

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Technologie
Département : Électrotechnique
Domaine : sciences et technologies
Filière : Électrotechnique
Spécialité : Électrotechnique Industrielle

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Étude d'une machine synchrone à aimant
permanent pour la production d'énergie électrique**

Présenté par :

- Badis Seif Eddine .
- Bahlouli Ramzi .

Encadrant : Omeiri Amar .

Grade : Professeur.

Université : Annaba .

Jury de Soutenance :

Ghoudelbourek Sihem	MCA	Université d'Annaba	Président
Omeiri Amar	PROF	Université d'Annaba	Encadrant
Adjabi Mohamed	PROF	Université d'Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023

Dédicace

seif eddine

Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU De m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail. J'ai l'honneur de dédie ce modeste travail tous d'abord à :

 Ma très chère mère et père .

Le plus beau paradis de ma vie, source de tendresse et de sourire, secret de mon succès et de mon bonheur, "Je lui souhaite un bon et éternel repos"

 ma sœur : Radja

 Mon frère : choaib

 A mes amies, surtout qui m'ont aidé à réaliser ce travail

Dédicace

Ramzi

Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU De m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail. J'ai l'honneur de dédie ce modeste travail tous d'abord à :

 Ma très chère mère et père .

Le plus beau paradis de ma vie, source de tendresse et de sourire, secret de mon succès et de mon bonheur, "Je lui souhaite un bon et éternel repos"

 ma sœur Rima-Ahlem-Imen-Ranim .

 Mon frère : Abed el Aziz .

 A mes amies, surtout qui m'ont aidé à réaliser ce travail .

Remerciement

**Nous tenons à remercier premièrement Dieu Tout Puissant pour la
volonté, la santé et la patience, qu'il**

**Nous avons donné durant toutes ces longues années. Nous tenons
également à exprimer nos vifs**

Remerciements à notre encadreur Monsieur **Omeiri Amar , pour avoir
proposé ce thème**

**Et suivi le déroulement de ce mémoire et pour la confiance et l'intérêt
qu'elle nous 'a témoigné tout au long de la réalisation de ce travail.**

**Nous remercions les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en
participant au jugement de ce travail.**

**Nous tenons à remercier vivement tous ceux qui nous ont aidés de près ou
de loin à réaliser ce travail.**

Nous remercions aussi tous les enseignants du département génie

**Électrique qui ont contribué à notre formation. Enfin, Nous tenons
exprimer nos reconnaissances à**

Tous nos amis et collègues pour le soutien moral

Résumé

Une éolienne est une production de l'électricité grâce au vent qui met en mouvement un rotor, permettant sa transformation en énergie mécanique. La vitesse de rotation de l'arbre entraîné par le mouvement des pales est accélérée par un multiplicateur. Cette énergie mécanique est ensuite transmise au générateur. Un transformateur situé à l'intérieur du mât élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur, pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à moyenne tension du réseau électrique. Un parc éolien est constitué de plusieurs éoliennes espacées de plusieurs centaines de mètres et connectées entre elles par un réseau interne souterrain et raccordées au réseau public par l'intermédiaire d'un poste de livraison. Pour pouvoir démarrer, une éolienne nécessite une vitesse de vent minimale d'environ 10 à 15 km/h. Pour des questions de sécurité, l'éolienne s'arrête automatiquement de fonctionner lorsque le vent dépasse 90 km/h. La vitesse optimale est de 50 km/h.

ملخص

طاقة توربينات الرياح الكهربائية عن طريق الرياح التي تحرك العضو الدوار، مما يسمح بتحويله إلى طاقة ميكانيكية. يتم تسريع سرعة دوران العمود الذي تحركه حركة الشفرات بواسطة المضاعف. ثم تنتقل هذه الطاقة الميكانيكية إلى المولد. يقوم المحول الموجود داخل الصاري برفع جهد التيار الكهربائي الناتج عن المولد، بحيث يمكن حمله بسهولة أكبر في خطوط الجهد المتوسط للشبكة الكهربائية. تتكون مزرعة الرياح من عدة توربينات رياح تفصل بينها عدة مئات من الأمتار ومتصلة بشبكة داخلية تحت الأرض ومتصلة بالشبكة العامة عبر محطة توصيل. كم / ساعة. لأسباب تتعلق بالسلامة، تتوقف توربينات الرياح تلقائيًا 15 إلى 10 للبدء، تتطلب توربينات الرياح سرعة رياح تقل عن 10 كم / ساعة 50 كم / ساعة. السرعة المثلى 90 عن العمل عندما تتجاوز الرياح

Notations et symboles

V : la vitesse du vent.

S : la surface des pales.

ρ : densité du vent.

ω_s : Pulsation statorique

ω_r : Pulsation rotorique

P : nombre de paires de pôles.

P_m : puissance mécanique.

C_p : coefficient de puissance.

GSAP : générateur synchrone à aimant permanent.

MADA : machine asynchrone à double alimentation.

S, r : indices d'axes correspondant au stator et rotor.

A, b, c : indices correspondant aux trois phases.

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : tensions d'alimentation des phases statoriques.

V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} : tension d'alimentation des phases rotoriques.

I_{sa}, I_{sb}, I_{sc} : courants statoriques.

V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} : courants rotoriques.

ϕ_{sa} , ϕ_{sb} , ϕ_{sc} : flux statoriques.

ϕ_{ra} , ϕ_{rb} , ϕ_{rc} : flux rotoriques.

d, q, 0 : système d'axes dans le référentiel de PARK

L_s : la matrice des inductances statoriques.

L_r : la matrice des inductances rotoriques

R_r, I_r : résistance et inductance propre d'une phase statorique.

R_s, I_s : résistance et inductance propre d'une phase rotorique.

Θ : angle électrique.

G : gain de multiplicateur

J_g : Moment d'inertie du rotor de la génératrice

J_t : moment d'inertie de la turbine

C_g : Couple de la génératrice

Ω_{mec} : vitesse mécanique

J : Moment d'inertie totale

C_{mec} : Couple mécanique totale appliqué au rotor de l'éolienne

f : Coefficient de frottement visqueux

C_{em} : Couple électromagnétique

C_f : Le couple résistant dû aux frottements

R : Rayon de la turbine éolienne

β : Angle de calage des pales de la turbine

La liste des Figures et des Tableaux .

Chapitre I

Fig.I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent	5
Fig.I. 2 : schéma d'une éolienne	8
Fig.I. 3 : Différents types de tour	9
Figure 4 : technologie éolienne à axe vertical.	9
Figure 5: technologie éolienne à axe horizontale	10
Fig.6 : Principe de la conversion de l'énergie éolienne	12
Fig(I.7): Caractéristique couple/vitesse	15
Fig I.8 : connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.....	16
Fig I.9 : éolienne connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance	17
Fig I.10: Schéma de la connexion au réseau de l'éolienne avec la MAS à double stator	18
Fig(I.11) : schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor.....	19
Fig (a) : MADA - structure Kramer	20
Fig(b): MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée	20
Fig(b.1) : Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique	21
Fig(c) : Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.....	21
Fig(d) : Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau	22
Fig(12) : système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné. (a) avec redresseur à diodes, (b) avec convertisseur commande	24
Fig.(13) : systèmes éoliens basés sur la Machine Synchrone à Aimants Permanents (a) GSAP avec convertisseurs MLI (b) GSAP avec redresseur, hacheur et convertisseur	25
Fig.14 : Système éolien à coût minimum basé sur GSAP.....	26

chapitre II

Fig 1: Modèle de la machine synchrone à aimant permanent en abc	29
Fig 2 : Modèle de la machine en biphasé	29
Fig 3 : Boucle de régulation du courant i_d	34
Fig 4 : Boucle de régulation du courant i_q	35

Chapitre III

Fig 1 : Simulation du profil de la vitesse du vent	38
Fig 2 : Colonne d'air animée d'une vitesse v	39
Fig 4 : Tube de courant autour d'une éolienne.	39
Fig 5 : Coefficient de puissance	41
Fig 6 : Exemple de variation du coefficient de puissance en fonction de l'angle d'orientation des pales et de la ration de vitesse	42
Fig 7 : Vitesse de vent V et vitesse tangentielle de l'aubage $\Omega_t R_t$	42

Fig 8 :Puissance théorique disponible en fonction de la vitesse de vent	44
Fig 9 : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné	44
Fig.10 : Eléments caractéristiques d'une pale	46
Fig 11 : Directions du vent sur un tronçon de pale.....	46
Fig 12 : Forces appliquées sur un tronçon de pale	47
Fig 13 : caractéristiques $C_p=f(\lambda)$ pour cinq valeurs de β :	Erreur ! Signet non défini.
Fig 14 : Points de MPPT d'une éolienne tripale avec la vitesse de vent.....	48
Fig 15 : Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable	49
Fig 16 : interface d'électronique de puissance	49
Fig 17 : Modèle mécanique simplifié de la turbine	50
Fig 18 :schéma de la turbine éolienne.....	51
Fig 19 : Organigramme de simulation de la turbine éolienne	51
Fig 20 : Schéma bloc d'une turbine éolienne à vitesse variable.....	53

Chapitre IV

Figure (IV.1) schéma bloc du modèle de la turbine.....	56
Figure (IV.2) schéma bloc du modèle de la machine.....	56
Figure (IV.3) schéma bloc de simulation de la chaine de conversion d'énergie éolienne.	57
Figure (IV.4) Vitesse de la turbine ω_m [rad/s].....	57
Figure (IV.5) Le couple T_e	58
Figure (IV.6) La tension direct V_{dc}	58
Figure (IV.7) Courant statorique i_a i_b i_c	58
Figure (IV.8) Tension statorique V_a V_b V_c	59
Figure (IV.9) Tension ($V_g = V_{ab}$) avant le filter.....	59
Figure (IV.10) Zoom Tension V_{ab} (ab) avant le filtre.....	59
Figure (IV.11) THD % de la Tension V_{ab} avant le filtre.	60
Figure (IV.12) Tension V_{ab} après le filtre.	60
Figure (IV.13) Zoom Tension V_{ab} après le filtre.	60
Figure (IV.14) THD % de la Tension V_{ab} après le filtre.	61

Les Tableaux (chapitre I. II. III IV).

Tableau 1 : Consistance du programme national de développement des énergies	4
renouvelables sur la période 2015-2030.....	4
Tableau 2 : Classification des éoliennes selon leur puissance nominale	11
Tableau 3 : Différente type des machines	13
Tableau IV.1 Paramètre de la machine synchrone.....	56

sommaire

chapitre I

État de l'Art sur la production d'énergie éolienne.

Introduction générale	1
Introduction.	3
I.1 Historique	3
I.2 Programme national algérien de développement des énergies renouvelables	3
I.2.1 Consistance du programme national algérien de développement des énergies renouvelables	4
I.2.2 La place de l'énergie éolienne dans ce programme	4
I.2.3 Potentiel éolien en Algérie	4
I.3 Définition De L'énergie Eolienne	5
I.4 Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne	6
I.4.1 Avantages	6
I.4.2 Inconvénients	7
I.5 Principaux Composants Des Eoliennes	8
I.6 types des turbines éoliennes	9
I.6.1 Eolienne à axe vertical	9
I.6.1.a. Avantages :	10
I.6.1.b. Inconvénient :	10
I.6.2. Eoliennes à axe horizontal	10
I.6.2.a. Avantages :	11
I.6.2.b. Inconvénient :	11
I.7. Classification des éoliennes selon le type de génératrice	11
I.8 Principe de fonctionnement d'une éolienne	11
I.9 Classification des éoliennes selon le type de génératrice	12
I.9.1 Classification des éoliennes selon leur vitesse :	13
I.10. Etat de l'art sur la conversion électromécanique	15
I.10.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone	15
I.10.1.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil	15
I.10.1.2 Machine Asynchrone à Double Stator	17
I.10.1.3 Machine Asynchrone à Double Alimentation type "rotor bobiné"	18
I.10.2 Systèmes utilisant la machine synchrone	22
I.10.2.1 Générateur Synchrone à Rotor Bobiné	23
I.10.2.2 Générateur Synchrone à Aimants Permanents (GSAP)	24
I.10 Conclusion	26

Chapitre II Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP).

Introduction	27
II.1. Description	27
II.2. Principe de fonctionnement d'une génératrice synchrone	28
II.3. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents	28
II.3.1 Les hypothèses simplificatrices	28
II.3.2 Modèle en ABC	28
II.4. Commande vectorielle de la MSAP	32
II.4.1 Commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par copensation	33
II.4.2 Calcul du régulateur PI	34
II.5 Conclusion	36

Chapitre III Modélisation de la turbine éolienne

Introduction :	37
III.1 Modèle du vent	37
III.2 Conversion de l'énergie éolienne	38
III.2.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique	38
III.2.3 Coefficient de puissance	41
III.2.4 La vitesse spécifique ou normalisée [Tip-Speed-Ratio]	42
III.2.5 Coefficient de couple	43
III.2.6 Production d'énergie mécanique	43
III.2.7 L'angle d'inclinaison (Blade pitch angle) :	44
III.2.8 Effort sur une pale d'éolienne	47
III.2.9 Relation du coefficient de puissance avec l'angle de calage et la vitesse relative :	47
III.3 Poursuite du point de Maximum de Puissance (Maximal Power Point Tracking, MPPT)	48
III.4 Production optimale d'énergie	48
III.5 Modélisation du système éolien	50
III.5.1 Présentation du système	50
III.5.2 Hypothèse simplificatrices pour la modélisation de la turbine	50
III.5.3 Modélisation de la turbine	51
III.5.3.1 Modèle du multiplicateur	52
III.5.3.2 Equation dynamique de l'arbre	52
III.6 Conclusion	53

Chapitre IV Simulation de la système Turbine GSAP

IV.1 Introduction	56
IV.2 Simulation de la chaine de conversion	56
IV.2.1 La turbine	56
IV.2.2 La machine synchrone à aimant permanent.....	56
IV.2.3 Schéma de Simulation du comportement du système	57
IV.3 Conclusion.....	61

Introduction générale

L'industrie des machines électriques a connue un grand essor avec l'avènement de semiconducteurs et de nouveaux matériaux pour aimant permanents.

L'apparition d'aimants de plus en plus performants à base de terres rares a provoqué un intérêt grandissant pour leur utilisation comme inducteurs de machines électriques alimentées par des convertisseurs statiques.

Le moteur synchrone autopiloté à aimants est l'une des solutions largement employée. Ce type d'association se développe dans les gammes des petites et moyennes puissances pour les systèmes de positionnement en robotique et lorsqu'on recherche un couple massique élevé dans des procédés à vitesses variables.

La machine synchrone à aimant permanent [MSAP] est une machine synchrone dans laquelle on remplace l'excitation électrique au niveau du rotor par des aimants permanents qui assurent la production d'un champ magnétique jouant le même rôle que le champ électromagnétique créé par les bobines excitatrices au niveau du rotor.

Les machines synchrones à aimants sont de plus en plus utilisées en industrie dans les applications en robotique. Ces machines nous permettent d'avoir des actionneurs avec un faible moment d'inertie, une puissance massique élevée et un fonctionnement souple en vitesse variable.

L'excitation de MSAP au moyen d'aimants permanents permet la suppression des contacts glissants, ce qui permet la réduction de maintenance et facilite le travail de la machine, elle permet également de placer un grand nombre de pôles et de réduire les pertes d'excitation.

Les performances d'une machine à aimant se jugent sur certains critères qui sont : maximum de puissance, minimum de pertes, un minimum d'ondulation du couple.

Pour obtenir un couple volumique important avec un minimum de pulsations, il faut faire un bon choix de la structure et du type d'alimentation ; ce choix est influencé par le sens, la nuance et l'ouverture sur un pas polaire des aimants.

Dans le pré-dimensionnement des machines à aimants, des méthodes ont été développées. Elles sont parfois analytiques et souvent numériques. Les premières sont efficaces mais sont limitées par la complicité géométrique.

Dans notre étude, nous adoptons une méthode analytique de calcul de champ basée sur la méthode de séparation des variables.

Nous nous sommes limités, dans cette étude, au calcul des inductions magnétiques dans l'entrefer. Ce travail a été partagé en trois chapitres.

Le premier chapitre porte sur les aimants permanents, et leurs applications, ainsi que

les machines synchrones à aimants.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons un modèle analytique pour la résolution des équations du champ dans le cas considéré (machine à aimants à pôles lisses).

Dans le troisième chapitre, nous étudions l'influence des paramètres géométriques sur l'induction dans l'entrefer (nombre de paires de pôles, hauteur des aimants, ouverture des aimants et entrefer mécanique.).

Enfin, nous terminons par une conclusion général

Introduction.

Une éolienne est un dispositif qui convertit la puissance du vent en énergie électrique ou bien en énergie mécanique. Ainsi, le maximum d'énergie émis ne dépend pas seulement de la l'aérogénérateur mais aussi des limites de la vitesse du vent. De ce fait, pour maximiser cette conversion énergétique ; une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable.

I.1 Historique

L'énergie éolienne est l'une des plus vieilles énergies de la terre. Le vent fût utilisé pendant plusieurs siècles pour la propulsion des navires, il présentait presque la seule source d'énergie pour les navires jusqu'à ce que WATT inventait le moteur à vapeur dans le dix huitième siècle.

En 1887 Charles F. Brush construisit ce qui est aujourd'hui considéré comme la première éolienne à fonctionnement automatique destinée à la production d'électricité. Après, vient Mr Danois Poul La Cour, considéré comme le père de toutes les éoliennes modernes destinées à la production d'électricité, il découvrit que les éoliennes à rotation rapide, comprenant un nombre limité de pales, étaient bien plus efficaces pour la production d'électricité que celles à rotation lente composées de nombreuses pales. Météorologue de formation, il construisit en 1891 la première éolienne destinée à la production d'électricité. Ensuite, Mr Johannes Juul, ingénieur électricien et ancien élève de La Cour, fut le premier à mettre au point une éolienne moderne capable de produire du courant alternatif. En 1956-1957, il conçut et construisit la plus grande éolienne du monde, la "turbine de Gedser " de 200 kW.

I.2 Programme national algérien de développement des énergies renouvelables

A travers ce programme de développement des énergies renouvelables, l'Algérie compte se positionner comme un acteur majeur dans la production de l'électricité à partir des filières photovoltaïques et éoliennes en intégrant la biomasse, la cogénération, la géothermie et au-delà de 2021, le solaire thermique. Ces filières énergétiques seront les moteurs d'un développement économique durable à même d'impulser un nouveau modèle de croissance économique.

37 % de la capacité installée d'ici 2030 et 27 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale, seront d'origine renouvelable.

I.2.1 Consistance du programme national algérien de développement des énergies renouvelables

La consistance du programme en énergies renouvelables à réaliser pour le marché national sur la période 2015-2030 est de 22 000 MW, répartie par filière comme suit:

Unité : MW	1er Phase 2015-2020	2eme Phase 2021-2030	TOTAL
Photovoltaïque	3000	10575	13575
Eolien	1010	4000	5010
CSP	/	2000	2000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1000
Géothermie	05	10	15
TOTAL	4525	17475	22000

Tableau 1 : Consistance du programme national de développement des énergies renouvelables sur la période 2015-2030.

I.2.2 La place de l'énergie éolienne dans ce programme

Suite à la révision du programme national en 2015, la part de l'énergie éolienne a été rehaussée de 2000 MW à 5010 MW et occupe désormais la seconde place derrière le photovoltaïque, loin devant les autres filières. L'importance accordée à l'éolien est certainement due à l'amélioration considérable des coûts moyens du kilowatt/heure (kWh).

