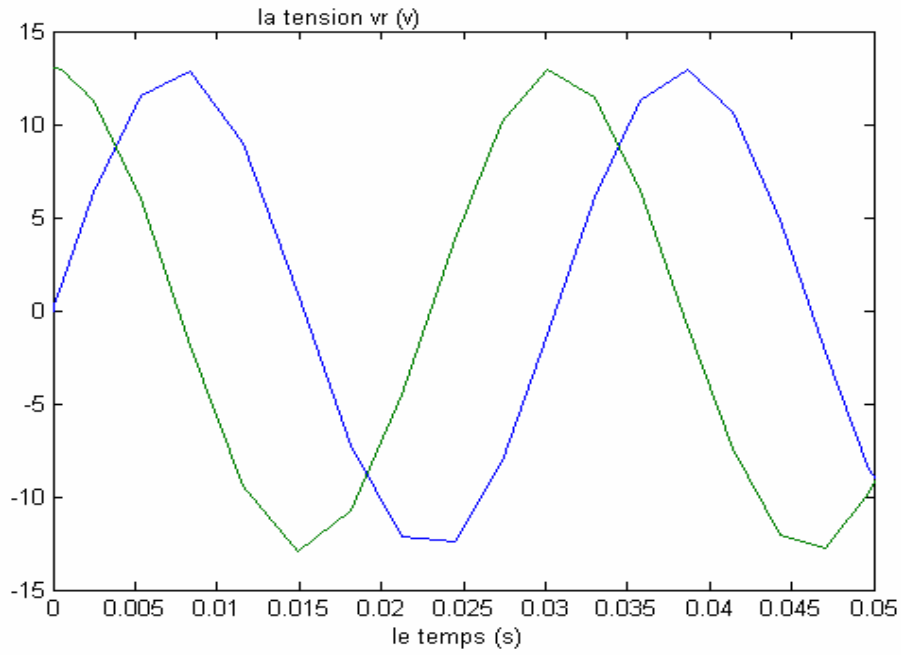


FigIII.54 Courants statoriques à la sortie de la génératrice dans la référence lié au stator

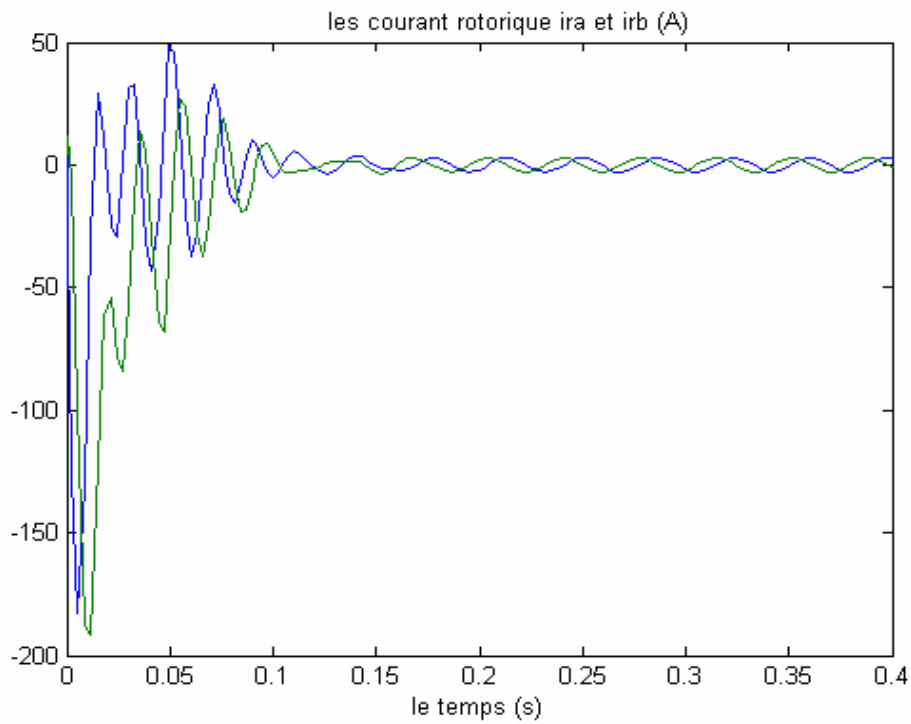


FigIII.55 Tensions statoriques à la sortie de la génératrice dans la référence liée au stator

Modélisation du système



FigIII.56 tensions rotoriques de la génératrice dans la référence lié au stator



FigIII.57 courants rotoriques de la génératrice dans la référence lié au stator

Modélisation du système

III-10-Interprétation

Pour le fonctionnement en charge de la génératrice, les résultats de la simulation enregistrés montrent la délicatesse de la modélisation de la MADA, en outre, les différentes figures (III.52), (III.53) certifient la présence de plusieurs modulations (oscillations) en régime permanent due à la mauvaise estimation de la position de l'angle de charge. Les figure (III.55) ,(III.56) concernent respectivement les tensions statoriques apparaissant aux bornes du stator de la MADA qui certifient la présence de plusieurs modulations (oscillation avec différentes fréquences) Les tensions rotoriques apparaissant aux bornes du rotor de la MADA sont alternatives de pulsation ω_r .

