

LA REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université Akli Mohand Oulhadj -Bouira-
Faculté Des Sciences Et Des sciences appliquées
Département : Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme Master en Electromécanique

Option : Electromécanique

Thème

Optimisation du Rendement d'un Générateur Eolien à axe Horizontal Basé sur Machine Synchrone

Proposé et dirigé par :

❖ Mr: Ameziane Sadek

Présenté par :

❖ Belgacem Hassane
❖ Hamoudi Mektoub

Année universitaire : 2017-2018

Remerciements

Ce document présente les travaux effectués dans le cadre de notre projet de fin d'étude de Master au Département de Génie Électrique et Électromécanique de la Faculté des Science et des sciences appliquées , de L'UNIVERSITÉ AKLI MOHAND OULHADJ DE BOUIRA.

Avant tout, nous remercions Allah, le tout puissant de nous avoir donné le courage et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Avec respect, nous tenons à remercier tout le corps enseignant de l'Université l'Université Akli mohand oulhadj de bruira pour nous avoir suivi tout au long de nos études.

Nous remercions également notre co-encadreur Monsieur amziane SADEK pour son aide, ses conseils lors des simulations réalisées.

Merci enfin à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidé et donc ont contribué au succès de ce travail.

Hassane BELGACEM

Mektoub HAMOUDI

Bruira 2018

DÉDICACES

JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL :

- ❖ *A ma grande mère et mon grand-père qui je les respecte beaucoup.*
- ❖ *A mes chers parents en témoignage de l'amour du respect et de gratitude que je leur porte.*
- ❖ *A mes très chers frères et soeurs.*
- ❖ *A mes cousins Ali et Amina.*
- ❖ *A tous mes amis surtout mon ami Said **SOUROUR***
- ❖ *A mes enseignants du primaire au moyen au secondaire et de l'**Université akli mohand oulhadj-bouira** surtout les enseignants du Département Génie Electrique.*

Dédicaces

Je dédie ce travail :

- *à tout ma famille-et surtout à mes parents qui m'ont beaucoup aidé pour terminer mes études, et qui m'ont tellement encouragé moralement et psychiquement, et qui se sont sacrifiés pour moi.*
- *à mes frères et ma sœur, à mes amis et toute la famille BELGACEM et la famille HAMOUDI.*
- à tout ce ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans mon travail ainsi qu'à tout les membres de la promotion du Master Electromécanique.*
- *à tous les enseignants du département de Génie Electrique et à tous mes amis de la promotion Electromécanique. (2017-2018)*

Sommaire

Remerciements	
Décidas	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des symboles et notations	
Introduction générale.....	01
CHAPITER 1: ETAT DE L'ART SUR LES SYSTEMES EOLIENS	
1.1 Introduction.....	03
1.2 Définition de l'énergie éolienne.....	03
1.3 Historique de l'énergie éolienne.....	04
1.3.1 l'historique de l'énergie éolienne en Algérie.....	05
1.3.2 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	06
1.3.2.1 Avantages.....	06
1.3.2.2 Inconvénients.....	06
1.4 Types des turbines éoliennes.....	06
1.4.1 Eolienne à axe vertical (VAWT).....	06
a- Les avantages.....	07
b- Les inconvénients.....	07
1.4.2 Eolienne à axe horizontal (HAWT).....	07
a. Avantage.....	08
b. Inconvénients.....	09
1.5 Constitution d'une éolienne a axe horizontal.....	09
a- Le mât.....	09
b- La nacelle.....	10
c- Le rotor.....	10
1.6 Fonctionnement d'une éolienne.....	10
1.7 Le système d'orientation des pales.....	11
1.7.1: Le pitch control.....	11
1.7.2 Le Stall Control.....	12
1.8 Types des machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne.....	13
1.8.1 Générateur synchrone.....	13

Sommaire

1.8.2 Générateur asynchrone.....	14
1.8.2.a Machine asynchrone à cage d'écureuil.....	14
1.8.2.b Machine asynchrone à double alimentation.....	14
1.9 Utilisation des systèmes éoliens.....	15
1.10 Modélisation et simulation de la turbine éolienne	15
1.10.1 Reproduction de la vitesse du vent :.....	15
1.10.2 La théorie de Betz.....	17
1.10.3 Modélisation de la turbine :.....	18
1.10.4 Modèle du multiplicateur :.....	19
1.10.5 Modèle de l'arbre	20
1.10.6 le résultat de Simulation de la turbine	20
1.11 Conclusion.....	22
CHAPITRE 2 : ETAT DE L'ART SUR LA MACHINES SYNCHRONES A AIMANTS PERMANENTS	
2.1 Introduction.....	23
2.2 Présentation de la machine synchrone à aimants permanents.....	23
a- Le stator.....	23
b- Le rotor.....	23
2.3 Principe de fonctionnement de la MSAP.....	25
2.4 Différents types de la machine synchrone à aimants permanents.....	25
2.4.1 Machines à flux radial.....	25
2.4.2 Machines à flux axial.....	26
2.4.2.1 Machines à flux axial à un stator et un rotor.....	26
2.4.2.2 Machines à flux axial à stator interne ou externe.....	26
2.4.2.3 Machines à flux axial à stator multiples ou multi disques.....	27
2.5 Modélisation et simulation de la machine synchrone à aimants permanent.....	27
2.5.1 Hypothèse simplification.....	28
2.5.2 Modélisation.....	28
a. Mise en équation de la GSAP en triphasé.....	28
b. Transformation triphasé-déphasé.....	30
c. Mise en équation de la GSAP en biphasé	32
2.5.3 Simulation.....	32

Sommaire

2.6 Conclusion.....	35
CHAPITRE 3: OPTIMISATION DU RENDEMENT POUR L'EOLIENNE A AXE HORIZONTAL BASE SUR LA GENERATRICE SYNCHRONE	
3.1 Introduction.....	36
3.2 La commande vectorielle de la génératrice synchrone a aimants permanents.....	36
3.2.1 principe.....	36
3.2.2 Avantages et inconvénients de la commande vectorielle	38
3.2.2. a Avantages de la commande vectorielle.....	38
3.2.2. b Inconvénients de la commande vectorielle.....	38
3.2.3 Synthèse de correcteurs.....	39
3.2.4 Le découplage	40
3.2.5 : Simulation et interprétation	42
3.3 Définition et principe de fonctionnement du système éolien à vitesse variable.....	44
3.3.1 Principe.....	44
3.3.2 Les différents types d'MPPT éoliens.....	46
a. Maximisation de la puissance sans la connaissance de la courbe caractéristique de la voilure.....	46
b. Maximisation de la puissance avec connaissance de la courbe caractéristique de la voilure.....	47
3.4 Conclusion	52
Conclusion générale	53
Références bibliographe	
Annexe	