I.2.3 Potentiel éolien en Algérie

Le potentiel éolien diverge selon la situation géographique. Ainsi au nord du pays, le potentiel éolien se caractérise par une vitesse moyenne des vents modérées (1 à 4 m/s) avec des microclimats autour d'Oran, Annaba, sur les hauts plateaux et à Biskra. Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux. Au Sud, la vitesse moyenne des vents dépasse les 4m/s, plus particulièrement au sud-ouest, avec des vents qui dépassent les 6m/s dans la région d'Adrar. L'Algérie a un régime de vent modéré (2 à 6 m/s) ,selon la carte des vents, en Algérie établie par le centre de développement des énergies renouvelable CDER laboratoire de l'énergie éolienne.

I.3 Définition De L'énergie Eolienne

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

L'énergie éolienne est une énergie intermittente "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences. Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont 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 produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière

L'énergie éolienne est utilisée par l'homme depuis très longtemps déjà. Depuis plus de 100 ans, elle est utilisée pour produire de l'électricité, source d'énergie fondamentale dans notre société actuelle. En effet, on utilise l'électricité pour la plupart de nos activités, que ce soit dans le domaine domestique ou industriel.

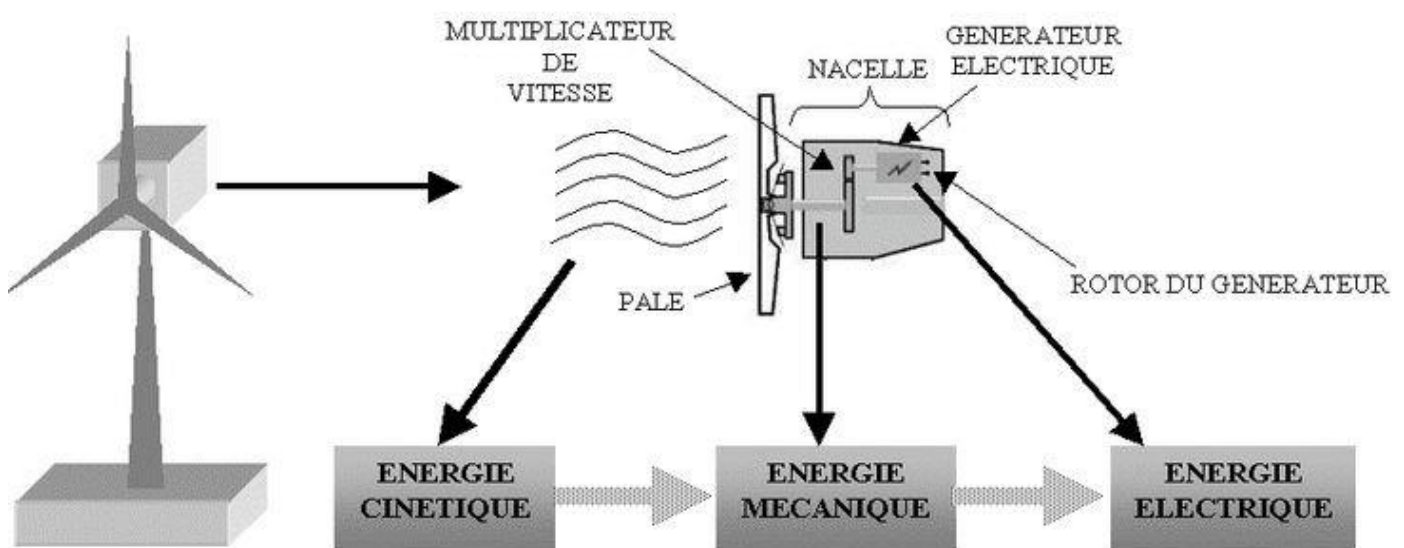


Fig.I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

I.4 Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne

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

I.4.1 Avantages

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement :

- L'impact néfaste de certaines activités de l'homme sur la nature est aujourd'hui reconnu par de nombreux spécialistes. Certaines sources d'énergie, contribuent notamment à un changement global du climat, aux pluies acides ou à la pollution de notre planète en général. La concentration de CO₂ a augmenté de 25% depuis l'ère préindustrielle et on augure qu'elle doublera pour 2050 [08]. Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0,6° C depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5° C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand des 10000 dernières années. Toutes les conséquences de ce réchauffement ne sont pas prévisibles, mais on peut par exemple avancer qu'il provoquera une augmentation du niveau de la mer de 15 à 95 cm d'ici l'an 2100 [08].
« L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de CO₂ ».
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles. Ainsi, l'exploitation de l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 millions de tonnes de CO₂, 21 mille tonnes de SO₂ et 17,5 mille tonnes de Nox. Ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique .
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les

pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.

- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.
- Bon marché : elle peut concurrencer le nucléaire, le charbon et le gaz lorsque les règles du jeu sont équitables.
- Respectueuse des territoires : les activités agricoles/industrielles peuvent se poursuivre aux alentours.

I.4.2 Inconvénients

L'énergie éolienne possède aussi des désavantages qu'il faut citer :

- L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
- ✓ L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéroturbines.
- ✓ La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- ✓ Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en
- ✓

- ✓ terme de coût, l'éolien puissant sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, est entrain de concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.

I.5 Principaux Composants Des Eoliennes

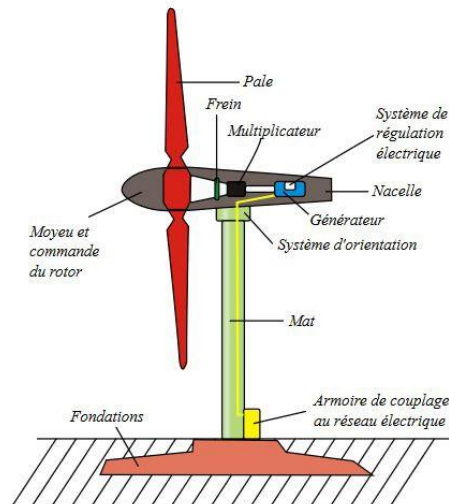


Fig.I. 2 : schéma d'une éolienne

- **La nacelle** : Au sommet du mât se trouve la nacelle qui regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique (arbres primaire et secondaire, multiplicateur, Le frein, générateur...)
- **La tour (le mat)** : C'est un tube d'acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum d'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol. Trois grands types de tour existent, à savoir :
 - **Tour mât haubané** de construction simple et moins coûteuse, elle s'adresse essentiellement aux machines de faible puissance. Une intervention au niveau de la nacelle nécessite en général de coucher le mât.
 - **Tour en treillis** qui sont les moins chères sont souvent mal acceptées et très peu utilisés. Son avantage essentiel est sa simplicité de construction, qui la rend attractive pour les pays en voie de développement. Pour des machines de grande taille, son aspect inesthétique devient un handicap certain.
 - **Tour tubulaire** qui est beaucoup plus élégant, a un cout qui peut atteindre trois à quatre fois celui d'un pylône haubané.

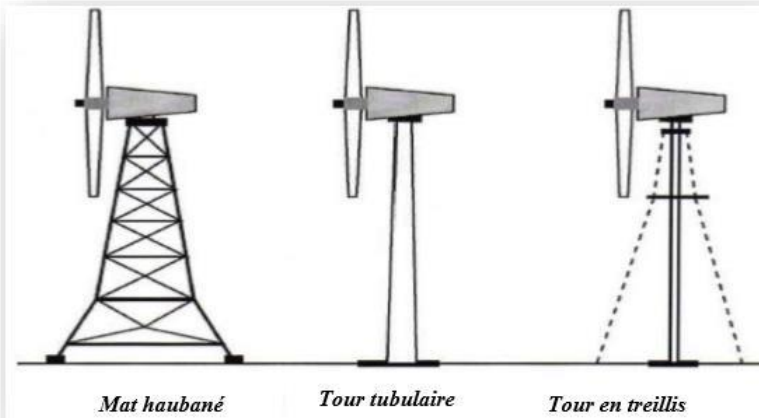


Fig.I. 3 : Différents types de tour

- **Le rotor** : Le rotor est entraîné par l'énergie du vent via des pâles, il est branché directement ou indirectement (via un multiplicateur de vitesse à engrenages) au système mécanique qui utilisera l'énergie recueillie (pompe, générateur électrique ...).
- **Le multiplicateur** : Sert à adapter la vitesse de la turbine de l'éolienne à celle de la génératrice électrique.
- **La génératrice** : C'est un alternateur qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. C'est généralement soit une machine synchrone, ou une machine asynchrone à cage ou encore une machine à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre quelque kW à 10 MW.

I.6 types des tourbines éoliennes

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui se différencient essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéroturbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal.

I.6.1 Eolienne à axe vertical

Ils ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologiques ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieux.



Figure 4 : technologie éolienne à axe vertical.

A nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue. Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit.

I.6.1.a. Avantages :

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

I.6.1.b. Inconvénient :

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

I.6.2. Eoliennes à axe horizontal

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent.

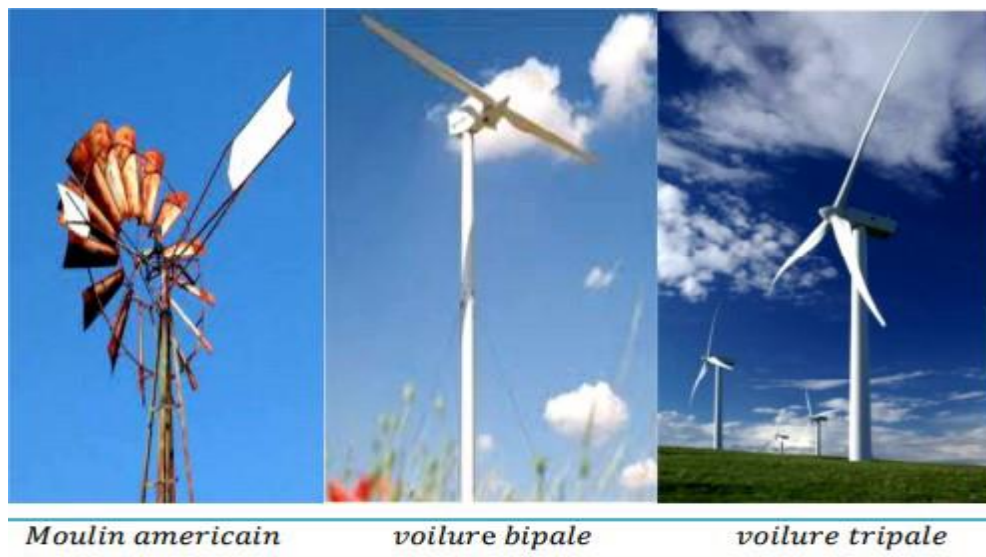


Figure 5: technologie éolienne à axe horizontale.

I.6.2.a. Avantages :

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

I.6.2.b. Inconvénient :

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical sont encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolées.

I.7. Classification des éoliennes selon le type de génératrice

Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale, ainsi nous avons :

- Les éoliennes de petite puissance : inférieures à 40 KW
- Les éoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de KW
- Les éoliennes de forte puissance : supérieures à 1 MW

De plus, le tableau ci-dessous propose une classification de ces éoliennes selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice :

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

Tableau .2 : Classification des éoliennes selon leur puissance nominale

I.8 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.

- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique transmise en suite au réseau électrique.

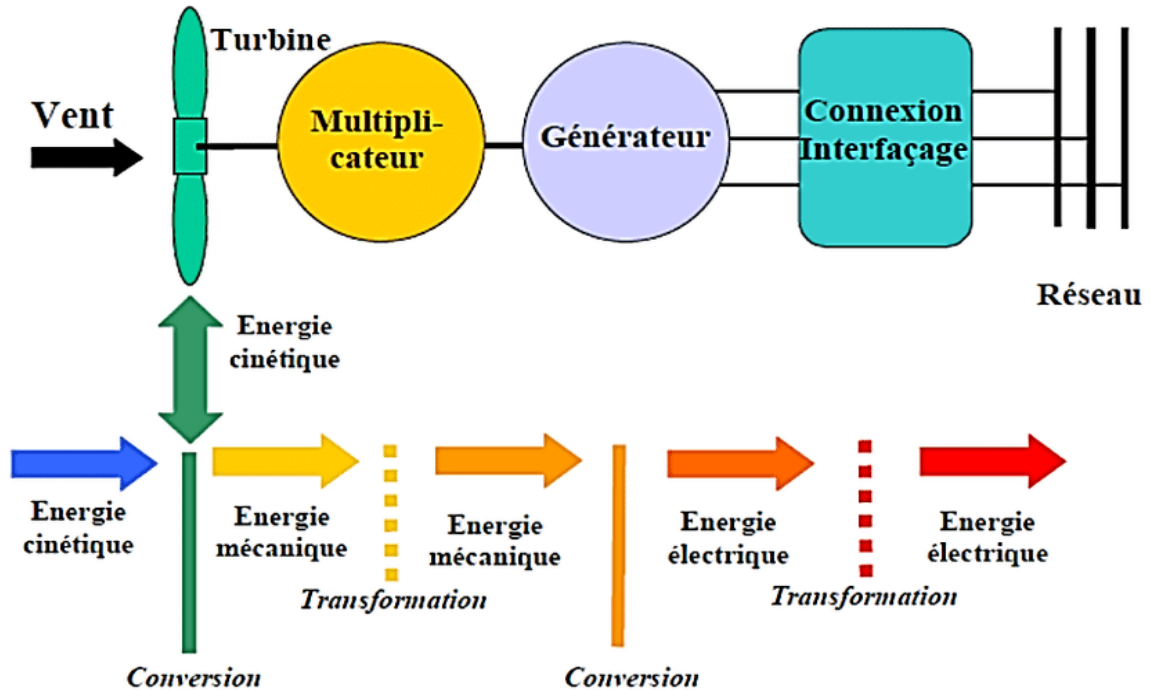


Fig.6 : Principe de la conversion de l'énergie éolienne

Son principe de fonctionnement est donc relativement simple. Pour résumer, le vent va faire tourner les pales qui elles-mêmes vont faire tourner le générateur. A son tour le générateur va transformer l'énergie mécanique du vent en énergie électrique.

L'électricité est dirigée vers le réseau électrique ou vers des batteries de stockage.

I.9 Classification des éoliennes selon le type de génératrice

Un générateur électrique est un dispositif permettant de produire de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie. Donc il existe différents types de génératrices. On les classe généralement en deux catégories, les génératrices synchrones et les génératrices asynchrones. Le tableau suivant montre les avantages et inconvénients des différentes machines.[2]

M. asynchrone (à cage)	Avantages	Inconvénients
	Faible cout	Puissance extraite non optimisée
	Machine robuste	Maintenance de boite de vitesse
	Fiabilité de l'électronique de puissance	Pas de contrôle de l'énergie réactive
		Magnétisation de la machine imposée par le réseau
M. asynchrone (MADA) Ou (GADA)	Machine robuste	Maintenance de boite de vitesse
	Fonctionnement à vitesse variable	Prix de l'électronique de puissance
	Puissance extraite optimisée	Contrôle commande complexe
	Machine standard	Contact glissant bague balais
Machine synchrone (MSAP) Ou (GSAP)	Très bon rendement	Cout élevé (à cause du prix des aimants)
	Fonctionnement à vitesse variable Sur toute la plage de vitesse	Prix de l'électronique de puissance
	Puissance extraite optimisée pour les vents faibles	Beaucoup plus chère
		Moins robuste

Tableau I.3 : Différent type des machines**I.9.1 Classification des éoliennes selon leur vitesse :**

Il y a deux types d'éoliennes raccordées aux réseaux électriques : les éoliennes à vitesse fixe constituées d'une machine asynchrone à cage d'écureuil et les éoliennes à vitesse variable constituées d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) ou d'une machine

synchrone à aimants permanents (MSAP). Ces dernières (MADA et MSAP) sont principalement installées afin d'augmenter la puissance extraite du vent ainsi que pour leurs capacités de réglage.

- ✓ **Concernant les éoliennes à vitesse fixe** : Elles sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone à cage d'écureuil est directement couplée au réseau sans convertisseur de puissance. Sa vitesse mécanique est fonction de la fréquence du réseau et du nombre de paires de pôles de la génératrice. Les avantages des éoliennes à vitesse fixe utilisant des machines asynchrones à cage d'écureuil peuvent se résumer dans les points suivants :
 - ✓ Système électrique simple.
 - ✓ Grande fiabilité.
 - ✓ Prix modéré

Leurs inconvénients majeurs résident en :

- ✓ Une puissance extraite non optimale : Ce type d'éoliennes n'offre quasiment pas de possibilité de réglage de la puissance générée.
- ✓ L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur asynchrone : La connexion directe au réseau électrique d'une génératrice asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée.
- ✓ **Concernant les éoliennes à vitesse variable** : Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales. De plus, il limite la plage de vitesses de vent exploitable. Ces deux principaux inconvénients peuvent, en grande partie, être levés grâce à un fonctionnement à vitesse variable qui permet alors de maximiser la puissance extraite du vent. Mais dans ce cas, l'utilisation d'un convertisseur à base d'électronique de puissance entre la génératrice et le réseau est nécessaire. Cette dernière est généralement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue.

Parmi les avantages de cette configuration nous avons :

- ✓ L'augmentation du rendement énergétique.
- ✓ La réduction des oscillations de couple (Réduction des efforts subis par le multiplicateur de vitesse et les autres parties mécaniques).
- ✓ La génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité

I.10. Etat de l'art sur la conversion électromécanique

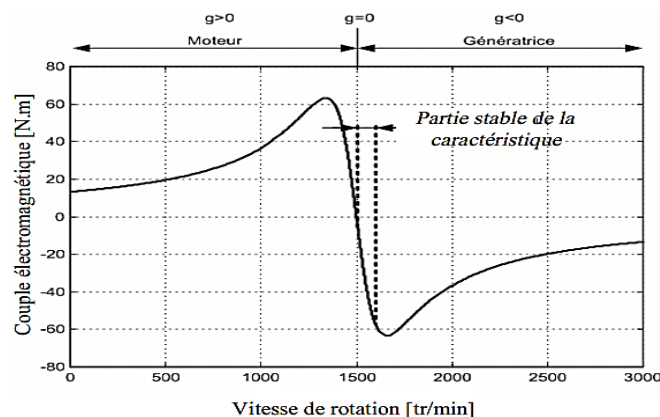
La technologie des aérogénérateurs a énormément évolué ces 20 dernières années entraînant une spécialisation des différents types d'éolienne. Différents types de machines électriques peuvent être utilisés pour la génération de puissance éolienne. Des facteurs techniques et économiques fixent le type de machine pour chaque application. Pour les petites puissances (< 20 kW), la simplicité et le coût réduit des générateurs synchrones à aimants permanents (PMSG) expliquent leur prédominance. Dans les applications de plus forte puissance, jusqu'à 2MW environ le générateur asynchrone est plus courant et économique. Les générateurs habituellement rencontrés dans les éoliennes sont présentés dans les paragraphes suivants :

I.10.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone

Le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit. Son inconvénient majeur est la consommation d'un courant réactif de magnétisation au stator.

I.10.1.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil

La génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui occupe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. 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 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-collecteurs 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. La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la Fig(I.7).



Fig(I.7): Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles.

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 ci-dessus 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 (fig I.8).