III-11-Conclusion

Dans ce chapitre nous avons d'abord modélisé la MADA, puis présenter et modéliser l'onduleur ainsi que la turbine éolienne, avec ses différents éléments utilisant un multiplicateur. Ce modèle a été élaboré sous MATLAB, afin de voir son efficacité. Après la validation de ce modèle, il est possible maintenant d'élaborer et réaliser la commande de système. C'est le but du prochain chapitre.

Conclusion générale

De nos jours maîtriser l'énergie est devenu un challenge politique et économique tout à fois qui suscite des conflits, mais y a-t-il un moyen afin de maîtriser cette demande énergétique diminuer nos consommations d'énergie primaire (gaz, pétrole, charbon...).

En ayant recours aux énergies renouvelables plus abondantes et moins chères pendant leur transformation ou leur conversion, est déjà une solution.

Parmi ces énergie, l'énergie éolienne étant donné qu'elle joue un rôle primordial dans la production d'énergie renouvelable, sans rejet toxique ni émission du gaz CO₂, et dont le vent représente un terrain de recherche important.

Dans ce projet, nous avons eu l'occasion de connaître les différentes sortes d'énergies qui se trouvent à travers le monde. grâce à la recherche bibliographique sur ce domaine en question, et en particulier l'énergie éolienne dont c'est l'objet de ce modeste travail.

Dans le premier chapitre le contexte des énergies renouvelables, un état de l'art de la génératrice éolienne est présenté dans le deuxième chapitre, on rappelle les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et les différents types d'éoliennes avec les machines électriques utilisées dans cette conversion d'énergie. Ce qui nous a amené à choisir la machine asynchrone à double alimentation de par ces qualités de fonctionnement.

La modélisation d'un système de génération d'énergie éolienne basé sur une machine asynchrone à double alimentation a été effectuée. La transformation de Park a été utilisée pour modéliser la génératrice et pour concevoir les différentes fonctions de sa commande. Ensuite, on a modélisé la turbine et l'onduleur ; ce qui nous a permis d'obtenir les courbes de variations des paramètres électriques et mécaniques pour les différents régimes de fonctionnement de la MADA.

Références

[1-5] PROGRAMME DES ENERGIES RENOUVELABLES ET DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE .mars 2011 réalisation SATINFO

[6] Frédéric Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », thèse de doctorat de l'université de Nantes, soutenue le 19/12/2003.

[7] SALAMA et AIMANI, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat de l'université des sciences et technologies de Lille1 (USTL),

[8] Adam MIRECKI, « étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse,

[9] HARITZA CAMBLOG « 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'école nationale supérieure d'arts et métiers, soutenue le 18 /12/2003.

[10] J. Martin, « Energies éoliennes », techniques de l'ingénieur, traite de génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.

[11] P. Leconte, M. Rapin, E. Széchenyi, « Eoliennes», techniques de l'ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. BM 4 640 21.

[12] MENY IVAN, « Modélisation et réalisation d'une chaîne de conversion éolienne petite puissance» la boratoire d'électronique de Montpellier (LEM), soutenue le 14/12/2004.

[13] Site Internet de l'Association Danoise de l'industrie éolienne,
<http://www.windpower.org/fr/core.htm>.

[14] A.H. Al-BAHRANI, « Analysis of Self-excited induction generators under unbalanced conditions», Electric Machines and power systems, 24, 1996, pp.117-129.

[15] F. ZIDANI, « Etude comparative par simulation numérique d'un pilotage vectoriel et scalaire d'une machine à induction alimentée par un onduleur à modulation de la largeur d'impulsion », Thèse de magister en électricité industrielle, Université de BATNA, 1996.

[16] B. ROBYNS, M.ESSELIN, «Power control of an inverter. Transformer association in a wind generator», Electromotion, vol.6, No. 1-2, 1999, pp.3-7.

[17] M. MACHMOUM, F. Poitiers, L. Moreau et M.E. ZAÏM, R. le DOEUFF, « Etude d'éoliennes à vitesse variable basées sur des machines asynchrones (MAS-MADA) » LARGE-GE44, Bd

de l'université, Bp 406, 44602 Saint Nazaire Cedex. E-mail : mohamed.Machmoum@polytech.uninantes.fr.