Sommaire

Liste des figures

Figure 1.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent	03
Figure 1.2: Principaux organes du système de conversion éolien	04
Figure 1.3 : Les régions ventées en Algérie.....	05
Figure 1.4 : technologie éolienne à axe vertical.....	07
Figure 1.5 : Eolienne à axe horizontal.....	08
Figure 1.6: Distinction entre éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pales.....	08
Figure 1.7: composants d'une éolienne	09
Figure 1.8: Le principe de base et l'application d'un système éoliens à axe horizontal.....	11
Figure 1.9. Orientation des pales.....	11
Figure 1.10 : Boucle de régulation de l'angle de calage des pales.....	12
Figure 1.11 : Machine synchrone connectée directement au réseau de puissance.....	13
Figure 1.12 : Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.....	13
Figure 1.13 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable.....	14
Figure 1.14 : Schéma block de reconstruction de la vitesse du vent.....	16
Figure 1.15 : séquence de vent.....	16
Figure 1.16 : Théorie de Betz : Schéma de principe.....	17
Figure 1.17 : Schéma de la turbine éolienne.....	18
Figure 1.18 : Evolution du C_p en fonction de Lambda ' λ '	19
Figure 1.19 : vitesse fixe du vent (m/s).....	20
Figure 1.20 : puissance (W) avec vitesse fixe	21

Liste des figures

Figure 1.21 : Schéma bloc d'une turbine éolienne à vitesse variable.....	21
Figure 1.22 : de vitesse variable (lent) de vent et puissance.....	21
Figure 1.23 : de vitesse variable (rapide) de vent et puissance.....	22
Figure 2.1 : Différents dispositions d'aimants permanents dans un rotor.....	24
Figure 2.2 : Principe de fonctionnement du moteur à aimants permanents.....	25
Figure 2.3 : Machine synchrone à aimants avec rotor intérieur.....	26
Figure 2.4 : Machine synchrone à aimants avec rotor extérieur.....	26
Figure. 2.5 : Descriptif de la machine à flux axial 1 stator / 1 rotor.....	26
Figure. 2.6 : Descriptif de la machine à flux axial stator externe	27
Figure. 2.7 : Descriptif de la machine à flux axial stator interne.....	27
Figure. 2.8 : Descriptif de la machine à flux axial multi Niveaux	27
Figure 2.9 : Schéma représentatif de la MSAP.....	28
Figure 2.10 – Modèle de PARK pour la GSAP.....	31
Figure 2.11 : Evolution des tensions statorique en fonction du temps ($R_{ch}=200\Omega$ puis $R_{ch}=150\Omega$ à l'instant $t=0.5s$) pour la même inductance charge L_{ch}	33
Figure 2.12 : Evolution de la tension statorique d'une phase en fonction du temps pour deux	34
Figure 3.1 : stratégies de commande en couple de GSAP	38
Figure 3.2 : Boucle de régulation de courant.....	39
Figure 3.3 : Description des couplages.....	41
Figure 3.4 : Le courant I_d de la génératrice en (A). avec un couple de 4.5 et 3.5.....	42
Figure 3.5 : Le courant I_q de la génératrice en (A) avec un couple de 4.5 et 3.5.....	42
Figure 3.6 : La Puissance générée en (watt). Avec un couple de 4.5 et 3.5.....	43
Figure 3.7 : Le courant I_q de la génératrice en (A) avec $R_{ch}= 250 \Omega$	43
Figure 3.8 : La Puissance en (watt). Avec $R_{ch}= 250 \Omega$	43

Liste des figures

Figure 3.9 : Le courant I_q de la génératrice en (A) avec $R_{ch} = 300 \Omega$	44
Figure 3.10 : La Puissance en (watt).avec $R_{ch} = 300 \Omega$	44
Figure 3.11 : maximisation de la puissance d'une éolienne à vitesse variable	45
Figure 3.12: Diagramme de la vitesse angulaire sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.....	45
Figure 3.13: MPPT avec asservissement de la vitesse.....	48
Figure 3.14 MPPT sans asservissement de la vitesse.....	50
Figure 3.15 : profil du vent.....	50
Figure 3.16 : Le courant I_d de la génératrice en (A).....	51
Figure 3.17: Le courant I_q de la génératrice en (A).....	51
Figure 3.18: Le courant I_d de la génératrice en (A).....	51
Figure 3.19: Le courant I_q de la génératrice en (A).....	52
Figure 3.20 : La Puissance en (watt).....	52

LISTRES DES SYMBOLES ET NOTATIONS

V_1, V_2	Vitesses du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne
P_{aer}	La puissance aérodynamique
P_v	La puissance du vent
ρ	Masse volumique de l'air en température ambiante (15°C)
F	la fors de l'air
C_p	Le coefficient de puissance
R	longueur de la pale
$\Omega_{turbine}$	vitesse de la turbine
$V_{estimé}$	La vitesse du vent estimée
G	<i>gain de multiplicateur</i>
J	Moment d'inertie totale
λ	vitesse relative
β	Angle d'orientation des pales
C_g	couple du multiplicateur
C_{aer}	Couple aérodynamique de l'éolienne
Ω_{mec}	Vitesse mécanique de la génératrice
C_{em}	Couple électromagnétique
C_r	Couple résistant
C_{em-ref}	Couple électromagnétique de référence
Ω_{ref}	Vitesse mécanique de référence de la génératrice
J_{pale}	Inertie de la pale
F_{pale}	Coefficient de frottement de la pale par rapport au support de l'éolienne
MSAP	Machine synchrone à aimants permanents
GSAP	Génératrice synchrone à aimants permanents
(d, q)	Indice du repère de Park lié au rotor
R_s	Résistance statorique
L_d	Inductance statorique directe
L_q	Inductance statorique quadratique
(U_{sd}, U_{sq})	Composantes de la tension au stator dans le repère de Park
Ψ_f	flux d'excitation des aimants permanents
(ψ_{sd}, ψ_{sq})	Composantes du flux statorique dans le repère de Park
(I_{sd}, I_{sq})	Composantes du courant statorique