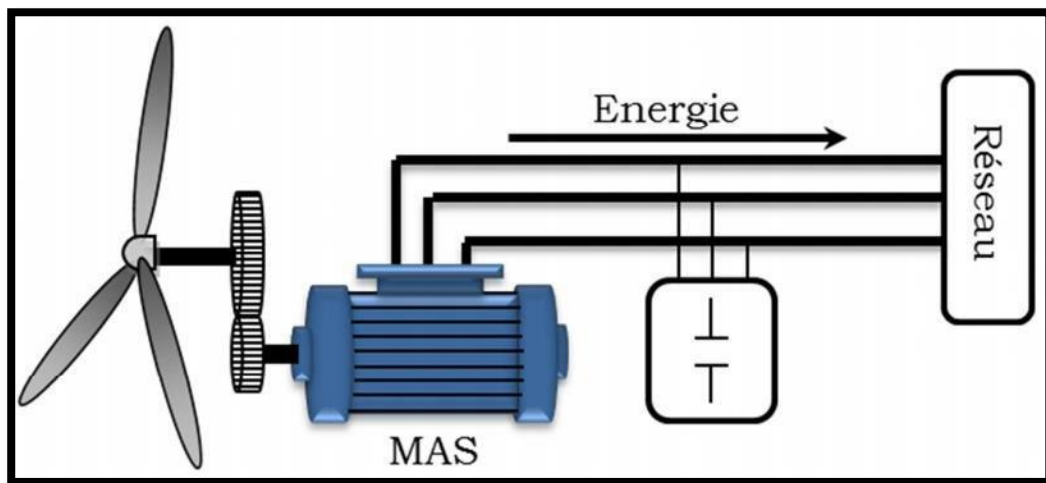


Fig I.8 : connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau

La machine à un nombre de paires 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 Fig(), qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

Par contre, cette configuration représente quelques inconvénients :

- Il n'y a pas d'accès pour récupérer l'énergie induit dans le rotor ;
- Elle ne permet pas une vitesse variable ;
- Le courant débité au réseau est perturbé à cause la variation brusque du couple ;
- Elle ne fonctionne en régime autonome qu'en présence des condensateurs ;

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 (Fig I.9).

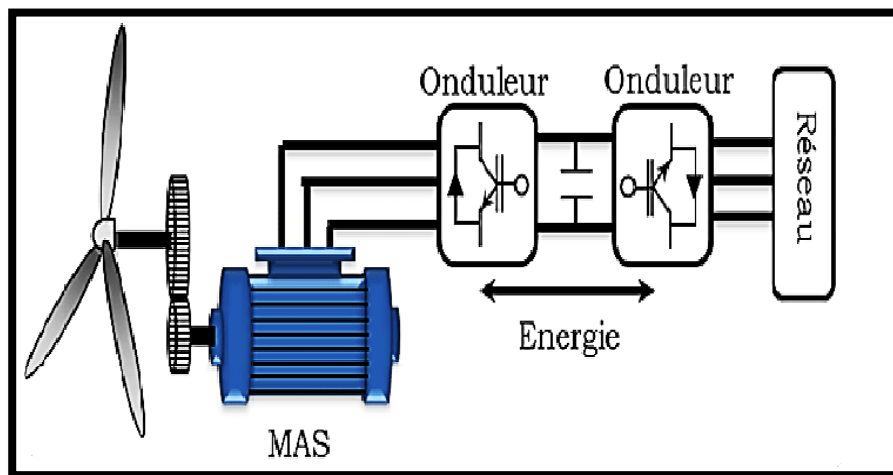


Fig I.9 : éolienne connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance

I.10.1.2 Machine Asynchrone à Double Stator

Cette configuration d'éolienne, permet un point de fonctionnement à deux vitesses. On réalise un double bobinage au stator Fig (I.10) qui induit un nombre de paires de pôles variable et donc des plages de vitesses différentes. On peut imposer 2 vitesses de synchronisme par changement du nombre de pôles. D'une part, on a un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent. En effet, la puissance est donnée par :

$$P_{mg} = C_m \cdot \Omega_s$$

P_{mg} est la puissance transmise par la génératrice, C_m le couple électromagnétique, Ω la vitesse de synchronisme, Ω_s la pulsation du réseau et P le nombre de paires de pôles. A une faible puissance correspond une faible vitesse, la vitesse étant liée au nombre de paires de pôles par :

$$\Omega_s = \frac{\omega}{P}$$

A une faible vitesse correspond un nombre de paires de pôles élevé. D'autre part, on a un stator de forte puissance correspondant à une vitesse élevée et donc à faible nombre de paires de pôles pour les vitesses de vent élevées pour la connexion au réseau ont utilisé des commutateurs.[3]

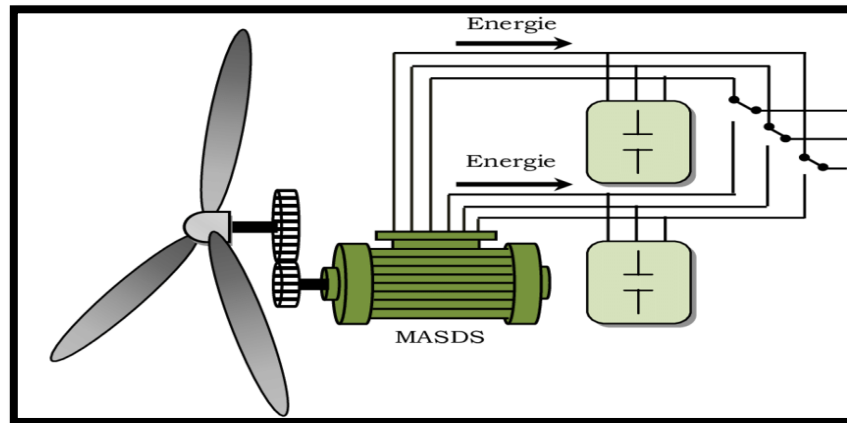


Fig I.10: Schéma de la connexion au réseau de l'éolienne avec la MAS à double stator

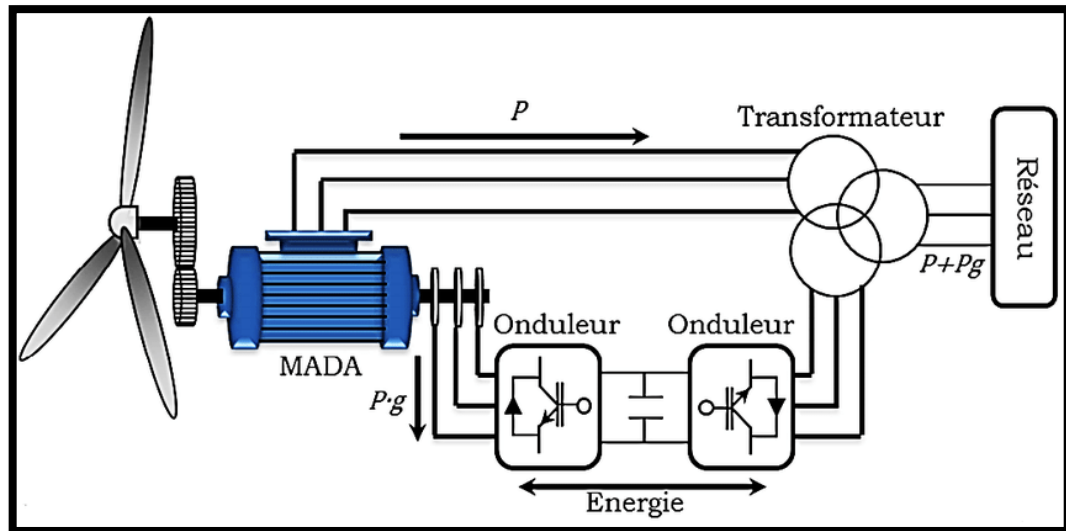
Malgré sa simplicité et ses qualités de robustesse et son coût, la machine asynchrone à cage reste uniquement pour l'utilisation dans un système éolien, lorsqu'elle est directement connectée au réseau, la vitesse de rotation doit rester pratiquement constante de façon à ce que la machine reste proche de la vitesse de synchronisme. Cette restriction entraîne une efficacité réduite de l'éolienne aux vitesses de vent élevées. Partant de ce constat, nous pouvons utiliser la machine asynchrone à double alimentation (MADA) comme alternative à la machine à cage.

I.10.1.3 Machine Asynchrone à Double Alimentation type "rotor bobiné"

Ce type d'aérogénérateur s'est développé récemment car la double alimentation de machine asynchrone permet une meilleure exploitation du potentiel de l'éolienne. Le stator est directement relié au réseau tandis que les grandeurs rotoriques sont commandées par un convertisseur statique (Fig). La maîtrise de l'état électromagnétique de la machine par le rotor permet de fonctionner à la fréquence et l'amplitude nominales du réseau même si le rotor s'éloigne de la vitesse de synchronisme. Le dimensionnement du convertisseur est proportionnel au glissement maximal du rotor, autrement dit, il dépend de l'écart maximal entre la vitesse de synchronisme et la vitesse réelle du rotor.

La diminution de puissance du convertisseur statique permet la minimisation des composants de filtrage et de conversion, l'accroissement de la fiabilité de l'électronique, la diminution du coût de l'ensemble et l'amélioration de la qualité d'onde générée (grâce à la diminution de l'amplitude des courants commutés par le convertisseur et l'augmentation de la fréquence de hachage).

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse.



Fig(I.11) : schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor

Le résumé des points forts de la MADA sont :

- Sa capacité de commander la puissance réactive et, de cette façon, de découpler la commande des puissances active et réactive.
- Il peut se magnétiser à partir du rotor sans prélever au réseau la puissance réactive nécessaire.
- Il est capable d'échanger de la puissance réactive avec le réseau pour faire la commande de tension.
- La taille du convertisseur n'est pas simplement en rapport avec la puissance totale du générateur, mais aussi avec la gamme de vitesse choisie. En fait, le coût du convertisseur augmente avec la gamme de vitesse autour de la vitesse de synchronisme. Son inconvénient réside dans la présence obligatoire de bagues et balais. 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) MADA – structure de Kramer

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la Figure, le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur et un onduleur est placé en sortie du redresseur. L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine.

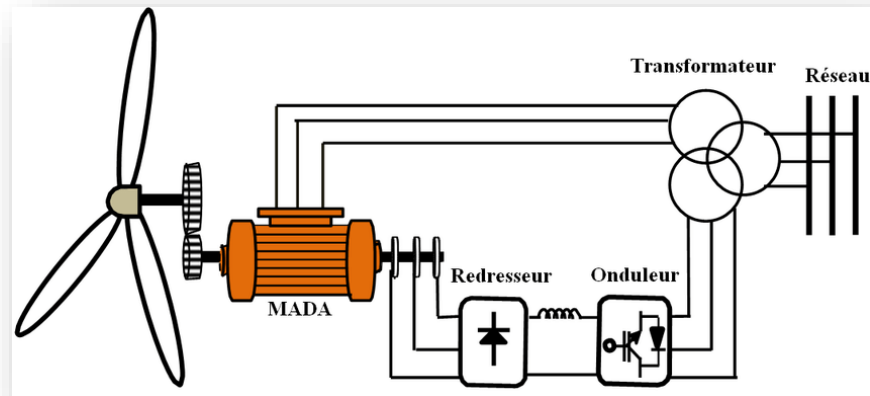
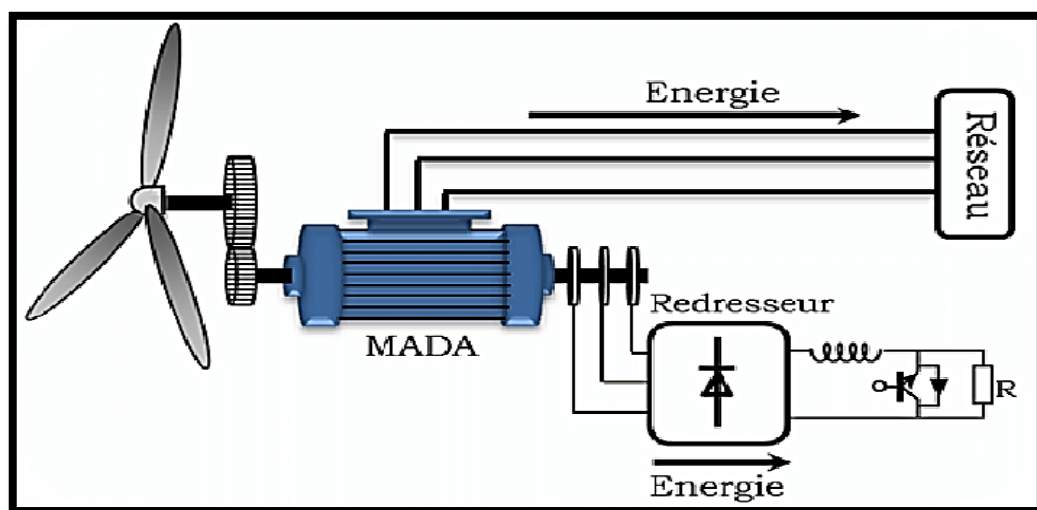


Fig (a) : MADA - structure Kramer

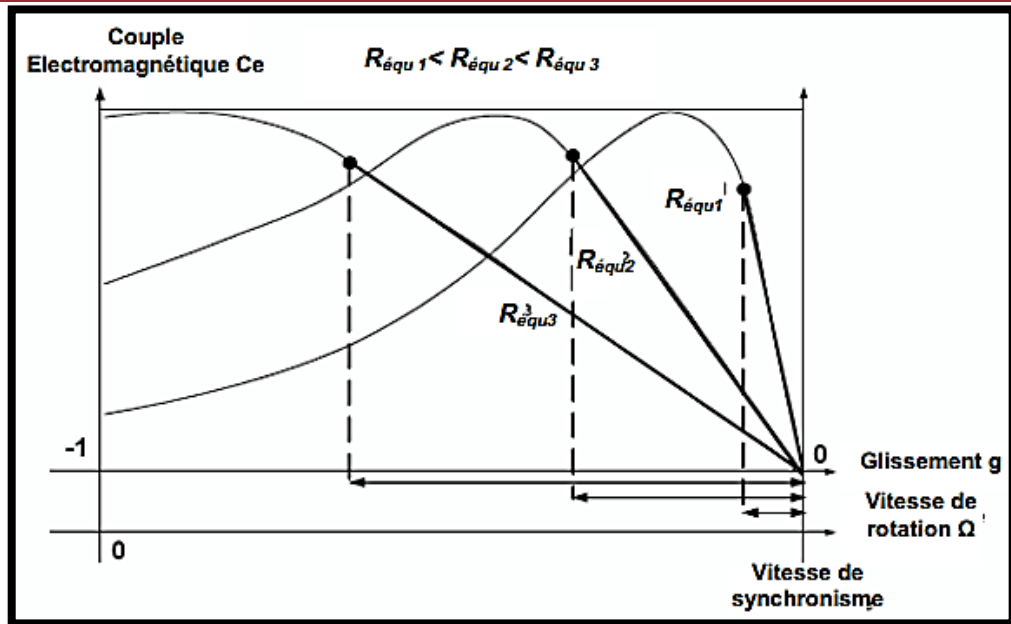
b) MADA à énergie rotorique dissipée

La Figure représente cette configuration avec le stator connecté directement au réseau et le rotor connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO. Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage torique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone.



Fig(b): MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R , ce qui nuit au rendement du système. De plus cela augmente la puissance transitant dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance. Le fabricant "VESTAS" dans son dispositif "OPTI-SLIP" a mis en oeuvre ce système en utilisant des composants qui tournent avec le rotor et une transmission optique des signaux de commande. Les contacts glissants sont ainsi évités. La variation maximale du glissement obtenue dans ce procédé est de 10%.



Fig(b.1) : Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique

c) MADA – structure de « Scherbius » avec cyclocon

Quand on remplace l'association redresseur - onduleur par un cycloconvertisseur (Fig. 1.17) pour autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'ensemble est alors appelé « structure de Scherbius ». La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la Figure(c).

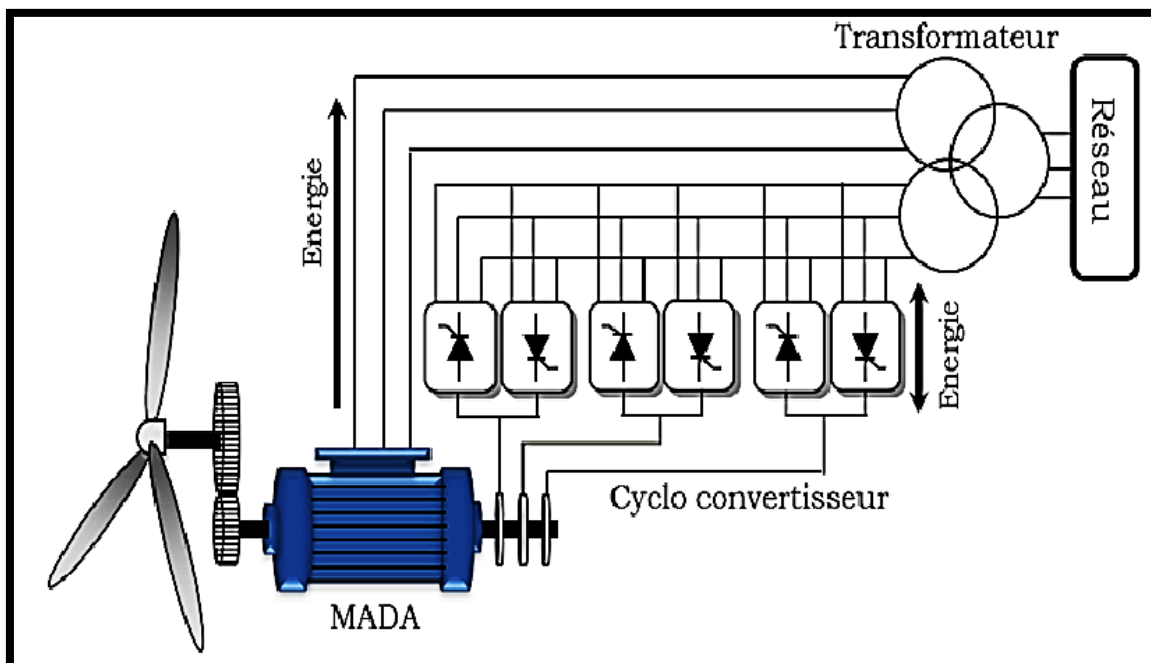
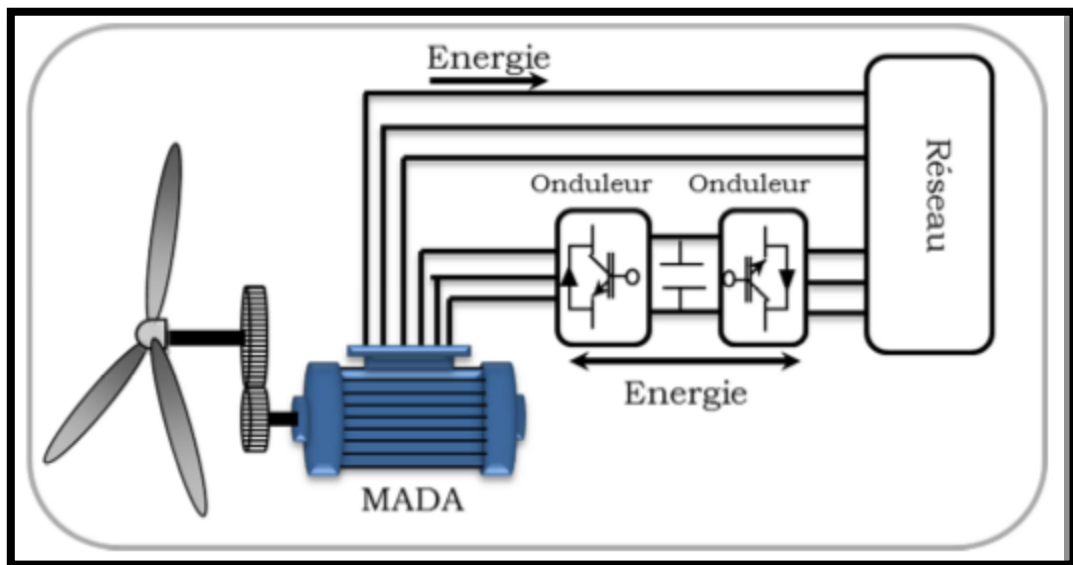


Fig (c) : Structure de Scherbius avec cyclo convertisseur

d) Machine Asynchrone à Double Alimentation Type "Brushless"

Cette machine est constituée de deux bobinages triphasés au stator. Un des bobinages est directement connecté au réseau et est destiné au transfert de puissance. Le second bobinage, dont la section des conducteurs est moins élevée, permet de faire varier les courants d'excitation de la machine. Le stator de forte puissance est connecté directement sur le réseau et le convertisseur est placé entre le stator de faible puissance et le réseau fig (d).