[18] J.G. SLOOTWEG, H. POLINDER MEMBER IEEE, W.L. KLING, MEMBER, IEEE, « Dynamic Modelling of a Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator », Electrical Power

Systems, 2Electncat Power Processing, Faculty of Information Technology and Systems, Delft University of Technology, P.O. Box 5031, 2600 GA Delft, The Netherlands
Phone: +31 152786219, Fax: +31 152781182, e-mail: j.g.slootweg@its.tudelft.nl

[19] Srinivas R. chellapilla, Badrul H. CVhowdhury, Senior Member, IEEE « A Dynamic model of Induction Generators for Wind power studies » [0-7803-7989-6/03/\\$17.00@2003](https://doi.org/10.7803-7989-6/03/$17.00@2003) IEEE.

[20] Paul Gipe, collaborateur régulier des revues Independent Energy et Windstats. Et l'auteur des ouvrages Wind Power for Home & Busines et Wind energy comes of age. «À l'étape de la maturité : L'énergie éolienne », <http://WWW.ilr.Tu-berlin.de/WKA/aletape.html>

[21] Krishna Vasudevan and P.Sasidhara Rao « A Modular Approach to the Simulation of Doubly –fed Induction Machine Systems » Department of Electrical Engineering Indian Institute of Technology Mdras 600036, INDIA.

[22] Milutin G. Jovanovic* and Robert E. Betz « Slip power recovery systems based on brushless doubly fed reluctance machines »University of Northumbria at Newcastle, School of Engineering Ellison Building, Newcastle upon Tyne NE1 8ST, UK. Tel: +44-191-2273016,
Fax: +44-191-2273684, EMail: milutin.jovanovic@nunn.ac.uk University of Newcastle, NSW 2308, Australia

[23] S. MÜLLER, M. DEICKE, & RIK W.DE DONCKER « Doubly FED Induction Generator systzems for wind Turbines » IEEE Indu stry applications Magazine. MAY/June 2002, email WWW.IEEE.ORG/IAS

[24] H.S.vicators, J.A Tegopoulos, Fellow .IEEE « Stady state Analysis of A Doubly . FED induction generator under synchronous operation» national Technical University of Athens, Département of éléctrical engineering 106 82. Athens .GREECE .IEEE .Transactions on Energy conversion, Vol .4, NO.3, September 1989.

[25] H.S.vicators, J.A Tegopoulos, Fellow .IEEE « Transient State Analysis of A Doubly. FED induction generator under Three Phase short circuit» IEEE national Technical University of Athens, Département of éléctrical engineering 106 82. Athens .GREECE .IEEE .Transactions on Energy conversion, Vol. 6, NO. 1, March 1991.

[26] FAN LIAO, J I SHENG, AND THOMAS A. LIPO, fellow IEEE « A New energy recovery scheme for Doubly –FED A justable –Speed Induction Motor Drives » IEEE. transactions on industry applications, Vol. 27, NO. 4, July. / august 1991

[27] GERALD.M.BROWN, BARNA. BZABO DOS, senior member,IEEE,GERARD J .HOOLBOOM senior .member IEEE, and MIHEL .E POLOUJADOFF, fellow IEEE « Highpower cycloconverter drive for Double –Fed induction Motors » IEEE transactions on Industrial electronics vol 39 N° 3, june 1992.

[28] E. BOGALECHA « power control of double –fed induction generator without speed or position sensor» brighton 13 16,9 .1993

[29] L. Xu & W. Cheng “ Torque and reactive power control of a doubly fed induction machine by position sensorless schem “, IEEE trans. On Industry Application 31 (1995), no. 3, p. 636{642, mai/juin 1995.

[30]C.saget, « la variation électronique de vitesse au service de la production d’énergie électrique par éolienne » .REE, n° 7, juiullet 1998, pp. 42-48.

[31] E.S Abdin, w.xu « control design and dynamic performance analysis of a wind turbine – induction generator unit» IEEE Trans, on energy conversion, vol 15, N° 1, March 2000.

[32] R.Mukand patel, « wind and solan power systems» CRC .press, 1999.

[33] E, DE Vries, « wind turbines technology trends» vol6, N°4,jarnes et janes (science publishers), renewable energy world, July. august 2003.

[34] G.M BROWN « Hybrid control of a cycloconverter for Double –Fed motors in traction drivers » M.eng thesis , Mc Mster university , Hamilton , ontario 1984 en VIANT

[35] J. Wilkie, W .E. Leithead, C Anderson, « modelling of wind turbines by simple models wind engineering» vol 14, N° 4, 1990, pp 247-274