LISTE DES SYMBOLES ET NOTATIONS

P	Nombre de paire de pôles
f	Le coefficient de frottement
ω	Pulsation électrique statorique
Ω	Vitesse de rotation mécanique du rotor
F	Vecteur force exercée sur les pales d'une éolienne à incidence variable
Φ_{S-nom}	le flux statorique nominal
ω_{nom}	nominal la vitesse de rotation
Φ_{S-ref}	le flux statorique de référence
f_p	Fréquences de modulation
f_{ref}	Fréquences de référence
V_{mref}	Amplitude de la tension de référence
V_m	Valeur de crête de l'onde de modulation
M.P.P.T	Maximum Power Point tracking

INTRODUCTION GENERALE

Il est clair que l'énergie électrique permet un véritable confort et une des causes du développement d'un pays. Il est clair que sans ressources énergétiques viables, un pays aura d'autant plus de mal à se développer. Toutefois, cela révèle un autre problème : Pour faciliter leur développement, certains pays font appel à des sources d'énergie polluantes tandis que d'autres plus développés souhaitent favoriser le développement de ressources moins polluantes. Ainsi, alors que les énergies prédominantes sont le pétrole et le nucléaire, la recherche tant publique que privée se tourne vers des énergies plus renouvelables. D'ailleurs, même si ces recherches peuvent paraître du point de vue leur progression industrielle dérisoires, elles n'en restent pas moins primordiales.[24]

L'intense industrialisation des dernières décennies et la multiplication des appareils domestiques électriques ont conduit à des besoins planétaires en énergie électrique considérables. Face à cette demande, toujours croissante de nos jours, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures. Sans oublier que des événements climatiques récents, comme la canicule de l'été 2003 en France, ont soulevé de nouvelles interrogations sur la viabilité du nucléaire, notamment à cause du réchauffement local de la température de l'eau des fleuves utilisée pour refroidir les réacteurs.[22]

Face à ces problèmes, et de façon à limiter l'emploi de centrales nucléaires, certains pays, aidés par la déréglementation, se sont tournés vers de nouvelles formes d'énergie dites "renouvelables" faisant appel, de façon directe ou indirecte, à l'énergie solaire. Parmi celles-ci, l'éolien apparaît clairement en bonne place, non pas en remplacement des sources conventionnelles, mais comme énergie d'appoint complémentaire à l'énergie nucléaire. En effet l'énergie potentielle des masses d'air en mouvement représente, au niveau mondial, un gisement considérable.

Actuellement, plusieurs pays sont déjà résolument tournés vers l'énergie éolienne. C'est le cas de l'Allemagne, leader mondial avec une puissance éolienne installée de 12 GW, l'Espagne, numéro deux de l'Union Européenne avec 4,15 GW et le Danemark avec 2,9 GW à la fin de l'année 2002.

INTRODUCTION GENERALE

La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. Dans ce cadre, le présent mémoire décrit une étude sur l'utilisation des machines de type synchrone à aimants permanents dans un système éolien. Le premier chapitre est consacré à des rappels sur les systèmes éoliens à travers les équations et les concepts physiques régissant leurs fonctionnements.

Dans la deuxième chapitre intéresser à la machine synchrone à aimants permanents , la plus utilisée dans les éoliennes tournant à une vitesse constante, en partant d'un certain nombre d'hypothèses simplificatrices pour la modélisation mathématique de la machine.

Le troisième chapitre consiste à l'optimisation du rendement d'un générateur éolien à axe horizontal basé sur une génératrice synchrone à aimants permanents, la vérification des résultats obtenus vont être réalisés dans la plateforme Simulink du logiciel Matlab.

CHAPITRE 1 :

ETAT DE L'ART SUR LES SYSTEME EOLIRNS

1.1 Introduction

Une éolienne à pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique; d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable [01].

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

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

Dans ce chapitre, on présentera une définition de l'énergie éolienne de manière générale, on s'intéressera essentiellement aux différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'à l'étude de l'énergie cinétique du vent et la modélisation de la turbine éolienne.

1.2 Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par une génératrice (Fig.1) [02].



Figure 1.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [02].

Le Système de Conversion Eolien est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique. Selon la Fig.2 [02].

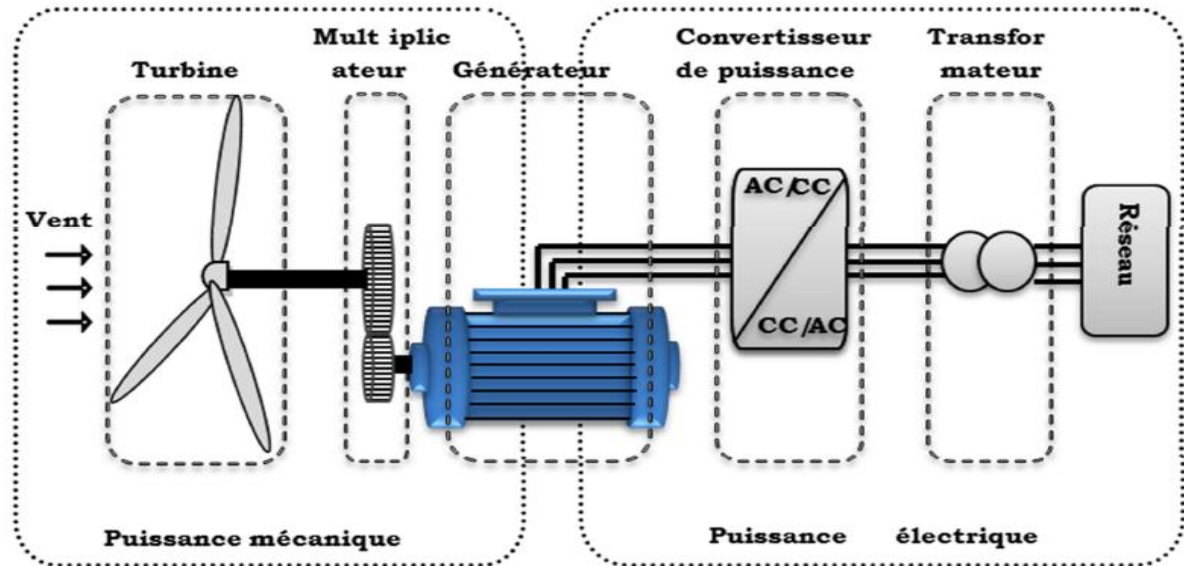


Figure 1.2: Principaux organes du système de conversion éolien [02].