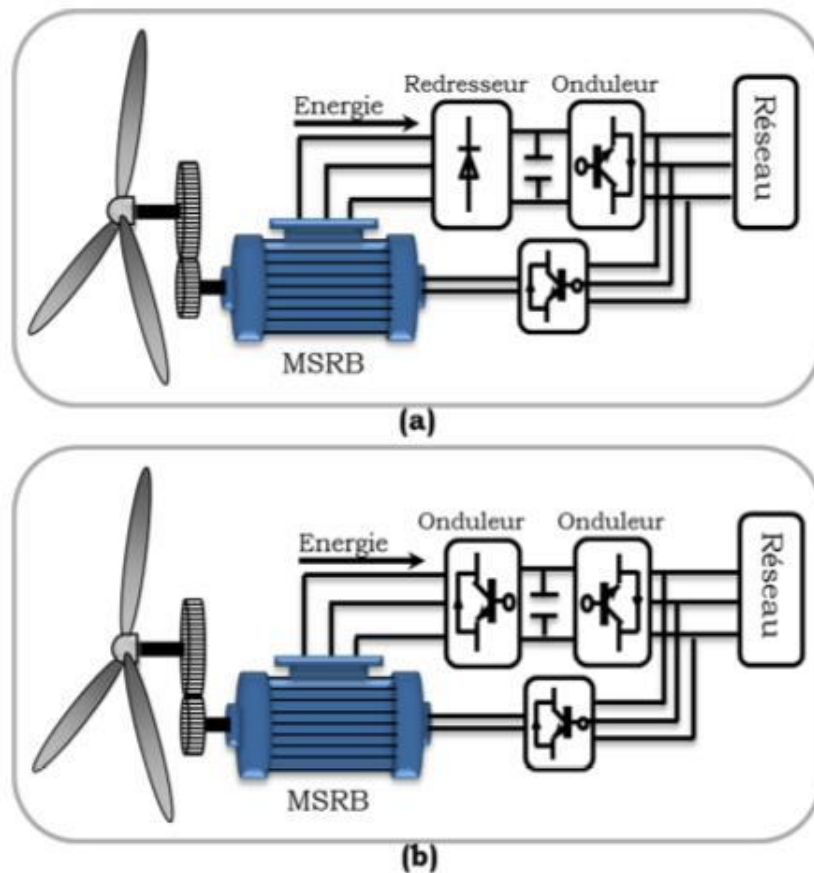
Fig(d) : Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau

I.10.2 Systèmes utilisant la machine synchrone

L'avantage du générateur synchrone sur le générateur asynchrone est l'absence de courant réactif de magnétisation. Le champ magnétique du générateur synchrone peut être obtenu par des aimants ou par un bobinage d'excitation conventionnel. Si le générateur possède un nombre suffisant de pôles, il peut être utilisé pour les applications d'entraînement direct qui ne nécessitent pas de boîte de vitesses. Le générateur synchrone est toutefois mieux adapté à la connexion indirecte au réseau de puissance à travers un convertisseur statique, lequel permet un fonctionnement à vitesse variable. Pour des unités de petites tailles, le générateur à aimants permanents est plus simple et moins coûteux. Au-delà de 20 kW (environ), le générateur synchrone est plus coûteux et complexe qu'un générateur asynchrone de taille équivalente.

I.10.2.1 Générateur Synchrone à Rotor Bobiné

Ce type de machine est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité. Le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Ainsi, si la génératrice est directement connectée au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement proportionnelle à la fréquence du réseau. Ces machines présentent aussi le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur la turbine. Par contre, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées avec un entraînement direct sur les turbines éoliennes. Ceci pose le problème d'adaptation de ce type de machines avec le système éolien pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion génératrice - réseau, les fluctuations du couple capté par l'aérogénérateur se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau, et nécessitent une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau (Figure 12) ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation. Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier du système de contacts glissants au rotor. Le circuit d'excitation est assuré par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau.



Fig(12) : système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné. (a) avec redresseur à diodes, (b) avec convertisseur commande

I.10.2.2 Générateur Synchrone à Aimants Permanents (GSAP)

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction des machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) ou génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur. Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation. Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bague et balais (Figure 1.10.2.2). Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles (offshore par exemple). La présence obligatoire de l'électronique de puissance permet enfin une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une optimisation énergétique efficace.[4]

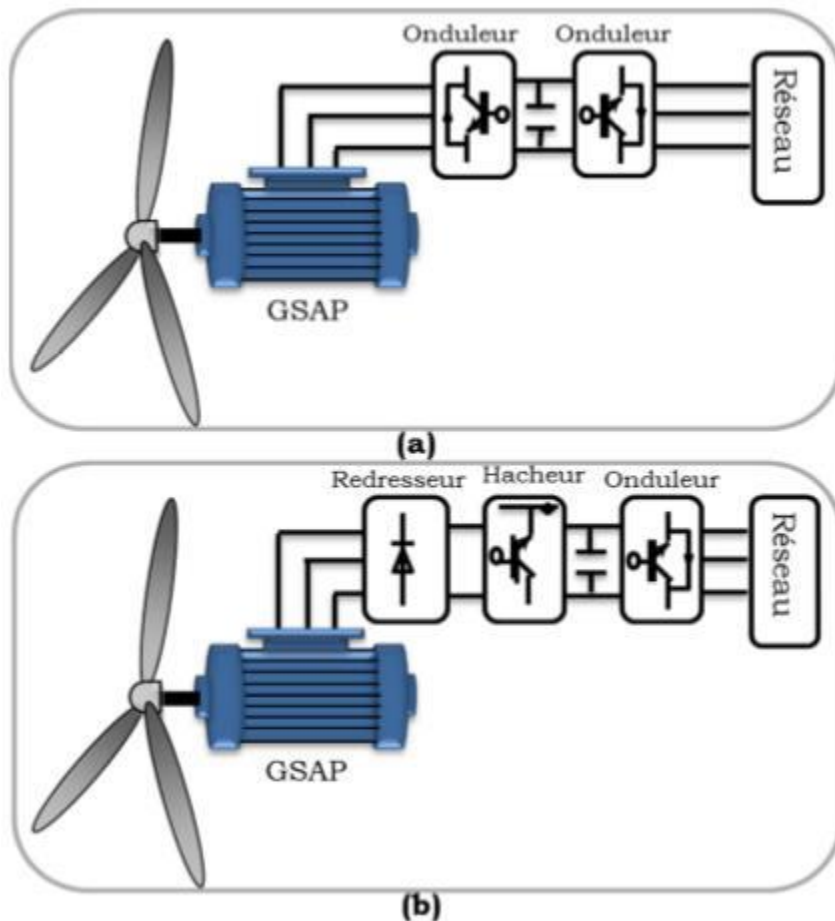


Fig.(13) : systèmes éoliens basés sur la Machine Synchrone à Aimants Permanents (a) GSAP avec convertisseurs MLI (b) GSAP avec redresseur, hacheur et convertisseur

L'inconvénient majeur de l'utilisation de la GSAP est le coût des aimants utilisés. Toutefois certains d'entre eux sont réalisés à l'aide de terres rares et sont par conséquent très coûteux, bien que leur utilisation de plus en plus fréquente tende à faire baisser leur prix. De plus, les variations importantes de couples électromagnétiques qui peuvent avoir lieu dans un système éolien risquent d'entraîner une démagnétisation des aimants lorsqu'ils sont constitués de matériaux classiques. Ceci contribue largement à la diminution de leur durée de vie. Dans la configuration de la GSAP de la Fig. 1.20-b, la génératrice est connectée à un redresseur triphasé suivi d'un hacheur, qui a pour rôle de contrôler le couple électromagnétique. La liaison au réseau est assurée par un onduleur MLI qui assure la régulation de la tension du bus continu aussi bien qu'il contrôle le facteur de puissance. L'inconvénient de cette configuration est l'utilisation du redresseur, ce qui augmente l'amplitude du courant et la déformation de la tension. En conséquence, cette configuration a été considérée pour les petites puissances (inférieures à 50KW). Dans la configuration de la Fig. 1.20-a, un redresseur MLI est placé entre la génératrice et le bus continu, et la liaison au réseau est assurée par un onduleur MLI. L'avantage de cette configuration par rapport à la configuration précédente est l'utilisation de la commande vectorielle ce qui permet à la

génératrice de fonctionner au voisinage du point optimal. Cependant, ces performances dépendent de la bonne connaissance des paramètres de la génératrice qui dépendent de la température et la fréquence. En choisissant judicieusement les paramètres du système représenté sur la Fig. 1.21, un système à vitesse « Non constante », à coût minimum et énergétiquement assez performant peut être obtenu.

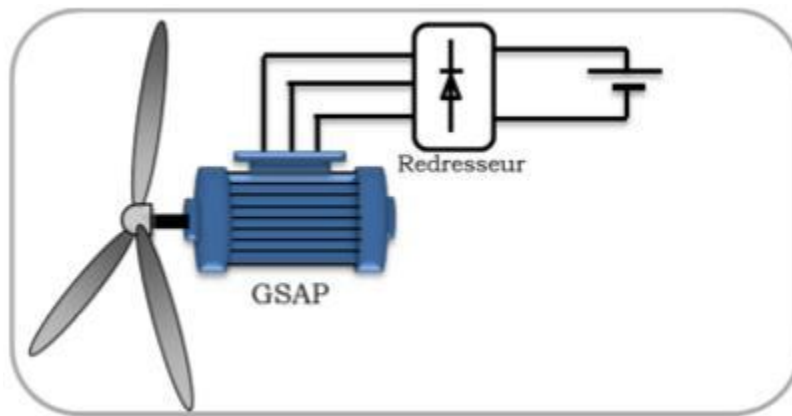


Fig.14 : Système éolien à coût minimum basé sur GSAP

I.10 Conclusion .

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

Introduction

Les alternateurs triphasés sont la source primaire de toute l'énergie électrique. Entraînées par des turbines hydrauliques, à vapeur ou éoliennes, ces machines constituent les plus gros convertisseurs d'énergie au monde. Elles transforment l'énergie mécanique en énergie électrique avec des puissances allant jusqu'à 1500 MW.

Dans notre étude nous allons nous intéresser à une éolienne à vitesse variable utilisant une génératrice synchrone à aimants permanents. Ce choix n'est pas fortuit puisqu'il est basé sur les avantages technologiques et économiques qu'offre la MSAP comparée aux autres machines. L'utilisation des aimants permanents a été une vraie révolution dans le domaine de l'utilisation de ces machines, car elle a permis d'éliminer le bobinage rotorique et son excitation ainsi que les balais et les contacts glissants. Ce qui induit moins de maintenance et plus de robustesse pour la machine. Cet avantage a couvert le coût élevé des aimants. Le progrès technologique dans le domaine de l'électronique de puissance a également conduit vers un progrès important dans les performances globales des entraînements à vitesse variable, ce qui facilite l'autopilotage de la machine synchrone la rendant ainsi très performante comparée la machine asynchrone et celle à courant continu. Mais l'avantage le plus important de ces machines dans le domaine éolien est l'absence de multiplicateur de vitesse pour des machines de grand nombre de paires de pôles, réduisant ainsi le volume de l'éolienne et la maintenance du système.

II.1. Description

L'alternateur est formé d'un stator fixe, et d'un rotor tournant. Le stator ou induit se compose d'un noyau feuilleté ayant la forme d'un cylindre vide et comportant des encoches dans lesquelles sont logés les conducteurs d'un enroulement triphasé à $2p$ pôles. Les bobines constituant cet enroulement sont décalées de $2\pi/2$ et toujours raccordées en étoile et le neutre est accessible pour permettre sa mise à la terre. Le rotor ou inducteur comporte p pôles nord et p pôles sud intercalés. Ces pôles sont créés par des bobines alimentées en courant continu ou par des aimants permanents. Le rotor est soit à pôles saillants ou à pôles lisses.

Le nombre de pôles d'un alternateur est imposé par la vitesse du rotor et par la fréquence du courant à produire. Ainsi, considérons un conducteur de l'induit devant lequel se déplacent les pôles nord et les pôles sud du rotor. Si la tension induite dans ce conducteur rend une série de valeurs positives pendant le passage d'un pôle nord, elle prendra une série de valeurs égales, mais négatives, pendant le passage d'un pôle sud. Chaque fois qu'une paire de pôles se déplace devant un conducteur, la tension induite décrit donc un cycle complet. On en déduit que la fréquence est donnée par l'équation : $f = \frac{pn}{120}$ [5]

Il existe quatre catégories de machines synchrones à aimants permanents du point de vue Construction mécanique :

- Les Machines synchrones à aimants permanents montés en surface
- Les machines synchrones à aimants permanents insérés
- Les machines synchrones à aimants permanents chapeautés
- Les machines synchrones à aimants permanents enterrés

II.2. Principe de fonctionnement d'une génératrice synchrone

L'inducteur de la génératrice synchrone, entraîné mécaniquement, crée un champ à répartition spatiale variable dans les bobinages statoriques. Les f.e.m induites dans ces bobinages provoquent la circulation de courants induits qui créent à leur tour un champ statorique dans l'entrefer, qui tourne à la même vitesse que celle du champ inducteur.

II.3. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

La modélisation des machines est essentielle aussi bien, pour le concepteur que pour l'automaticien. Elle est généralement utilisée pour l'analyse du comportement du système. Les machines à courant alternatifs sont en générale, modélisées par des équations non linéaires (équation différentielles). Cette non linéarité est due aux inductances et coefficients des équations dynamiques qui dépendent de la position rotorique et du temps. Une transformation triphasée – biphasé nécessaire pour simplifier le modèle (réduire le nombre des équations).

II.3.1 Les hypothèses simplificatrices

. Pour une représentation plus simple nécessite l'introduction des hypothèses simplificatrices suivantes :

- Caractéristique magnétique de la machine linéaire.
- Symétrie de la machine.
- Alimentation par un système de tensions triphasées, symétriques et sinusoïdales.
- Répartition sinusoïdale dans l'entre fer.
- L'influence des pièces polaires

II.3.2 Modèle en ABC

Les équations électriques

Equations des tensions des enroulements statoriques et rotoriques :

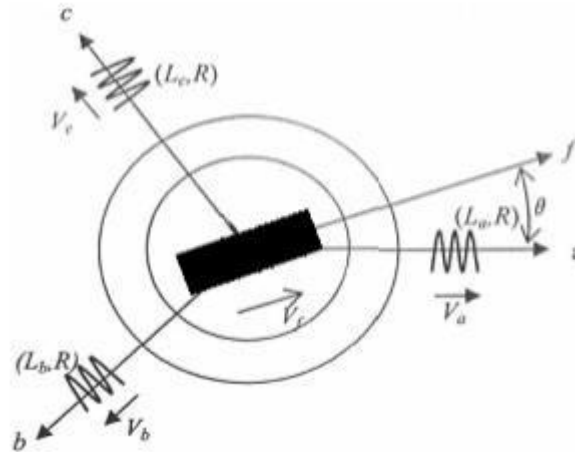


Fig.1: Modèle de la machine synchrone à aimant permanent en abc

$$\begin{cases} v_a = R.i_a + \frac{d}{dt} \Psi_a \\ v_b = R.i_b + \frac{d}{dt} \Psi_b \\ v_c = R.i_c + \frac{d}{dt} \Psi_c \end{cases} \quad (II.1)$$

On désigne par ψ_a, ψ_b, ψ_c les flux totaux qui traversent les enroulements (a, b, c), et par i_a, i_b, i_c les courants qui circulent dans ces enroulements.

II.3.3 Modele Biphase (Transformation De Park)

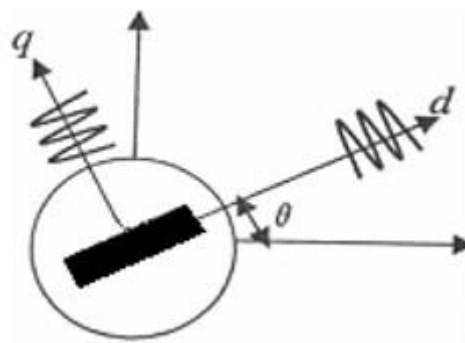


Fig.2 : Modèle de la machine en biphase

A l'aide de transformation de PARK on passe de grandeurs réelle (V_a, V_b, V_c) et (i_a, i_b, i_c) à leurs composantes (V_0, V_d, V_q) et (i_0, i_d, i_q).

La matrice de PARK s'exprime par :

$$[P_3(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \theta & -\sin \theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - 4\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (II.2)$$

Si le neutre de la machine synchrone est isolé (non relié à la terre) alors :

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (II.3)$$

Dans ce cas la composante homopolaire est nulle. La matrice de transition de PARK devient alors :

$$[P_2(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (II.4)$$

Et sa matrice inverse sera exprimée par :

$$[P_2(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (II.5)$$

Equations électriques :

La figure II-6 représente les trois enroulements statoriques fixes, et le rotor à aimants permanents.

On a :

$$[V_{dq}] = [P_2(\theta)] \cdot [V_s] \quad (II.6)$$

$$[i_{dq}] = [P_2(\theta)]^{-1} \cdot [i_s] \quad (II.7)$$

Tel que :

$$[V_{dq}] = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}, \quad [i_{dq}] = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [V_s] = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, \quad [i_s] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (II.8)$$

Après simplification on aura :

$$V_d = R_s \cdot i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \psi_q \cdot \omega_r \quad (II.9)$$

$$V_q = R_s \cdot i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \psi_d \cdot \omega_r \quad (II.10)$$

Avec

$$\psi_d = L_d \cdot i_d + \psi_f \quad (II.11)$$

$$\psi_q = L_q \cdot i_q \quad (II.12)$$

ψ_f : Flux des aimants permanents.

Les relations (II-9) et (II-10) deviennent alors :

$$V_d = R_s \cdot i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - L_q \cdot i_q \cdot \omega_r \quad (II.13)$$

$$V_q = R_s \cdot i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + (L_d \cdot i_d + \Phi_f) \cdot \omega_r \quad (II.14)$$

II.3.4 Expression Du Couple Electromagnetique

L'expression générale du couple électromagnétique est :

$$C_{em} = \frac{1}{2} \cdot [i_s] \cdot \left\{ \frac{d}{d\theta_m} [L] \right\} \cdot [i_s] \quad (II.15)$$

Avec $\theta_e = p \cdot \theta_m$

θ_e : L'angle électrique

θ_m : L'angle mécanique

P : nombre de pair de pôles

Après développement et simplification on trouve :

$$C_{em} = p \cdot (\Phi_d i_q - \Phi_q i_d) \quad (II.16)$$

En remplaçant ϕ_d et ϕ_q par leurs valeurs on trouve :

$$C_{em} = p \cdot ((L_d - L_q) \cdot i_d + \Phi_f) \cdot i_q \quad (II.17)$$

II.3.5 L'EQUATION MECANIQUE

L'équation mécanique s'écrit :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = C_{em} - C_r \quad (II.18)$$

$$\Omega = \frac{\omega r}{p} \quad (II.19)$$

ωr : Vitesse angulaire (pulsation électrique)

Ω : Vitesse mécanique.

C_r : Couple de charge.

J : Moment d'inertie de la partie tournante.

f : Coefficient de frottement visqueux

II.4. Commande vectorielle de la MSAP

Parmi les stratégies de commande vectorielle appliquées à la machine synchrone, celle qui consiste à imposer une référence du courant direct à zéro est la plus répandue. Cela permet de simplifier l'expression du couple électromagnétique de l'équation C_{em} en une expression linéaire donnée par :

$$C_{em} = k_t \cdot i_q \quad (II.20)$$

Ce dernier est alors réglé en agissant sur le courant en quadrature. Pour pouvoir appliquer la commande vectorielle nous devons :

- ✓ poser une référence $i_{qref} = 0$
- ✓ poser $C_{emref} = C_{te} \cdot \Omega^2$
- ✓ poser une référence $i_{qref} = \frac{C_{emref}}{k_t}$

II.4.1 Commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation .

Afin de justifier le recourt à la commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation, examinons d'abord le modèle de la machine synchrone dans le plan de Park qui est donné par les équations (II.21-II.22)

$$v_d = R_s \cdot i_d + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} - \omega_r \cdot \phi_q \quad (\text{II.21})$$

$e_q = \omega_r \cdot \phi_q$: f.e.m de la machine sur l'axe q

$$v_q = R_s \cdot i_q + L_q \cdot \frac{di_q}{dt} + \omega_r \cdot \phi_d \quad (\text{II.22})$$

$e_d = \omega_r \cdot \phi_d$: f.e.m de la machine sur l'axe d

La commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation permet de découpler les courants i_d et i_q et de permettre de faire la régulation adéquate à chacun des deux séparément. Cette commande nous mène à un modèle de la machine synchrone similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée.

Les termes de couplage en $E_{d,q} = +\omega_r \cdot \phi_{d,q}$ sont considérés comme des perturbations mesurables. Ainsi la machine peut être représentée par la fonction de transfert suivante :

$$G_s(p) = \frac{1}{R_s + L_s p} = \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + T_e p} \quad (\text{II.23})$$

Avec

$$T_e = \frac{L_s}{R_s} \text{ : La constante de temps électrique}$$

Si on tient compte de la perturbation, $G_s(p)$ sera sous la forme donnée en (II.24, en vertu du théorème de superposition

$$G_s(p) = \frac{i_{d,q}(p)}{V_{d,q}(p) + E_{d,q}(p)} \quad (\text{II.24})$$

Afin d'imposer la référence du courant sur l'axe d égale à zéro on utilise un régulateur PI. La boucle de régulation du courant i_d est donnée par le schéma bloc suivant :

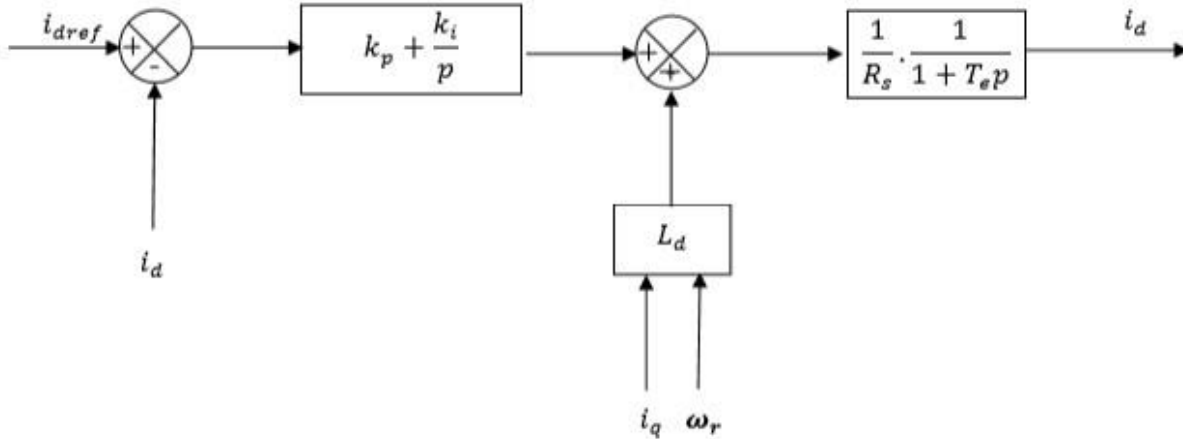


Figure 3 : Boucle de régulation du courant i_d

II.4.2 Calcul du régulateur PI

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée comme suit :

$$G_0(p) = \frac{k_{pd}p + k_{id}}{p} \cdot \frac{1}{R_s p + L_d} = \frac{k_{pd}p + k_{id}}{p} \cdot \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + T_e p} \quad (\text{II.25})$$

Enfin

$$G_0(p) = \frac{k_{pd}p + k_{id}}{p} \cdot \frac{G_0}{1 + T_e p} \quad (\text{II.26})$$

$$T_e = \frac{k_p}{k_i} : \text{La constante de temps électrique}$$

G_0 : Le gain statique

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par $G(p) = \frac{G_0}{1 + G_0(p)}$

Les paramètres du régulateur sont calculés par la méthode de placement de pôle. La fonction de transfert en boucle ouverte est :

$$G_{bo}(p) = \frac{k_p p + k_i}{p} \cdot \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + T_e p} \quad (\text{II.27})$$

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$G_{bf}(p) = \frac{G_{bo}}{1 + G_{bo}p} = \frac{k_p p + k_i}{R p^2 + (L_q + k_p)p + k_i} \quad (\text{II.28})$$

$$k_p = \frac{2\xi_n k_i}{\omega_n} - J \quad (\text{II.29})$$

$$k_i = \omega_n^2 J \quad (II.30)$$

La boucle de régulation du courant i_q est donnée par le schéma bloc suivant :

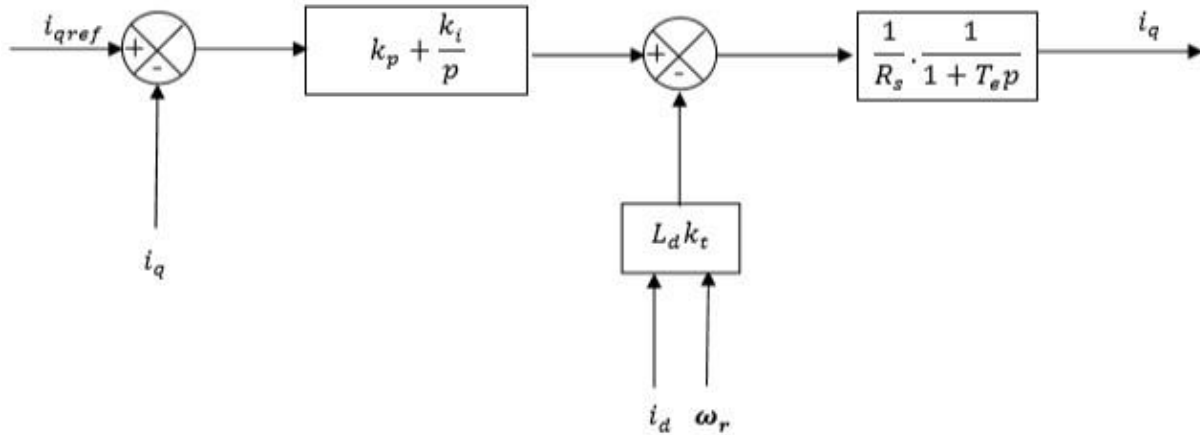


Figure 4 : Boucle de régulation du courant i_q

$$i_{qref} = \frac{Cem_{ref}}{k_t} = Cte \cdot \frac{\Omega_t^2}{k_t} \quad (II.31)$$

$$Cem_{ref} = \frac{P_{éolmax}}{\Omega_t} \quad (II.32)$$

$$P_{éol} = \frac{1}{2} \cdot C_{pmax}(\lambda) \cdot \rho \cdot S \cdot v_v^2$$

$$S = \pi R^2 \quad (II.33)$$

Si on remplace la puissance éolienne $P_{éol}$ et la surface active S , par leurs formules respectives, données en (II.33), on obtient :

$$Cte = \frac{\rho \cdot \pi \cdot R_t^5 \cdot C_{pmax}}{2 \cdot \lambda_{opt}^3} \quad (II.34)$$

II.5 Conclusion

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

Introduction :

Une 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.

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 pour parvenir à cet objectif. Idéalement, une éolienne doit comporter.

Un système qui permet de la contrôler mécaniquement au niveau de la turbine, essentiellement pour limiter la puissance pour les vents forts (L'orientation des pales de l'éolienne, l'orientation de la nacelle).

Un système qui permet de la contrôler électriquement au niveau du générateur associé à l'électronique de commande (Machine électrique associée à l'électronique de commande).

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation et au contrôle de la turbine éolienne. Dans un premier temps, une étude aérodynamique de la turbine est présentée, en vue de connaître ses principaux paramètres de fonctionnement, à savoir les coefficients de puissance (C_p) et de couple, et la limite de BETZ.

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. Un modèle analytique de la turbine éolienne sera réalisé.[6]

III.1 Modèle du vent

Le vent est la raison d'être des aérogénérateurs. L'énergie cinétique contenue dans le vent est transformée en partie en énergie mécanique par la turbine, puis en énergie électrique par le générateur. C'est donc une variable importante à modéliser car la précision des simulations dépendra de la qualité de son modèle.

Le choix géographique d'un site éolien est primordial dans un projet de production d'énergie. Les caractéristiques du vent vont déterminer la quantité de l'énergie qui pourra être effectivement extraite du gisement éolien. De nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés. L'un des principes retenus consiste à générer l'allure temporelle du vent à partir d'un bruit blanc sur lequel on applique une fonction de transfert à déterminer.

Les paramètres de cette fonction de transfert dépendent de grandeurs caractéristiques du site et de la nature du vent.

Donc la vitesse du vent va être décomposée en deux composantes :

$$v(t) = v_0 + vT(t)$$

- Une composante turbulente du vent $v_T(t)$ est un processus aléatoire stationnaire (ne varie pas avec la vitesse moyenne du vent)
- Une composante lente V_{moy} ; c'est la moyenne de la vitesse du vent variant régulièrement sur de plus longues périodes dans un site donné.

Alors la vitesse du vent sera modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques sous la forme :

$$V(t) = 7,5 + 0,7 [3\sin 0,09t + 0,7\sin 0,42t + 18\sin 0,01t + \sin 0,038t]$$

La Figure (Fig.1) Représente le vent simulé avec une vitesse moyenne de 7,5 m/s.

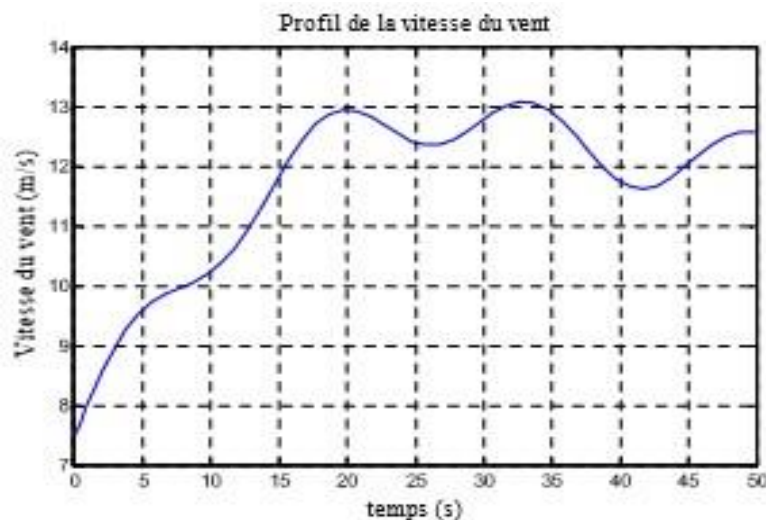


Fig. 1 Simulation du profil de la vitesse du vent

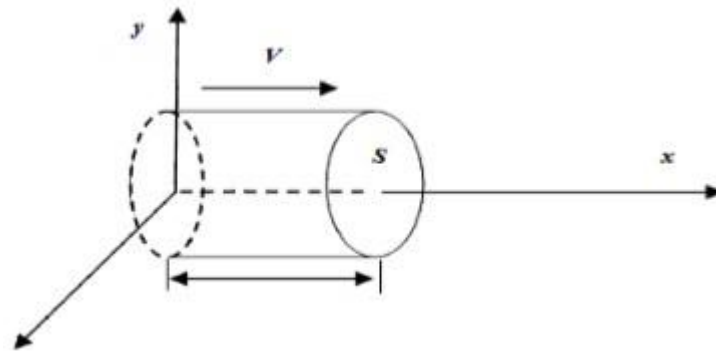
III.2 Conversion de l'énergie éolienne

III.2.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site.

L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur dx , de section S et de masse volumique ρ , animée d'une vitesse v , (Fig.2) s'écrit :

$$dE_c = \frac{1}{2} \rho S dx v^2 \quad (\text{III.1})$$

Fig 2 Colonne d'air animée d'une vitesse v

La puissance P_m extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps.

En supposant $dx = v dt$ on déduit l'expression de P_m :

$$P_m = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho S_0 V^3 \quad (\text{III.2})$$

ρ : masse volumique de l'air, 1,3 kg/m³.

V : vitesse instantanée du vent (en m/s).

E_c : énergie cinétique (en joules)

III.2.2 Loi de BETZ

La loi de BETZ stipule qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de 16/27 (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Ce fut l'Allemand Albert Betz qui, en 1929, formula la loi de BETZ pour la première fois.[7]

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (Fig.3) sur lequel on a représenté la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur V_1 et V_2 en aval.

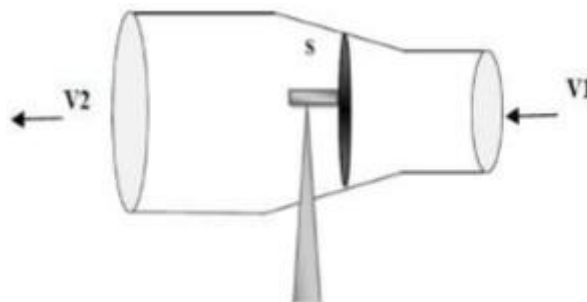


Fig.4 Tube de courant autour d'une éolienne.

D'après la théorie de Betz, la puissance récupérable sur l'éolienne est due à la variation de l'énergie cinétique du vent :

$$P_m = \Delta E_c = \frac{1}{2} m (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{III.3})$$

La masse d'air en mouvement de densité ρ traversant une surface S des pales en une seconde par une moyenne de vitesse.

$$m = \rho S V = \rho S \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{III.4})$$

L'effort qui s'exerce sur l'éolienne est donné par le théorème de la variation de la quantité de mouvement :

$$\vec{F} = \rho S V (\vec{V}_1 - \vec{V}_2) \quad (\text{III.5})$$

Cet effort crée une puissance :

$$P_m = \vec{F} \vec{V} = \rho S V^2 (V_1 - V_2) \quad (\text{III.6})$$

Qui est évidemment la même que celle donnée par (III.3). Ainsi, la combinaison de (III.3) et (II.6) donne :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{III.7})$$

Avec :

V_1 : vitesse du vent dans le plan du rotor en m/s ;

V_2 : vitesse du vent à l'aval du rotor en m/s ;

S : surface balayée par l'hélice en m^2 ; On pose que $K = \frac{V_1}{V_2}$ on peut écrire :

$$P_m = \frac{1}{4} \rho S V_1^3 (1 + K)^2 (1 - K) \quad (\text{III.8})$$

Cette puissance admet une valeur maximale pour la valeur de K qui annule sa dérivée

$$\frac{dP_m}{dK} = 0 \implies 2(1 + K)(1 - K)^2 = 0,$$

Soit pour $K=1$ ou $K= 1/3$ or pour ($K= 1$ aucun sens physique)

Donc pour $K=1/3$, alors

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \times \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_1^3 \approx 0.6 \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad (\text{III.9})$$

On a démontré que l'énergie récupérable dépend du rapport V_2/V_1 et passe par un maximum lorsqu'il est égal à $1/3$. Dans ces conditions, l'énergie récupérable est égale aux $16/27$ de l'énergie cinétique totale. Il n'est donc possible de récupérer, au mieux, que moins de 60% de cette énergie.

Alors pour un vent théoriquement non perturbé traversant cette une S sans diminution de vitesse soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \rho S \frac{V_1^3}{2} \quad (\text{III.10})$$

II.2.3 Coefficient de puissance

On définit le coefficient de puissance, le rapport entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible :

$$C_p = \frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_2}{V_1}\right)\right)\left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right)}{2} \quad (\text{III.11})$$

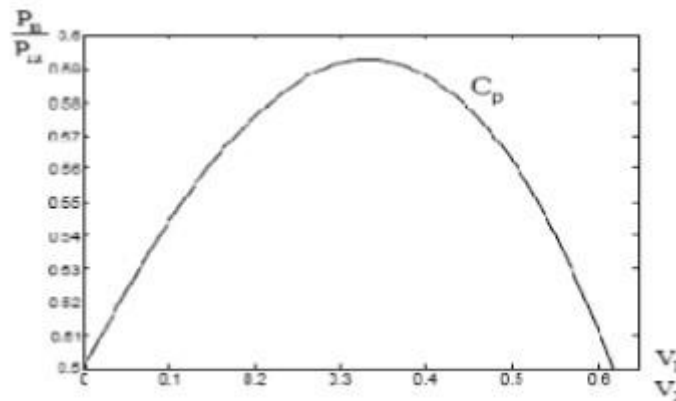


Fig.5 Coefficient de puissance

Le coefficient C_p est variable, il est fonction de la vitesse du vent, de la vitesse de rotation de la turbine Ωt et des paramètres des pales de la turbine comme l'angle d'incidence et l'angle de calage, . Il est souvent représenté en fonction de la vitesse spécifique λ . La valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance, appelée limite de BETZ, est de B C soit 0.593. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte. Pour les meilleures machines à axe horizontale, bipale au tripale, celle-ci située à 60-65% de la limite de BETZ en ne récupère globalement que 40% de l'énergie due au vent. On déduit alors le rendement aérodynamique :

$$\eta = \frac{16}{27} C_{pmax} \quad (\text{III.12})$$

C_{pmax} étant la valeur maximale que peut prendre le coefficient de puissance C_p . Cette valeur est associée à une vitesse spécifique nominale λ_{opt} pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant une vitesse de vent nominale V_n et une vitesse de rotation nominale Ω_{tn} .

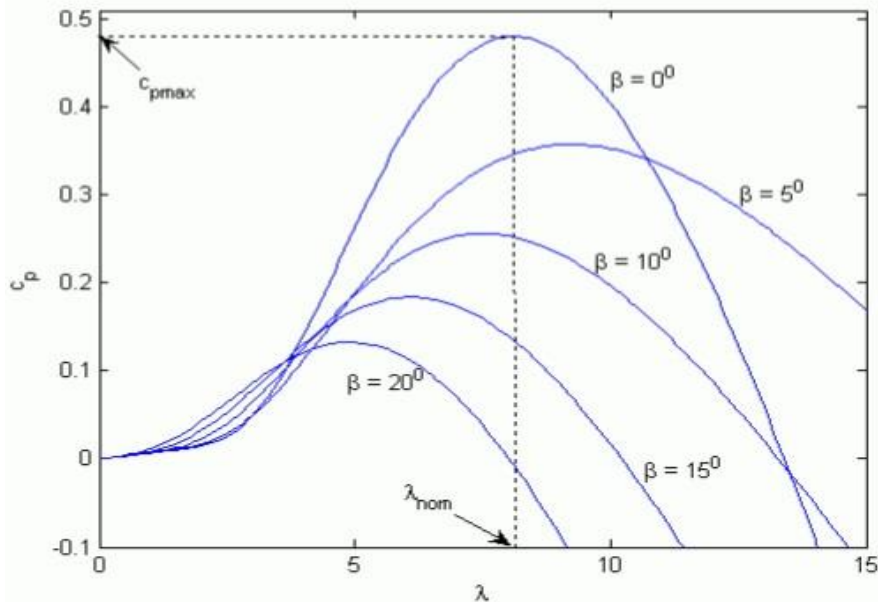


Fig 6: Exemple de variation du coefficient de puissance en fonction de l'angle d'orientation des pales et de la ration de vitesse

II.2.4 La vitesse spécifique ou normalisée [Tip-Speed-Ratio]

On définit la vitesse spécifique ou normalisée λ comme étant le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine $\Omega_t R_t$ et R_t sur la vitesse instantanée de vent V (Fig.6) et donnée par l'expression suivante :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V} \quad (\text{III.13})$$

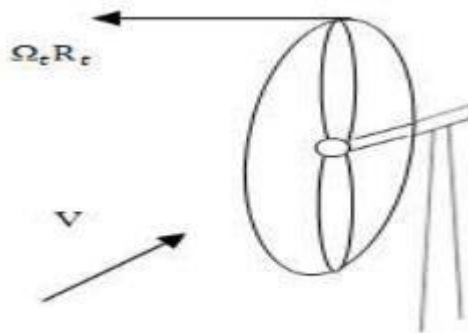


Fig. 7 Vitesse de vent V et vitesse tangentielle de l'aube $\Omega_t R_t$

R : Rayon de la surface balayée en m .