1.3. Historique de l'énergie éolienne

Cinq familles d'énergie renouvelable, fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées, ces énergies n'engendrent pas de déchets ou d'émissions polluantes, elles participent à la lutte contre l'effet de serre, les rejets de CO₂ dans l'atmosphère. Parmi les diverses sources d'énergie renouvelables c'est sans doute le vent qui présente l'irrégularité et l'ampleur des variations les plus marqués.

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement autour de la Terre. La racine étymologique de terme « éolien » provient du nom du personnage mythologique Eole connu en Grèce antique comme le maître des vents. L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie calorifique du soleil, Les rayons solaires absorbés dans l'atmosphère entraînent des différences de température et de pression. De ce fait, les masses d'air se mettent en mouvement et accumulation de l'énergie cinétique. L'intérêt actuel pour l'énergie éolienne provient du besoin d'élaborer des systèmes d'énergie propres durables auxquels on peut se fier à long terme. L'aérodynamique et l'ingénierie moderne ont permis d'améliorer les éoliennes. Maintenant, elles offrent une énergie fiable, rentable, non polluante pour application des particuliers, des communautés et pour les applications nationales [03]. En 1888, Charles F. Brush

construisit une petite éolienne pour alimenter sa maison en électricité, avec un stockage par batterie d'accumulateurs, il créa la première éolienne [04].

Alors que la présence des énergies éoliennes est pleinement justifiée parmi ces nouvelles énergies, ce sont les énergies de l'avenir. Aujourd'hui, elles sont sous-exploitées par rapport à leur potentiel, La rentabilité d'une machine éolienne dépendra beaucoup du site sur lequel elle est installée et sera liée aussi à son utilisation.

Les sites les plus intéressants sont situés au bord de la mer ou aux sommets de collines et de montagnes bien dégagées. Cette énergie est soit utilisée directement comme dans les éoliennes de pompage ou les anciens moulins à vent, soit elle est transformée en électricité via une génératrice. Dans ce cas là, on parle d'aérogénérateurs. Les aérogénérateurs captent à travers leurs pales l'énergie cinétique du vent et entraînent elles mêmes un générateur qui produit de l'électricité d'origine renouvelable, ça fait longtemps l'éolien, c'était une sorte de bricolage, aujourd'hui, c'est de la science.

1.3.1 l'historique de l'énergie éolienne en Algérie

Les pas de l'Algérie dans le domaine des énergies éoliennes restent toujours réservés ou encore très lents comparant par le développement rapide connue dans le monde. Cependant, l'Algérie dispose de tous les nécessaires pour le développement des énergies éoliennes, elle présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique. En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique en 1957, avec une installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger) ; conçu par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre. Ce bipale de type pneumatique à pas variable, de 30 m de hauteur et d'un diamètre de 25 m racheté par Electricité et Gaz d'Algérie puis démonté et installé en Algérie [04].

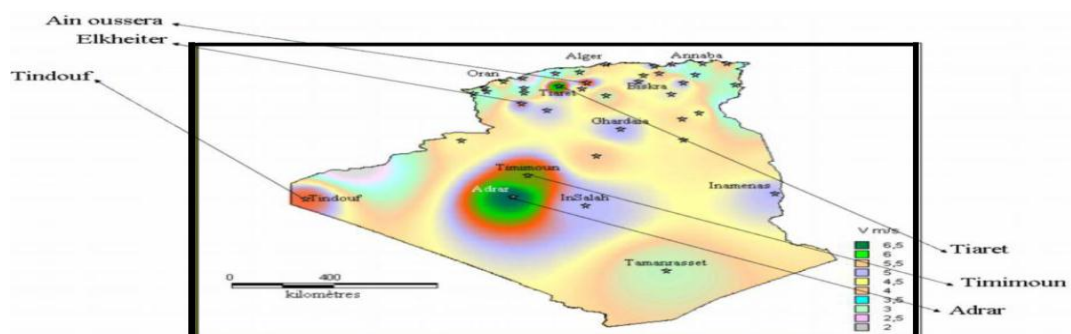


Figure 1.3 : Les régions ventées en Algérie [04].

1.3.2 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

1.3.2.1 Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, Inépuisable et gratuite.
- L'énergie éolienne est une énergie propre, n'émet pas de gaz à effet de serre.
- L'énergie éolienne est la moins chère à produire.
- L'énergie éolienne est plus sécurisée et ne produit pas des déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire qui présente beaucoup de risques.
- La demande et la consommation de l'électricité est plus élevée en hiver ce qui correspond à la grande productivité (vent plus forts).
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle [04].

1.3.2.2 Inconvénients

- L'impact visuel, ça reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur et le bruit aérodynamique de la vitesse de rotation du rotor.
- Les aérogénérateurs produisent une puissance électrique n'est pas constante pour cela, la qualité de cette puissance n'est pas toujours bonne.
- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources classiques surtout sur les sites moins ventés [05].

1.4 Types des turbines éoliennes

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

1.4.1 Eolienne à axe vertical (VAWT) :

Les aérogénérateurs à axe vertical ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique, mais rares sont ceux qui ont atteint le stade de l'industrialisation. Ils sont classés selon leur caractéristique aérodynamique en deux familles : les aérogénérateurs base de la portance (Aérogénérateurs à rotor de Darrieus) et ceux basés sur la traînée (Aérogénérateurs à rotor de Savonius en 1924) [06].



Figure 1.4 : technologie éolienne à axe vertical.

a- Les avantages :

- Démarre à de faibles vitesses
- Intégrable au bâtiment, esthétique.
- Pas de contraintes sur la direction de vent.
- Permet de placer la génératrice, le multiplicateur, etc. à terre (il n'y pas besoin de munir la machine d'une tour).
- Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent.

b- Les inconvénients :

- Les vents sont plus faibles à proximité de la surface du sol ;
- L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical n'est pas satisfaisante.
- Faible rendement.
- L'éolienne ne démarre pas automatiquement.

1.4.2 Eolienne à axe horizontal (HAWT) :

Les éoliennes à axe horizontal (figure.5) beaucoup plus largement employées, elle est constituée d'une hélice perpendiculaire à la vitesse de vent monter sur une tour ; même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrant de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol [1].

Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales (Les plus courantes) et les multi- pales.