V : vitesse de vent en m/s .

Ω_t : vitesse de rotation avant multiplication en rad/s .

II.2.5 Coefficient de couple

Le coefficient de couple C_m est assez proche du coefficient de puissance C_p . Il est fort utile afin d'estimer la valeur des couples pour différents points de fonctionnement, notamment à vitesse de rotation Ω nulle, ce qui correspond à une valeur de C_p nulle pour une valeur de C_m non nulle. [8]

En combinant les équations (III.10), (III.11) et (III.13), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur peut s'exprimer par :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (\text{III.14})$$

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V} \quad (\text{III.15})$$

D'où l'expression du couple est la suivante :

$$T_i = \frac{P_m}{\Omega_t} = \frac{R_t P_m}{\lambda V} = \frac{C_p}{\lambda} \frac{1}{2} \rho \pi R_t^3 V^2 \quad (\text{III.16})$$

T_i : Couple de la turbine éolienne.

La valeur du coefficient de couple est déterminée par la formule suivante :

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{T_i}{\frac{1}{2} \rho S_t R_t V^2} \quad (\text{III.17})$$

II.2.6 Production d'énergie mécanique

En tenant compte du rapport du multiplicateur G , à partir des équations (III.14) et (III.15), l'expression de la puissance mécanique disponible sur l'arbre du générateur peut s'exprimer par :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_t R}{G V_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (\text{III.18})$$

Cette expression permet d'établir un réseau de courbes donnant cette puissance en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses de vent (Fig.III.8).

Au regard de la courbe en pointilles, qui joint les points de puissance maximales, il apparaît que pour pouvoir optimiser le transfert de puissance pour chaque vitesse de vent, la machine devra fonctionner à vitesses variables :

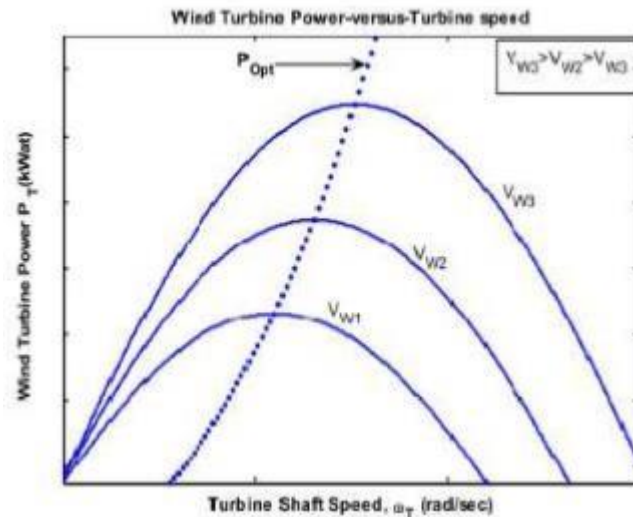


Fig.8 Puissance théorique disponible en fonction de la vitesse de vent

Le fonctionnement à vitesse de rotation variable permet d'optimiser l'énergie captée par l'éolienne mais demande la mise en œuvre d'un convertisseur avec sa commande, ce qui entraîne un surcoût par rapport à la vitesse fixe. La littérature donne un gain de puissance extraite variant entre 2% et 38%.

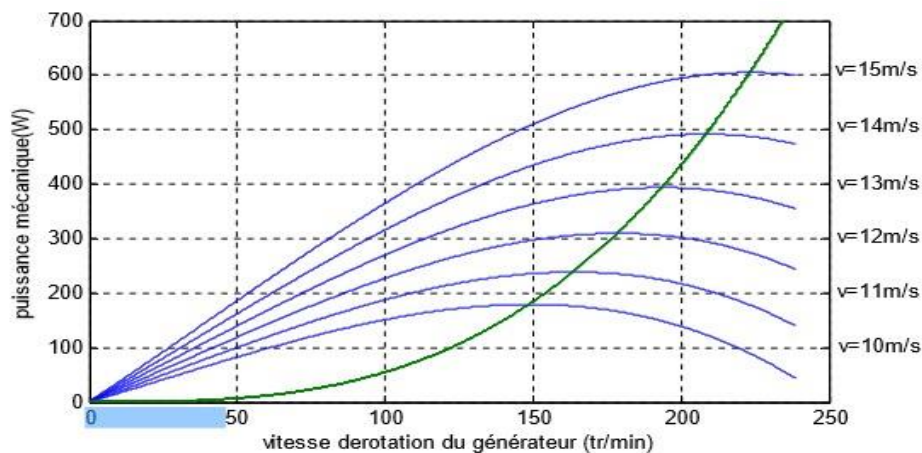


Figure .9 Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné

Au vu de la caractéristique (Fig.8), il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe, les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités.

III.2.7 L'angle d'inclinaison (Blade pitch angle) :

L'angle d'inclinaison ou de calage permet de faire varier directement le coefficient de puissance d'une turbine. Il peut être utilisé efficacement pour le contrôle de la puissance de sortie du rotor. La réduction mécanique de la puissance du rotor peut être réalisée en

réduisant ou minimisant l'angle d'attaque au-dessus de sa valeur critique. En limitant le coefficient de puissance, la puissance extraite à partir du vent est limitée. Ce type de

commande de puissance est également connu en tant que commande de l'angle de calage (pitch control). Cette commande peut être utilisée pour atteindre différent objectif :

- Optimisation de la puissance de l'éolienne, en maximisant la puissance mécanique de sortie pour une vitesse de vent donnée, ce qui est généralement appliqué pour des vitesses faibles et modérées du vent, tout en étant inférieur à sa vitesse nominale.
- Prévenir l'excès de puissance mécanique de sortie pour les vents forts au-dessus des vitesses du vent limite. Cela permet de maintenir un contrôle de la puissance mécanique et la maintient au-dessous de la valeur nominale dans le cas des vents forts.
- Pour prévenir le mouvement (rotation) des pales dans le cas de turbines déconnectées.

Il y'a deux façons communes dans lesquelles le contrôle de l'angle de calage peut être utilisé pour la régulation de la puissance de sortie d'éolienne. [10]

- **commande actif de l'angle de calage** : Pour des vitesses variable d'une éolienne, le fonctionnement d'une turbine ainsi que sa puissance de sortie peuvent être affectés soit par des changements de vitesse ou de variation de l'angle de calage des pales. Dessous de la puissance nominale, ces machines fonctionnent à la vitesse variable d'optimiser la vitesse relative au niveau de l'angle de calage fixe. Après la puissance nominale de sortie est obtenu un contrôle de couple de générateur est utilisé pour maintenir la puissance de sortie, tout en hauteur contrôle est utilisé pour maintenir la vitesse du rotor. A des vitesses de vent élevées, la puissance de sortie du générateur peut être maintenue constante, avec une augmentation de la vitesse du rotor. Cette augmentation de l'énergie disponible dans le vent est stockée sous forme d'énergie cinétique dans le rotor. Il en résulte à la fois la réduction du un couple aérodynamique et d'accélération du rotor. Si la vitesse du vent continue à rester élevée, l'efficacité aérodynamique du rotor peut être réduite en modifiant l'angle de calage, ce qui réduit la vitesse du rotor.
- **commande passif de l'angle de calage** : En cas de contrôle passif la vitesse du vent est utilisée pour fournir la puissance d'actionnement, ce qui permet d'ajuster l'angle des pas des pales. Dans ces modèles d'éoliennes, les effets des changements

dans la vitesse du rotor ou la vitesse du vent sont liés aux changements de l'angle d'inclinaison des pales.

L'action de l'air en mouvement va se traduire par des forces appliquées en chaque point de la surface. Les pales ont un profil aérodynamique présenté sur le schéma de la Figure(III.10)

:

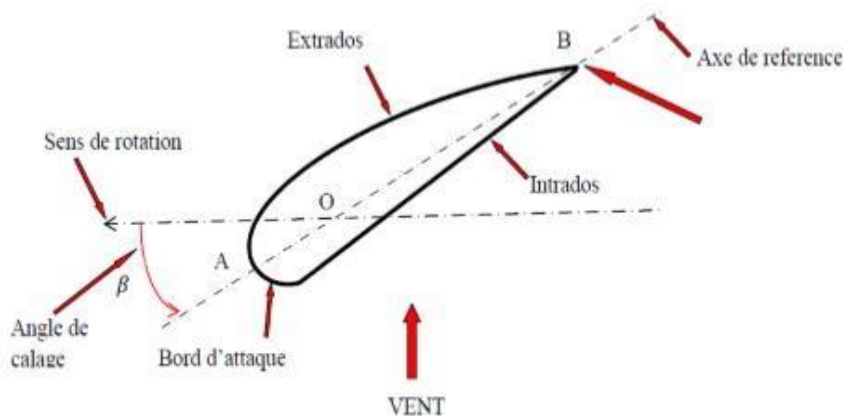


Fig.10 : Eléments caractéristiques d'une pale

On remarque plus particulièrement les éléments suivants :

- Corde : longueur l du profil du bord d'attaque au bord de fuite.
- Angle de calage β (inclinaison de l'axe de référence par rapport au plan de rotation).
- Extrados : dessus des pales
- Intrados : dessous des pales.

Les profils sont généralement de type plan-convexe (l'intrados est plan alors que l'extrados est convexe) ou alors biconvexe (l'intrados et l'extrados sont convexes). Ils sont normalisés et les paramètres sont bien définis.

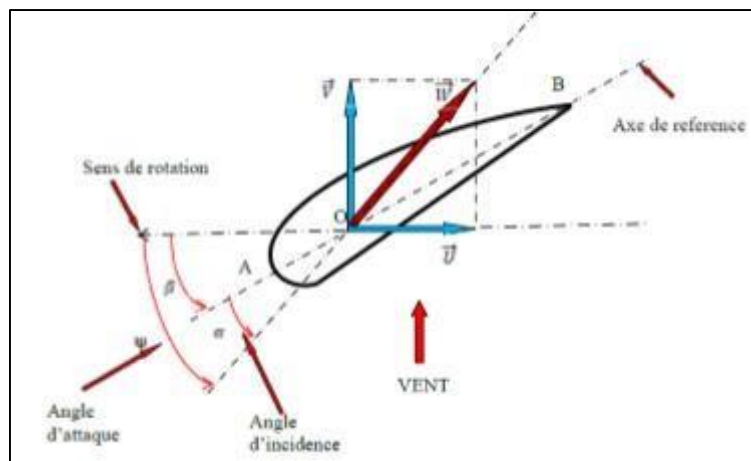


Fig. 11 : Directions du vent sur un tronçon de pale

III.2.8 Effort sur une pale d'éolienne

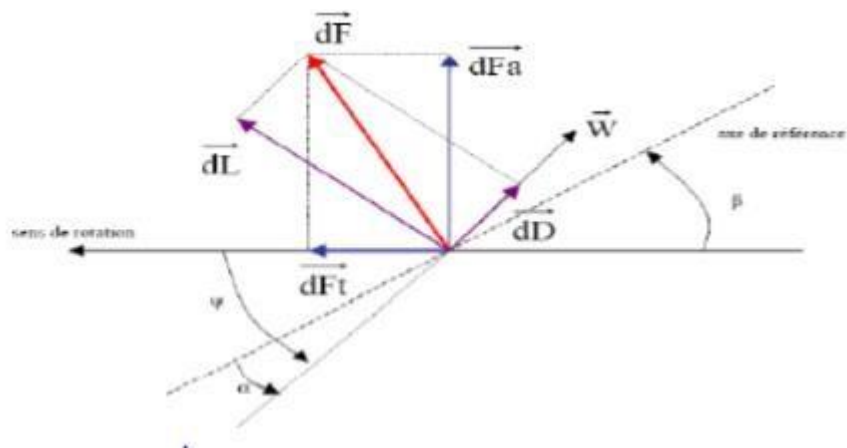


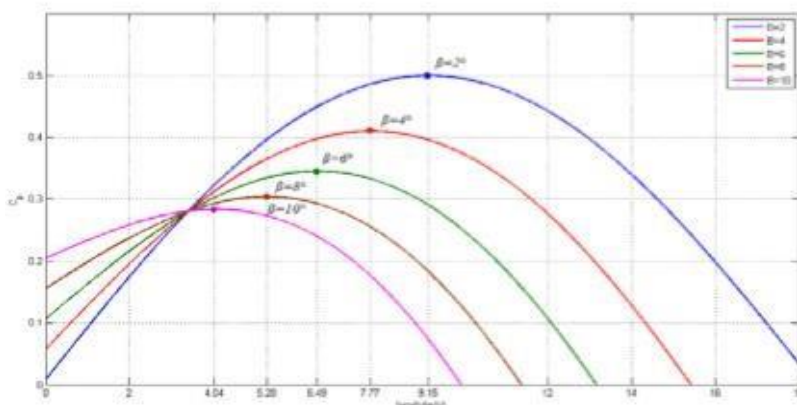
Fig.12 : Forces appliquées sur un tronçon de pale

On peut décomposer la force résultante $\vec{dF}$ de la manière suivante :

- ❖ La portance $\vec{dL}$, normale à la direction du vent apparent.
- ❖ La force de traînée $\vec{dD}$, parallèle à la direction du vent. On peut aussi la décomposer d'une autre manière :
- ❖ La poussée axiale $\vec{dFa}$, perpendiculaire au plan de rotation.
-
- ❖ La poussée tangentielle $\vec{dFt}$, dans la direction de rotation.

III.2.9 Relation du coefficient de puissance avec l'angle de calage et la vitesse relative :

Une relation empirique entre (coefficient de puissance du rotor), la vitesse relative λ et angle d'inclinaison β est utilisé pour l'élaboration d'une table de consultation qui fournit une valeur de C_p pour une valeur donnée de la vitesse du vent et la vitesse relative. Angle d'inclinaison des pales peut être défini comme l'angle entre le plan de rotation et de pale ligne de corde. Vitesse de pointe rapport est défini comme le rapport de la vitesse linéaire de la lame à pointe à la vitesse du vent.

Fig. 13 caractéristiques $C_p=f(\lambda)$ pour cinq valeurs de β .

III.3 Poursuite du point de Maximum de Puissance (Maximal Power Point Tracking, MPPT)

Un dispositif « **MPPT** », de l'anglais Maximum Power Point Tracking correspond à une stratégie de gestion permettant de suivre le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs éoliens à travers une électronique de puissance permettant de maximiser l'efficacité énergétique du système à travers la variation de la vitesse du vent.

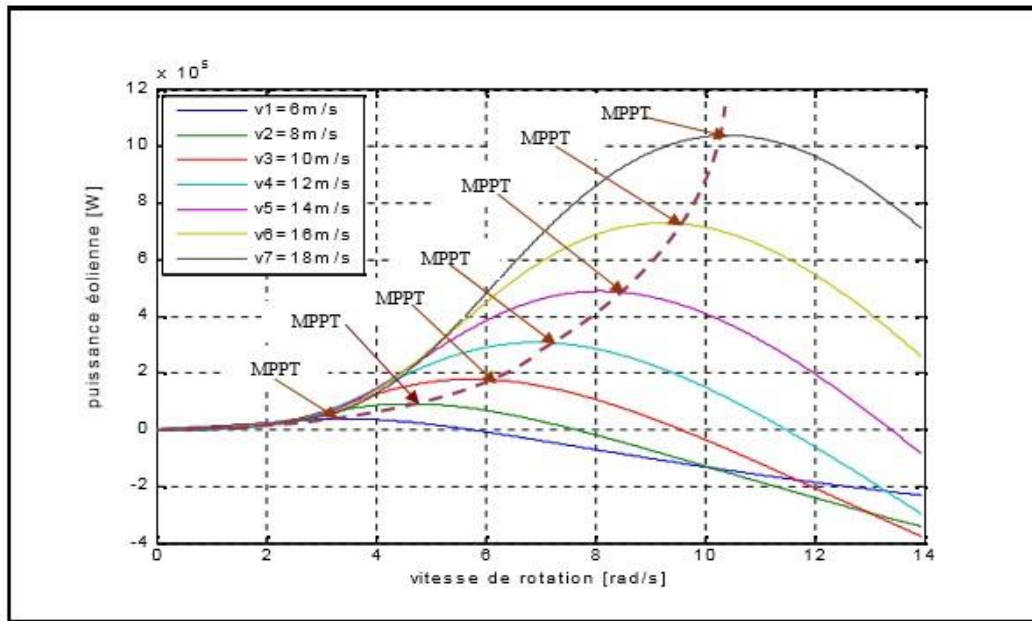


Fig.14 : Points de MPPT d'une éolienne tripale avec la vitesse de vent

Par exemple, la figure II.13 montre les extrema que poursuit la MPPT d'une éolienne de type tripale à vitesse du vent variable : la courbe de puissance en forme de cloche, typique des éoliennes et donnée pour chaque vitesse du vent, présente un point de puissance maximale. De plus en plus souvent, les génératrices sont donc reliées à un convertisseur électronique de puissance contrôlé qui permet de réaliser cette fonction. De nombreux concepts ont été introduits pour parvenir à poursuivre efficacement le point de puissance maximum pour le « grand éolien ».

III.4 Production optimale d'énergie

Dans un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal en exploitant les maxima du réseau. Ce qui signifie que pour un régime de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe) on souhaite que la puissance fournie soit maximale ce qui correspond à une valeur de λ donnée appelée λ_{opt} . La vitesse de rotation optimale Ω_{opt} résultante est alors donnée par :

$$\Omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt}}{R} \cdot v \quad (III.19)$$

La caractéristique correspondant à cette relation est donnée sur la zone II de la Figure .14. La zone I correspond aux vitesses de vent très faibles, insuffisantes pour entraîner la rotation de l'éolienne, et la zone III correspond aux vitesses de vent élevées pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale afin de ne pas subir de dégâts.

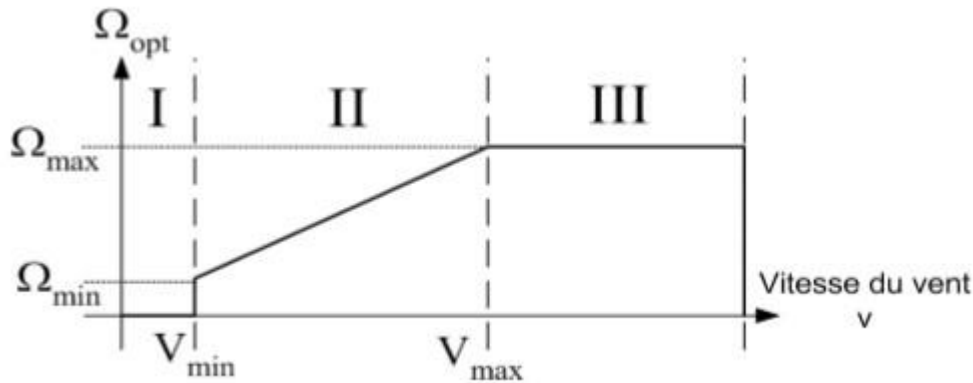


Figure 15 : Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable

La génératrice fournit alors de l'énergie électrique à fréquence variable et il est nécessaire d'ajouter une interface d'électronique de puissance entre celle-ci et le réseau (Figure 16). Cette interface est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue. L'onduleur coté réseau est alors découplé de la machine via le bus continu et il n'y a pas de lien direct entre la fréquence du réseau et celle délivré par la machine. Un tel dispositif doit cependant être conçu et commandé de façon à limiter les perturbations qu'il est susceptible de générer sur le réseau. En effet, la tension délivrée n'est pas sinusoïdale et peut contenir des harmoniques indésirables. De plus, les convertisseurs sont dimensionnés pour faire transiter la totalité de la puissance échangée entre la génératrice et le réseau, ils représentent par conséquent un investissement financier et conduisent à des pertes non négligeables.