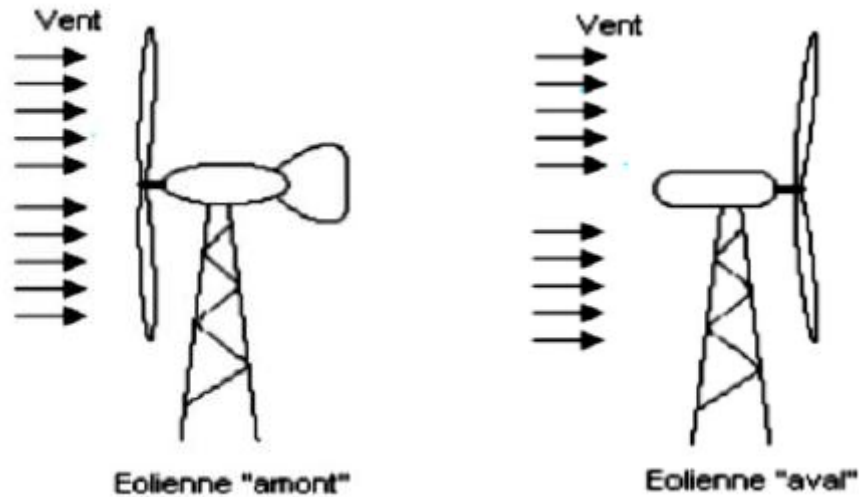


Figure 1.5 : Eolienne à axe horizontal.

Nombre de pales compris entre 1 et 3 profilées aérodynamiques présentées dans la figure (I.6), elles peuvent développer des puissances élevées (plusieurs mégawatts). Leur axe de transmission est parallèle au sol [10]. On peut faire une distinction entre les éoliennes suivant le nombre de pales figure I.6

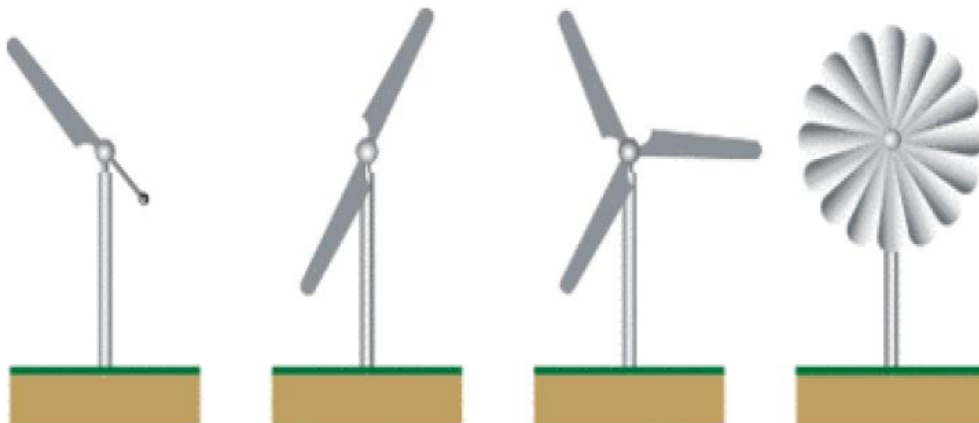


Figure 1.6: Distinction entre éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pales.

a. Avantages

- Coût limité,
- Peu de contraintes mécaniques,
- Grande efficacité.
- 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.

b. Inconvénients :

- Bruit conséquent,
- Vibrations non négligeables,
- Grande sensibilité au flux éolien et sa variation
- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

1.5 Constitution d'une éolienne a axe horizontal

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux (figure 1.7).

- le mât
- la nacelle
- le rotor

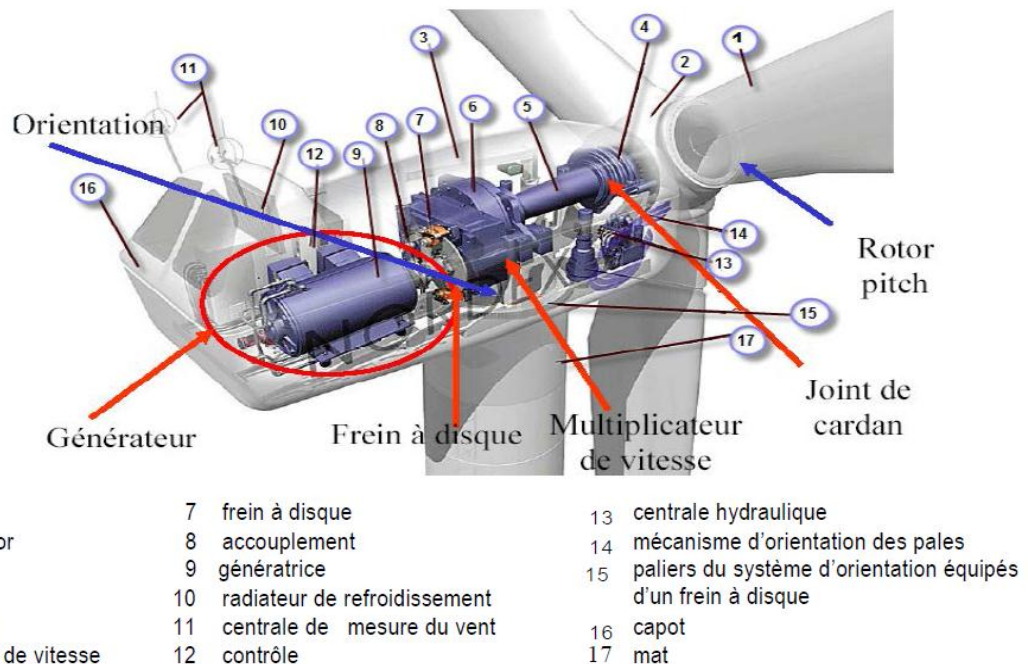


Figure 1.7: composants d'une éolienne [03].

a- Le mât

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique. Il doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol [1]. Son rôle est d'une part supporter

l'ensemble rotor, nacelle pour éviter que les pale ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor a une hauteur suffisante.[07]

b- La nacelle

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

Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent).

A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne [06].

c- Le rotor

C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor, formé par les pales assemblées dans leur moyeu.

Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit [03].