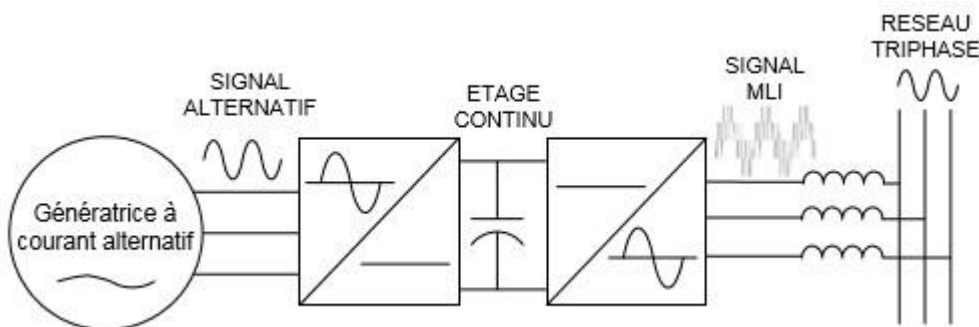


Figure 16: interface d'électronique de puissance

III.5 Modélisation du système éolien

III.5.1 Présentation du système

Le système de conversion de l'énergie éolienne est un système complexe à cause de la multiplicité des domaines existants, à savoir, le domaine aérodynamique, mécanique, électrique et les facteurs déterminant la puissance mécanique, comme la vitesse du vent, la dimension et la forme de la turbine. [11]

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

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales orientables et de longueur R . elles sont 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.

III.5.2 Hypothèse simplificatrices pour la modélisation de la turbine

On peut ainsi aboutir à un modèle mécanique plus simple (Fig.10).

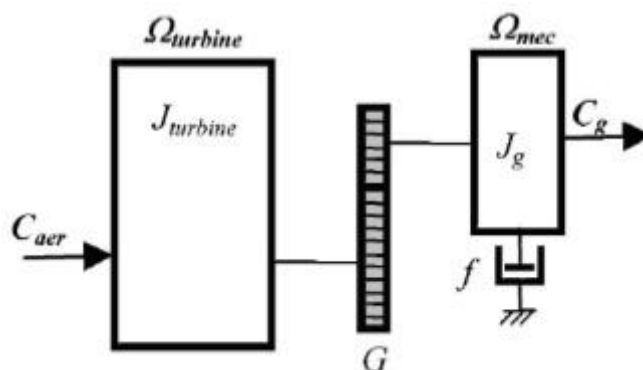


Fig.17 Modèle mécanique simplifié de la turbine

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

- ✓ La vitesse du vent est supposée à répartition uniforme sur toutes les pales, ce qui permet de considérer l'ensemble des pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de tous les systèmes mécaniques.
- ✓ Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air (δb) est très faible et peut être ignoré.
- ✓ Les pertes par frottement du rotor turbine sont considérées négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté génératrice

II.5.3 Modélisation de la turbine

Le dispositif qui est 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 (Fig..17).

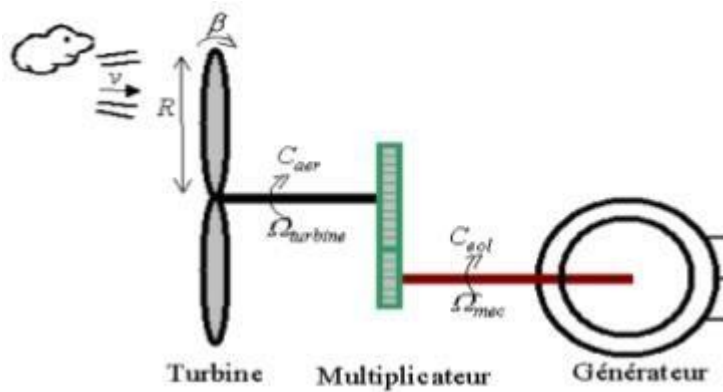


Fig.18 schéma de la turbine éolienne.

Les variables d'entrée et de sortie de la turbine éolienne peuvent se résumer comme suit :

- 1- La vitesse du vent qui détermine l'énergie primaire à l'admission de la turbine.
- 2- Les quantités spécifiques de la machine, résultantes particulièrement de la géométrie du rotor et la surface balayée par les pales de la turbine.
- 3- La vitesse de la turbine, l'inclinaison des pales et l'angle de calage. Les quantités de sortie de la turbine sont la puissance ou le couple qui peuvent être contrôlés en variant les quantités d'entrées précédentes.

L'organigramme de simulation de la turbine peut être représenté comme suit :

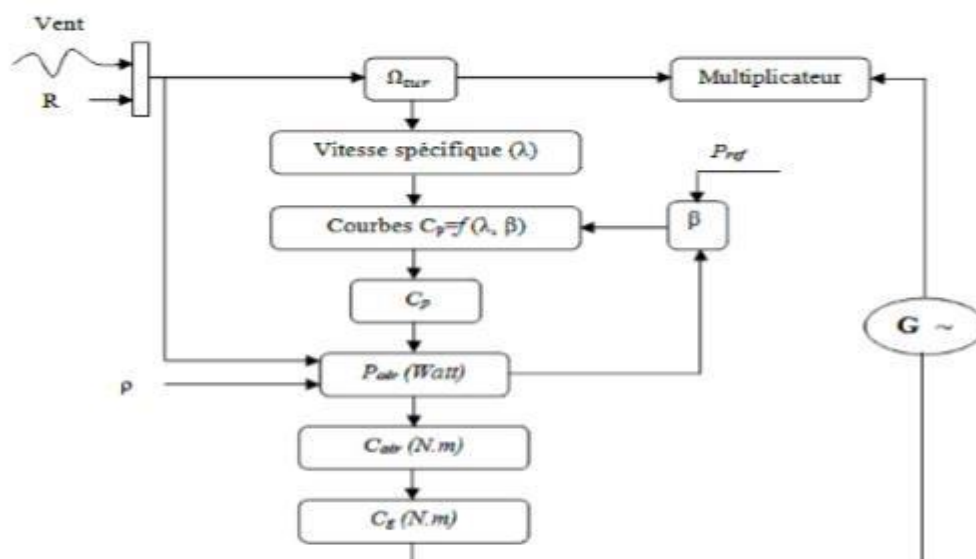


Fig. 19 Organigramme de simulation de la turbine éolienne

III.5.3.1 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice et le couple aérodynamique en couple du multiplicateur (Fig .17). Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes:

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (III.20)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (III.21)$$

III.5.3.2 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 $J_{turbine}$ 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.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (III.22)$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évaluation de la vitesse mécanique à partir de la turbine du couple mécanique totale (C_{mec}) appliqué au rotor:

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (III.23)$$

J : L'inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice, comprenant les inerties de la turbine, de la génératrice, des deux arbres et de multiplicateur ;

f : Le coefficient de frottement total du couplage mécanique ;

Le couple mécanique déduit de cette représentation simplifiée est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f \quad (III.24)$$

C : Le couple électromagnétique développé par la génératrice ;

C_g : Le couple issu du multiplicateur ;

C_f : Le couple résistant dû aux frottements ;

$$C_f = f\Omega_{mec}$$

Les variables d'entrée de l'arbre de transmission sont donc : le couple issu du multiplicateur C_g et le couple électromagnétique C_{em}

En se basant sur ce qui a précédé, la turbine d'une éolienne à axe horizontal à vitesse variable peut être modélisée comme le montre le schéma bloc de la figure **(Fig. 20)**.

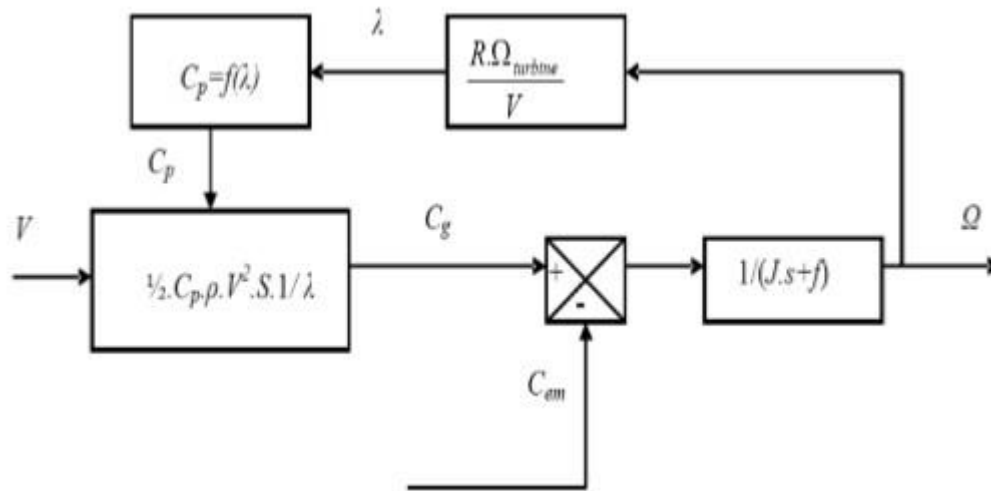


Fig. 20 Schéma bloc d'une turbine éolienne à vitesse variable.

III.6 Conclusion

Nous avons détaillé dans ce chapitre une modélisation de la partie mécanique de l'éolienne prenant en compte les caractéristiques du profil du vent et des pales utilisées et l'angle de calage. Les stratégies de fonctionnement d'une éolienne (vitesse fixe, vitesse variable) sont également décrites. Nous avons pu valider le modèle de notre turbine, ce qui nous permettra de l'utiliser par la suite.

IV.1 Introduction

Afin de valider notre étude théorique de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, la réalisation pratique ou, à défaut, la simulation du processus est nécessaire. La chaîne de conversion a été modélisée et simulée à l'aide du logiciel Matlab-Simulink. Les convertisseurs électroniques présentés précédemment ont besoin, pour fonctionner, de recevoir des ordres de commande. A l'aide du logiciel de simulation Matlab-Simulink, on transforme les équations qui constituent le modèle du processus à étudier en schémas bloc.

IV.2 Simulation de la chaine de conversion

IV.2.1 La turbine

La turbine est entraînée par une MSAP, dont le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine est représenté dans la figure (IV.1).

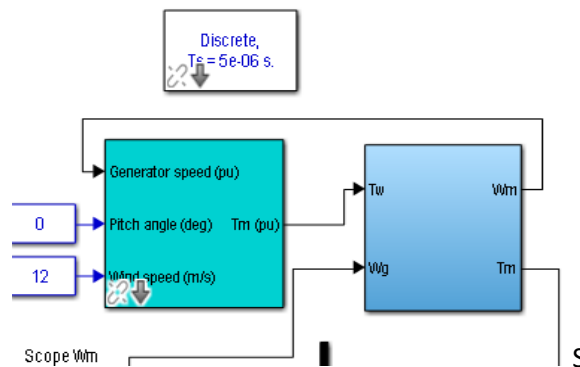


Figure (IV.1) schéma bloc du modèle de la turbine.

IV.2.2 La machine synchrone à aimant permanent

La figure (IV.2) représente la machine asynchrone dans SIMULINK :

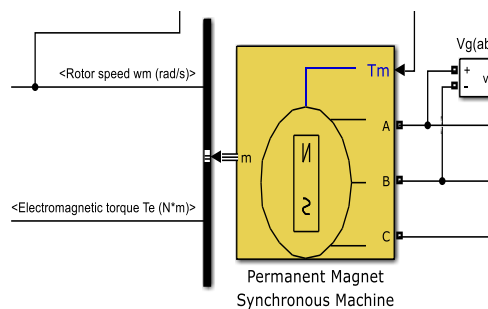


Figure (IV.2) schéma bloc du modèle de la machine.

Pour toute simulation dans ce mémoire, nous avons adopté une machine synchrone de puissance 15Kw dont les caractéristiques suivantes :

Rs	Résistance statorique	1,137	Ω
Ld	Inductance statorique selon l'axe d	0,0027	H
Lq	Inductance statorique selon l'axe q	0,0027	H
φ	Flux des aimants permanents	0,15	Wb
f	Coefficient de frottement	0	Nm/rd/s
J	Inertie de l'ensemble turbine et génératrice	0,0016	kg.m ²
P	Nombre de pôles	5	-

Tableau IV.1 Paramètre de la machine synchrone

IV.2.3 Schéma de Simulation du comportement du système

La figure (IV.3) illustre le schéma bloc de l'alimentation la chaine de conversion d'énergie éolienne fait par le logiciel Simulink sous Matlab.

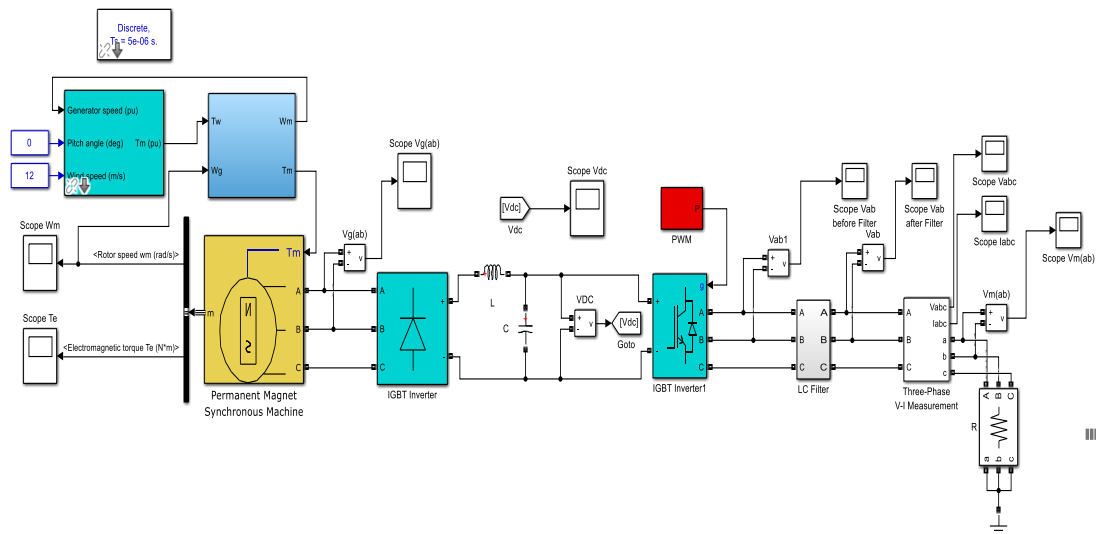


Figure (IV.3) schéma bloc de simulation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne.

Les figure (IV.4) (IV.5) (IV.6) (IV.7) et (IV.8) donne les résultats de simulation du système.