1.6 Fonctionnement d'une éolienne

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

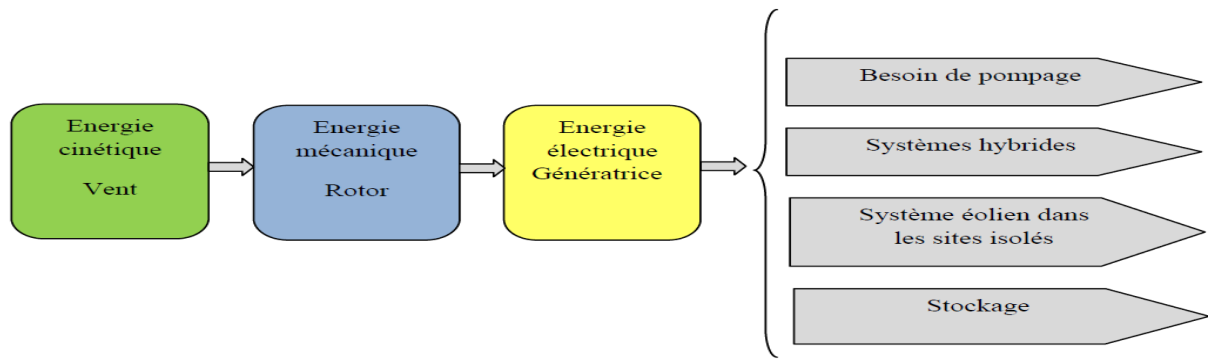


Figure 1.8: Le principe de base et l'application d'un système éoliens à axe horizontal.

1.7 Le système d'orientation des pales

Le système d'orientation des pales sert essentiellement à limiter la puissance générée. Avec un tel système les pales sont tournées par un dispositif de commande appelé (Pitch control). En réglant l'angle d'orientation des pales, on modifie les performances de la turbine et plus précisément le coefficient de puissance, voir la figure 2.12. Les pales sont face au vent en basse vitesse et pour les fortes vitesses elles s'inclinent pour dégrader le coefficient de puissance [08].

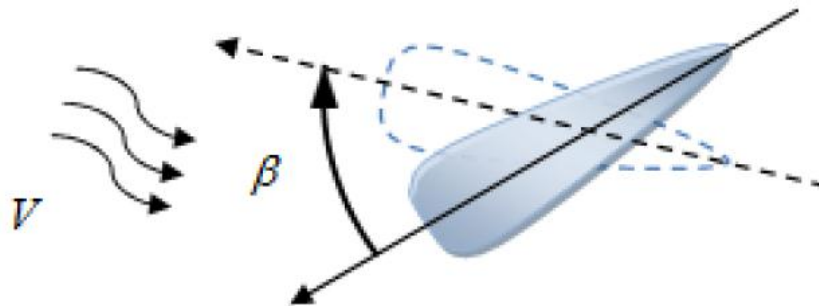


Figure 1.9. Orientation des pales.

1.7.1: Le pitch control

Le contrôle par variation de l'angle de calage des pales « pitch angle » est souvent utilisé pour les éoliennes à vitesse variable. Elle opère de deux manières différentes :

- Une première partie où l'angle de calage des pales est fixé, la vitesse du rotor est variable.
- Une fois arrivé à la vitesse nominale du générateur, le couple mécanique est contrôlé par la variation de l'angle des pales. Il est maintenu constant et l'éolienne produit sa puissance nominale.

Il existe plusieurs types de système de régulation de l'angle de calage des pales. Le pas peut être variable tout au long de la pale, ou simplement sur le bout des pales. L'angle de calage est

commandé soit par un système hydraulique « éolienne de petite puissance » ou des moteurs électriques qui nécessitent une source d'énergie externe « éolienne de grande puissance ».

Le transfert de cette énergie externe jusqu'aux pales en rotation augmente considérablement le coût de la fabrication [05].

1.7.2 Le Stall Control

C'est un régulateur par décrochage aérodynamique, autrement dit le comportement géométrique des pales peut évoluer selon le rapport entre les deux vitesses du vent et de la turbine, ce qui permet le décrochage à partir d'une certaine vitesse du vent. Ce décrochage dépend notamment de l'angle de calage des pales qui peuvent être fabriquées avec un pas variable suivant la position le long de la pale et possèdent aussi un mécanisme de freinage en bout.

Afin d'améliorer le degré de captage d'énergie par le Stall Control, on peut combiner ce dispositif à une machine à deux vitesses de rotation, ce qui permet d'étendre la plage de production et la rendre comparable avec celle obtenue dans le cas du Pitch Control.

Note :

Certains aérogénérateurs utilisent un système hybride nommé le Stall Actif qui combine les avantages des deux systèmes où le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à une orientation minimale des pales nécessitant des moyens de réglage plus économiques et plus robustes que dans le cas du système de Pitch Control. Cette technique du "Stall Control" a aussi quelques avantages :

- Pas de système de contrôle d'angle de calage.
- Construction plus simple et moins couteuse du rotor.
- Maintenance plus aisée et fiabilité meilleure.

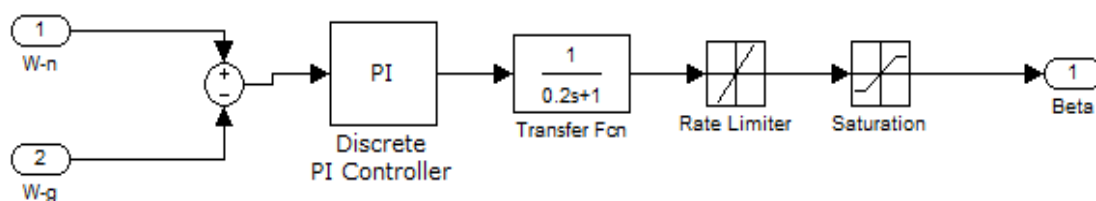


Figure 1.10 : Boucle de régulation de l'angle de calage des pales. [05]

1.8 Types des machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques. On décrit dans cette étude, les principales caractéristiques technologiques et concepts liés aux aérogénérateurs. Les deux types de machines électriques les plus utilisées dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et asynchrones.

1.8.1 Générateur synchrone

C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grandes puissances (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones de 500 kW à 2 MW utilisés dans le domaine éolien, sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille [05].

De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau (figure I.11), sa vitesse de rotation fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite.

C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés du réseau ; elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance (figure I.12).