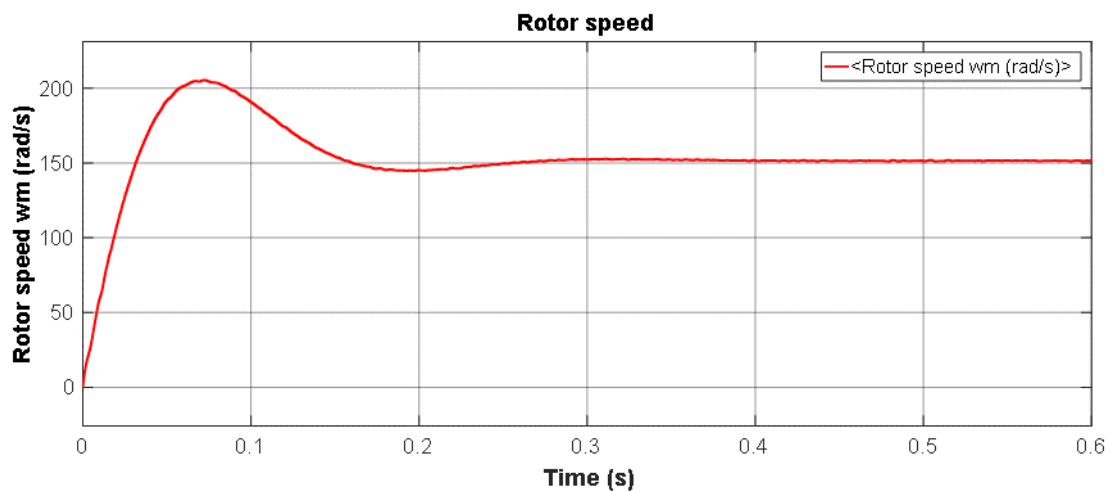
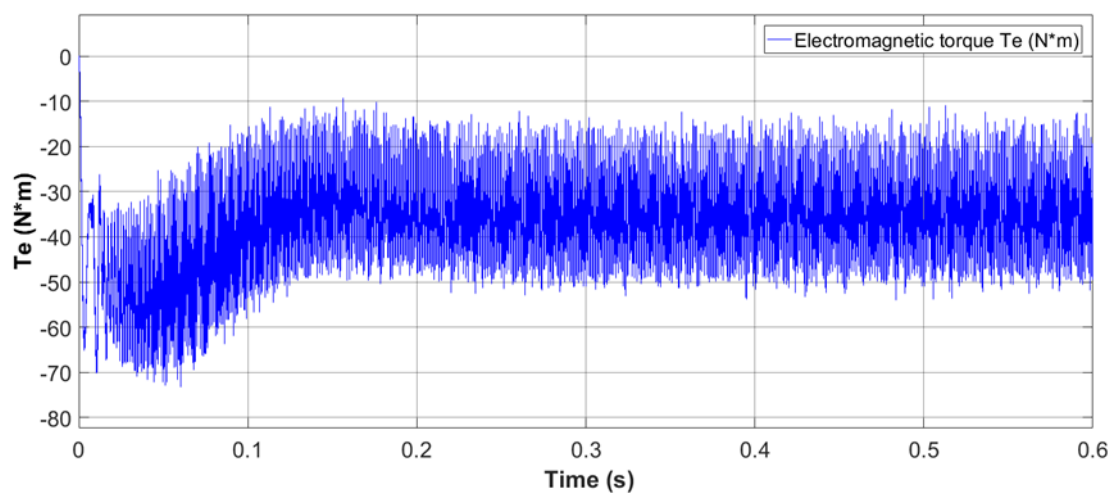
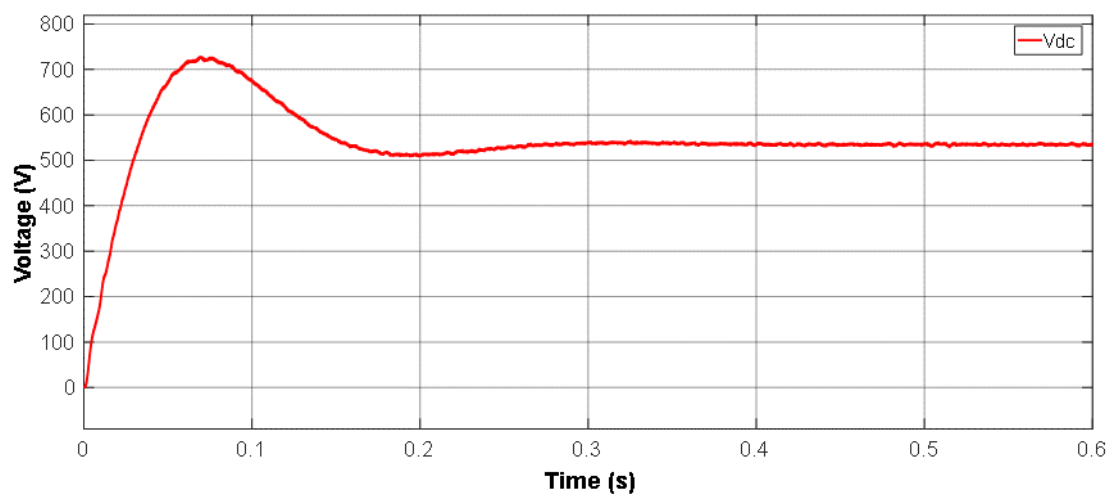
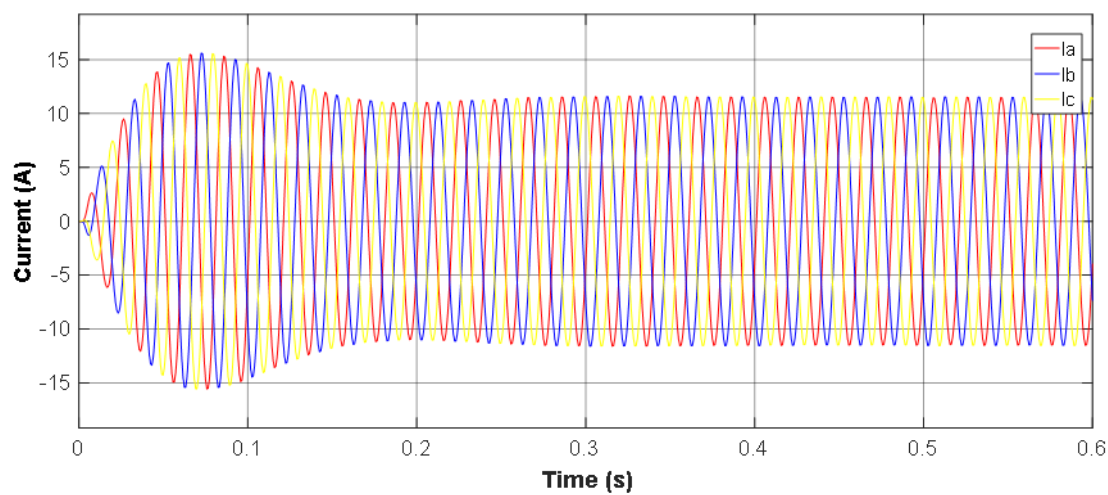
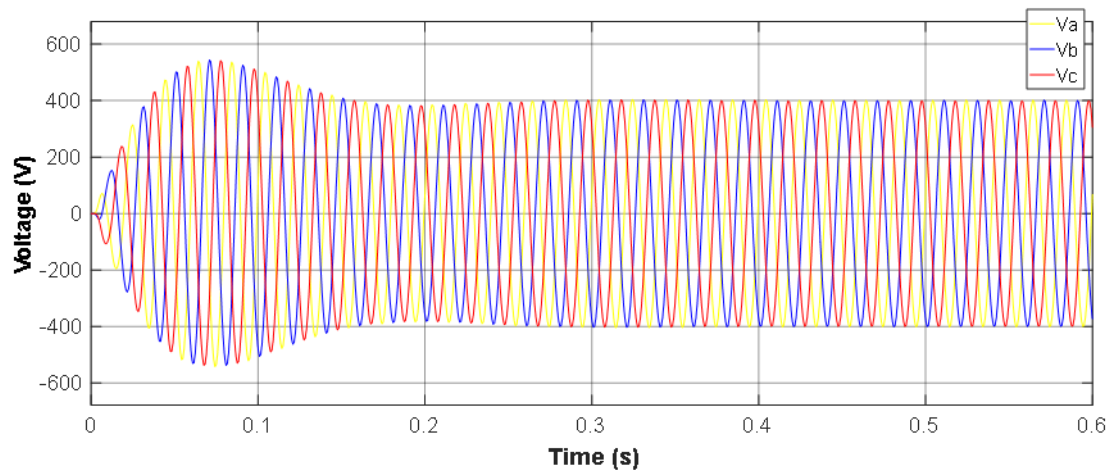
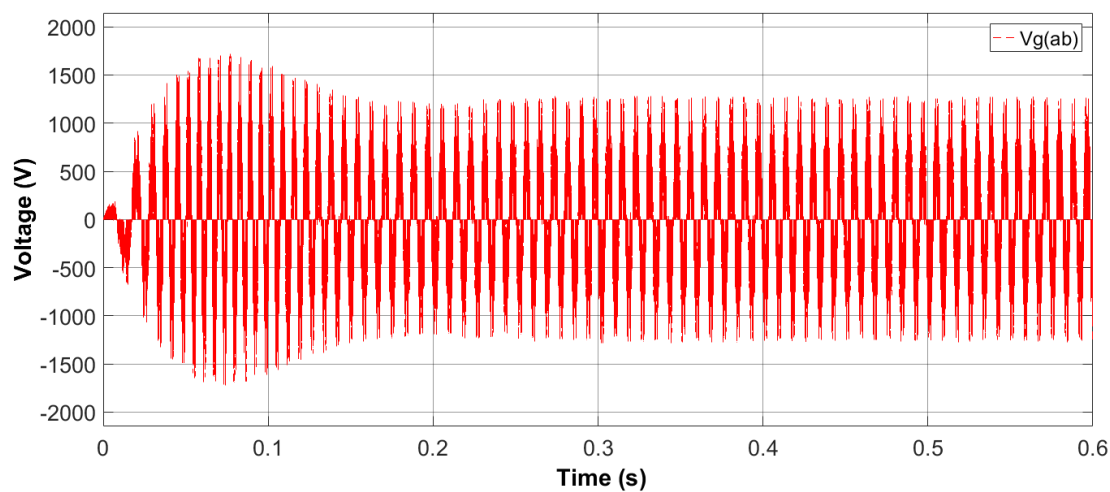
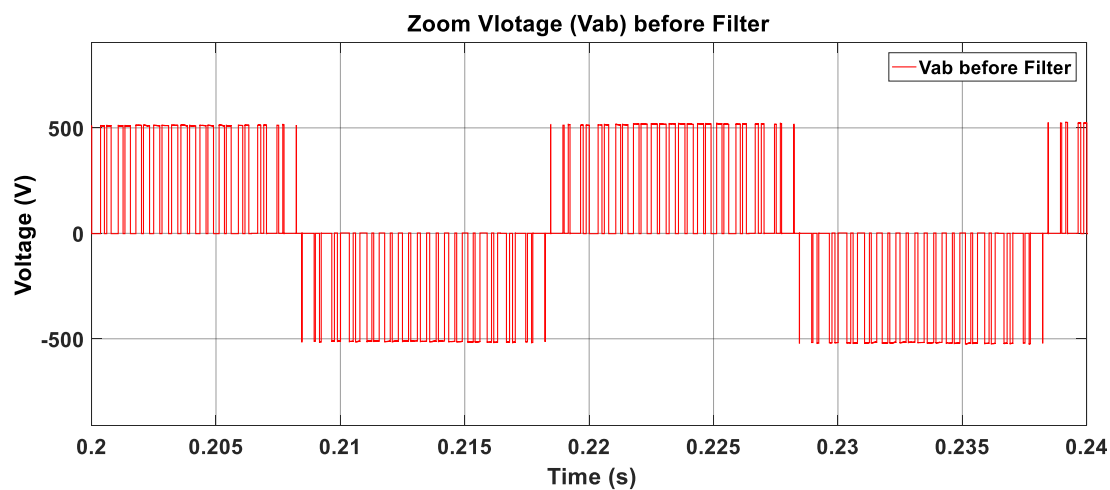


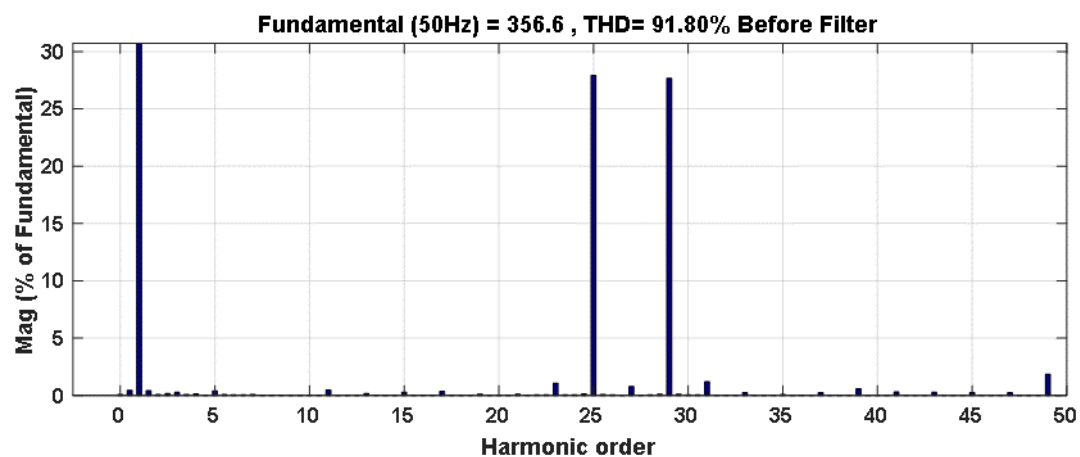
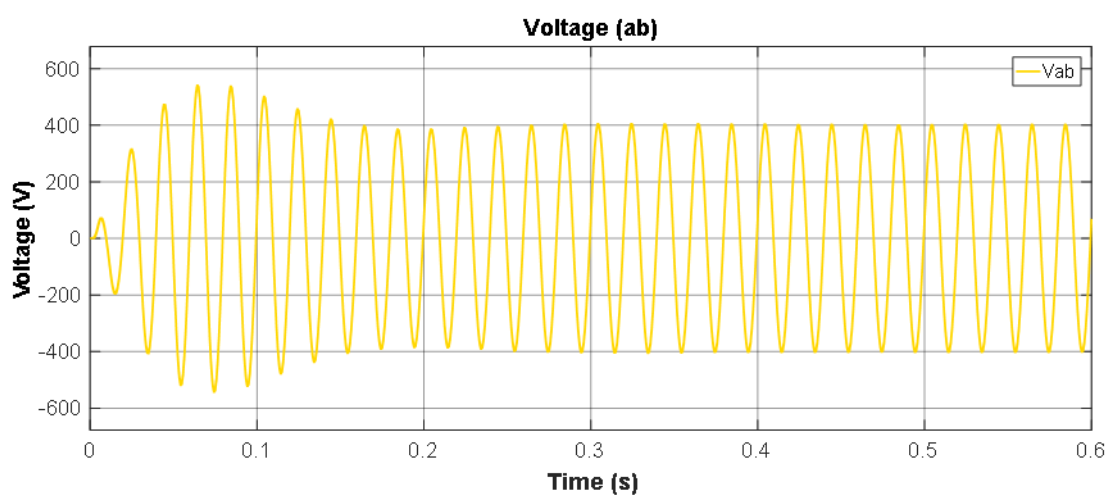
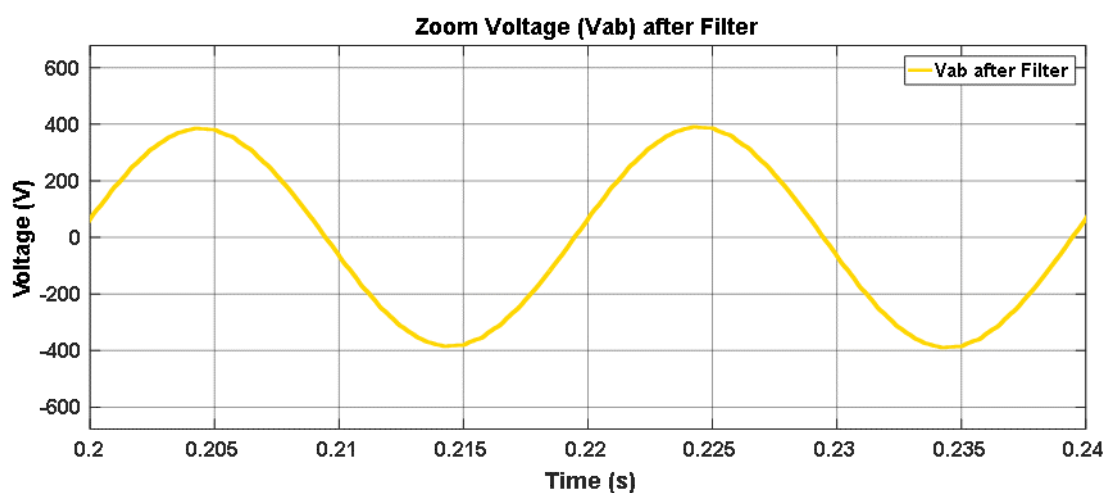
Figure (IV.4) Vitesse de la turbine Wm [rad/s].

Paramètres de la turbine

Pmec-nominale	1.5 106 W
S base -générateur	(1.5 106 /0.9)W
Vvent	12m/s
P max-turbine /Pmec-nominale	0.8
Angle de calage (β)	0°
c1, c2,c3,c4,c5,c6	0.5176, 116, 0.4, 5, 21, 0.0068

Figure (IV.5) Le couple T_e .Figure (IV.6) La tension direct V_{dc} .Figure (IV.7) Courant statorique i_a i_b i_c .

Figure (IV.8) Tension statorique V_a V_b V_c .Figure (IV.9) Tension ($V_g = V_{ab}$) avant le filter.Figure (IV.10) Zoom Tension V_{ab} (ab) avant le filtre.

Figure (IV.11) THD % de la Tension V_{ab} avant le filtre.Figure (IV.12) Tension V_{ab} après le filtre.Figure (IV.13) Zoom Tension V_{ab} après le filtre.

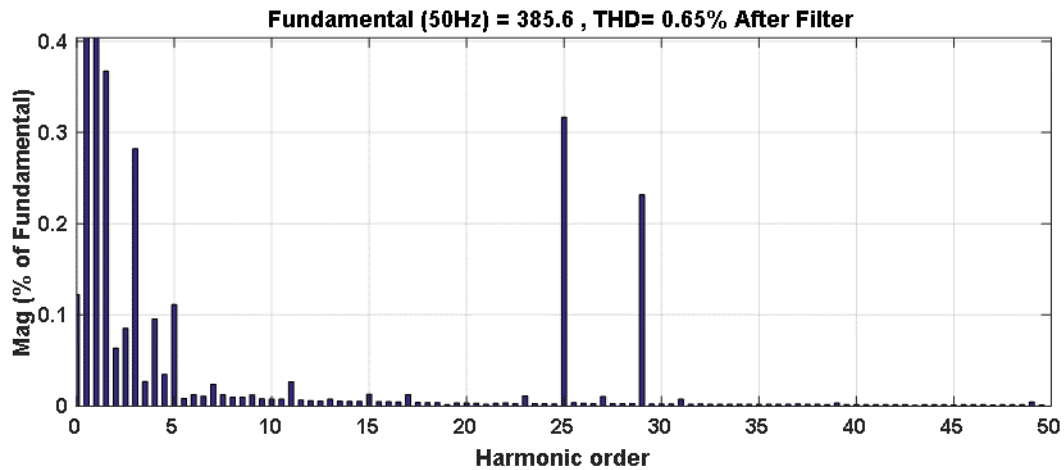


Figure (IV.14) THD % de la Tension V_{ab} après le filtre.

Interprétation des courbes

La Figure (IV.4) représente vitesse de rotation.

La Figure (IV.5) représente couple électromagnétique.

La Figure (IV.6) représente La tension direct V_{dc} .

La Figure (IV.7) représente Courant statorique $i_a i_b i_c$.

La Figure (IV.8) représente Tensions statoriques V_{abc}

Pour juger la qualité d'énergie, le Taux de Distorsion Harmonique "THD" en Tension est une grandeur permettant de quantifier le pourcentage de la déformation d'onde causée par les perturbations harmoniques générées par les charges non linéaires. De ce fait, Les **figures (IV.9) (IV.10) (IV.11) (IV.12) (IV.13) (IV.14)** suivantes illustres l'évolution du Tension alternatif (avant et après) coté source et son spectre harmonique.

IV.3 Conclusion

Dans ce chapitre on présente les résultats de simulation de chaque partie constatant l'ensemble (turbine – multiplicateur – GSAP - redresseur – onduleur MLI – filtre – charge) ; se fait en deux étapes à travers le logiciels MATLAB.

Pour avoir les résultats de les tensions suivants :

- la tension redressé à la sortie du pont redresseur
- La tension V_{ab_before} : tension avant filtrage. Fondamentale (50 Hz) = 356,6 THD = 91,80%.
- La tension V_{ab_after} : tension après filtrage. - fondamentale (50 Hz) = 385,6 THD = 0,65%.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce mémoire était la modélisation et la commande d'une chaîne éolienne dédiée pour la production d'énergie électrique. Pour cela, nous avons fait une simulation d'une chaîne de conversion éolienne constituée d'une turbine de faible puissance associée à d'une génératrice synchrone à aimants permanents GSAP fonctionnant à vitesse variable, en mode isolé. Cet ensemble de conversion de l'énergie éolienne est terminé par un dispositif d'électronique de puissance afin de transmettre l'énergie électrique produite vers les sites isolés. Cette étude est complétée par la mise en place des stratégies de commande nécessaires au bon fonctionnement de chaque partie. Dans le contexte d'énergie éolienne un état de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne est présenté dans le premier chapitre. Nous avons parlé des différents types d'éoliennes existant avec leurs différentes structures à savoir les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal. Nous avons également traité les lois fondamentales permettant la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique avec une comparaison entre les éoliennes à vitesse variable et les éoliennes à vitesse fixe. Dans ce mémoire notre choix est basé sur une machine synchrone à aimants permanents MSAP.

Dans un dernier temps, l'essentiel de notre contribution est abordé, à savoir la simulation de la chaîne de conversion. Les différents modèles étudiés sont conformes à la réalité. Un modèle de simulation a été mis au point pour prédire le comportement du système en entier. Nous avons étudié la chaîne de conversion éolienne, décrit les différents constituants de la chaîne de conversion et présenter les résultats de simulation.

Dans ce chapitre on présente les résultats de simulation de chaque partie constatant l'ensemble (turbine – multiplicateur – GSAP - redresseur – onduleur MLI – filtre – charge) ; se fait en deux étapes à travers le logiciels MATLAB.

Pour avoir les résultats de les tensions suivants :

- la tension redressé à la sortie du pont redresseur
- La tension V_{ab_before} : tension avant filtrage. Fondamentale (50 Hz) = 356,6 THD = 91,80%.
- La tension V_{ab_after} : tension après filtrage. - fondamentale (50 Hz) = 385,6 THD = 0,65%.

Bibliographiques.

- [1] Frédéric POITIERS « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne (machine asynchrone à cage autonome – machine asynchrone à double alimentation relié au réseau) » Thèse de doctorat de l'université de Nantes 2003
- [2] Rabia MAMMAD « Etude et simulation de la robustesse d'une commande pour éolienne à base de MADA en présence des incertitudes des paramètres et/ou des perturbations présente dans le réseau électrique
- [3] : A. BOYETTE « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne »,2006.
- [4] M. SI-BRAHIMI » étude d'un système de conversion de l'énergie éolienne à base de la machine asynchrone » Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015
- [5] : Mohammed MALKI Saïd ALI BELARBI « Etude et Simulation d'un aérogénérateur connecté au réseau (Turbine + MADA + Réseau) en mode continu et discret », 2014
- [6] MAZOUZ FARIDA « Commande d'un système éolien à base d'un générateur synchrone à aimants permanents », 2013
- [7] REDJEM Radia « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », 2009
- [8] LOUAR FATEH « Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent », 2016
- [9] Mme HAMECHA Samira, Ep.BOUREKACHE « Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents », 2013
- [10] LATRECHE Mohammed Tahar « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien », 2012
- [11] Article_Paris_final « Modélisation et commande d'une génératrice synchrone à aimant permanent pour la production et l'injection de l'énergie offshore dans un réseau Matlab /Simulink

SITES WEB :

<https://hal.archives-ouvertes.fr>

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr> (29/10/2015)

<https://www.univ-setif.dz> (2012)