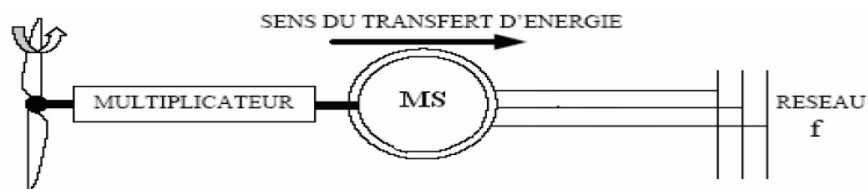


Figure 1.11 : Machine synchrone connectée directement au réseau de puissance. [01]

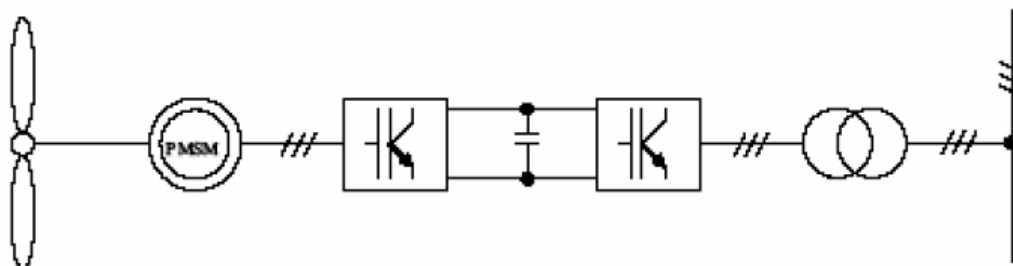


Figure 1.12 : Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. [01]

1.8.2 Générateur asynchrone

La connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. Ceci explique pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction.

Il existe deux catégories de machine asynchrone: les machines asynchrones à cage d'écureuil et les machines asynchrones à rotor bobiné [08].

1.8.2.a Machine asynchrone à cage d'écureuil

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. Ainsi pour les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Or il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct [08].

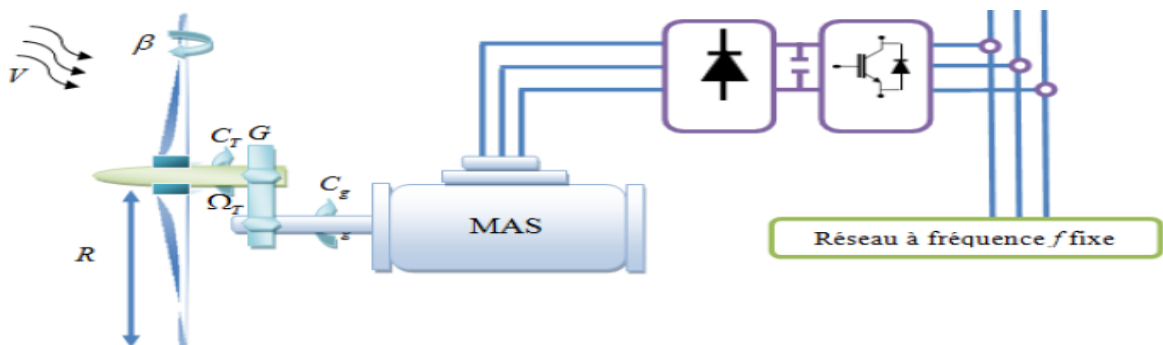


Figure 1.13 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable [05]

1.8.2.b Machine asynchrone à double alimentation

Avec les générateurs synchrones, c'est actuellement l'une des deux solutions concurrentes en éolien à vitesse variable. Le stator de la génératrice est directement couplé au réseau, le plus souvent par un transformateur.

À la place du rotor à cage d'écureuil ces machines ont un rotor bobiné dont le réglage électrique assure la variation du glissement [05].

1.9 Utilisation des systèmes éoliens

La technologie des systèmes éoliens, très fiable et très souple, a, depuis des siècles, de multiples usages :

- **Le pompage de l'eau:** Depuis des générations, on utilise le vent comme source d'énergie fiable et économique dans les systèmes de pompage de l'eau. Dans les régions rurales ou éloignées, l'installation d'un système de pompage éolien mécanique ou électrique peut constituer le meilleur moyen d'assurer les besoins en eau du bétail, du ménage ou même de la communauté.
- **Récréation:** Utiliser le vent pour assurer les besoins énergétiques d'un chalet ou d'un bateau peut être plus efficace et plus économique que d'utiliser des générateurs à carburant fossile. Un système éolien écologique peut fournir l'électricité nécessaire à l'éclairage, de même qu'au fonctionnement de la radio et des petits appareils ménagers.
- **Fermes et ranchs:** Les fermiers utilisent le vent pendant des siècles pour pomper eau. Les systèmes éoliens peuvent, de nos jours, rendre encore plus de services dans une exploitation agricole moderne. Comme ils représentent la solution idéale lorsqu'on a besoin d'électricité à basse tension dans des endroits éloignés, les générateurs fonctionnant à l'énergie éolienne sont utilisés, dans les fermes, pour alimenter en électricité les clôtures électriques et les systèmes d'éclairage extérieur.
- **Usage domestique:** Les habitants de la campagne, désireux de réduire l'effet indésirable sur l'environnement de leur consommation d'énergie, peuvent restreindre leur dépendance par rapport au réseau d'électricité en utilisant un système éolien. Même un mini système éolien permet d'économiser de l'électricité produite à partir de carburants fossiles ou de l'énergie nucléaire.

1.10 Modélisation et simulation de la turbine éolienne :

Dans cette partie, nous allons présentons les modèles de dimensionnement associés à ce système, en particulier pour la génératrice et les convertisseurs. Nous établissons aussi un modèle de simulation de la turbine.

1.10.1 Reproduction de la vitesse du vent :

Le vent est l'énergie primaire des aérogénérateurs est transforme par la turbine en énergie mécanique puis en énergie électrique par le générateur, c'est donc une variable importante a modéliser par ce que la précision des simulations dépendra de la qualité de son modèle.

- Pour générer une série temporelle de vitesse du vent à partir d'un bruit en entrée, donc il faut être décomposée la vitesse de vent en deux composantes :
Une composante turbulente du vent $V_T(t)$ qui est un processus aléatoire stationnaire (ne varie pas avec la vitesse moyenne du vent).
- Une composante lente V_0 ; c'est la moyenne de la vitesse du vent variant régulièrement sur de plus longues périodes dans un site donné :

$$V(t) = V_0 + V_T(t) \quad (1.1)$$

L'aéroturbine filtre les fluctuations hautes fréquences. On reconstitue à cet effet un filtre passe bas à la composante de turbulence afin que celle-ci reproduise une caractéristique plus proche de la réalité dont la fonction de transfert est donnée par:

$$G_f = \frac{1}{1 + \tau \cdot s} \quad (1.2)$$

La valeur de la constante de temps dépend du diamètre du rotor et également de l'intensité de turbulence du vent et de la vitesse du vent moyenne ($\tau = 2s$).

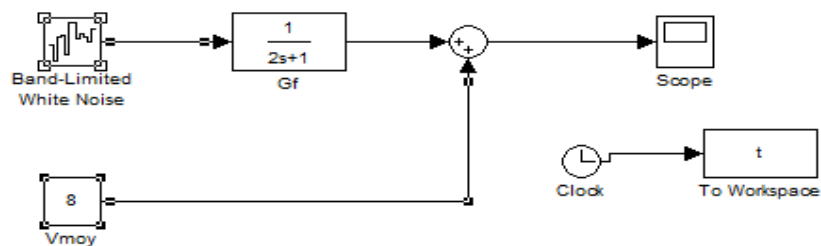


Figure 1.14 : Schéma block de reconstruction de la vitesse du vent.

La figure suivante représente une séquence de vent générée par le modèle Simulink de figure 1.14.

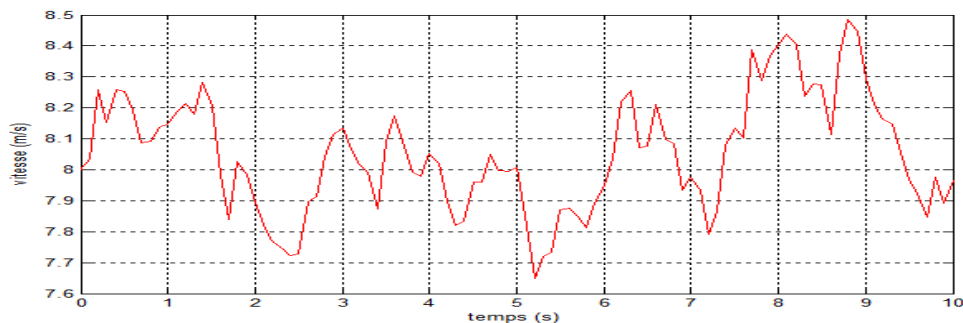


Figure 1.15 : séquence de vent.

1.10.2 La théorie de Betz :

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal [22,23,24] a été établie par Albert Betz, qui suppose que le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse V_1 et à l'infini en aval d'une vitesse V_2 . La production d'énergie ne pouvant se faire que par la conversion de l'énergie cinétique du vent, la vitesse V_2 est nécessairement inférieure à V_1 . Il en résulte que la veine de fluides traverse le générateur éolien en s'élargissant. Soit V' la vitesse au travers de S , la section balayée par les pales de l'éolienne (comme présenté à la figure (1.3)) et M la masse d'air qui traverse l'éolienne, la variation de l'énergie cinétique ΔE_c est :

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \cdot M \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (1.3)$$

La puissance aérodynamique de l'éolienne P_{aer} s'écrit alors :

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V'^3 \quad (1.4)$$

avec, ρ la densité volumique de l'air.

Par ailleurs, la force de l'air (F) sur l'éolienne est donnée par:

$$F = \rho \cdot S \cdot V' \cdot (V_1 - V_2) \quad (1.5)$$

$$P_{aer} = F \cdot V' = \rho \cdot S \cdot V'^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (1.6)$$

d'où :

En identifiant les équations (1.4) et (1.6), il vient :

$$V' = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (1.7)$$

et donc :

$$P_{aer} = \frac{1}{4} \rho \cdot S \cdot (V_1^2 - V_2^2) \cdot (V_1 + V_2) \quad (1.8)$$

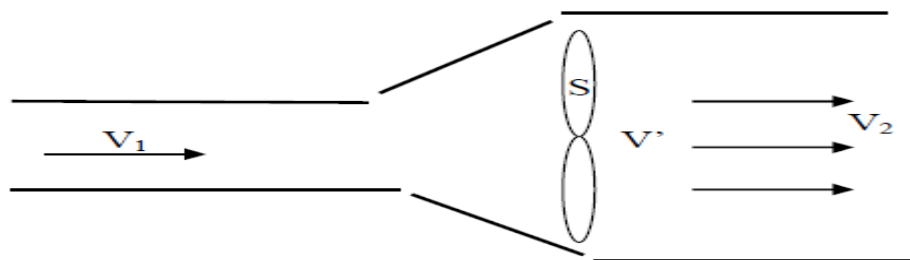


Figure 1.16 : Théorie de Betz : Schéma de principe.

1.10.3 Modélisation de la turbine :

Cette dispositif est constitue d'une éolienne comparant des pales de longueur R et un multiplicateur (gain G) adapte la vitesse de la turbine éolienne a celle du générateur électrique et un arbre relis la turbine avec le générateur (figure 1.17).

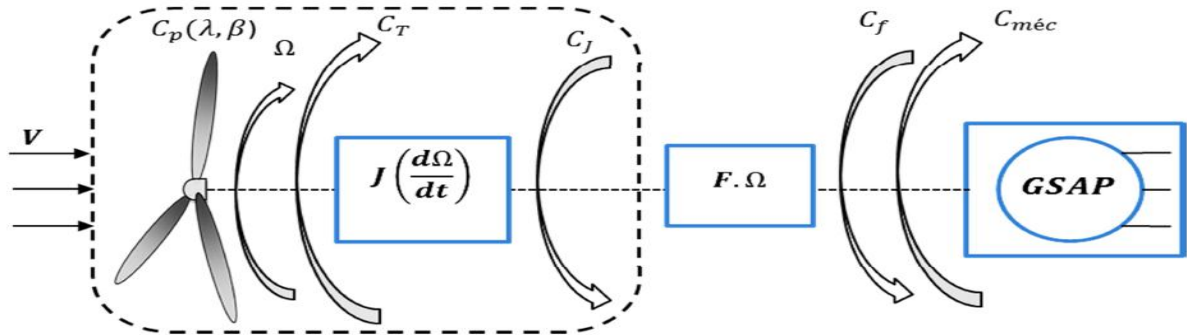


Figure.1.17 : Schéma de la turbine éolienne [02]

La puissance du vent ou puissance éolienne (loi de betz) donne par l'équation suivante.

$$P_v = \frac{\rho \cdot s \cdot v^3}{2} \quad \text{avec } S = \pi \cdot R^2 \quad (1.9)$$

Où:

ρ : La densité de l'air égale 1.22 kg/m^3 dans les conditions normales de température et de pression.

s : La surface circulaire par la turbine, le rayon est déterminé par la longueur de pale R.

v : La vitesse du vent.

La puissance aérodynamique au niveau du rotor de la turbine est :

$$P_{aer} = C_p \cdot P_v = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot s \cdot v^3}{2} \quad (1.10)$$

C_p : Le coefficient de puissance représente le rendement aérodynamique de la turbine. Il dépend de la caractéristique de la turbine. figure. **1.18** représente la variation de ce coefficient en fonction du rapport de vitesse λ et de l'angle de l'orientation de la pale β

Le rapport de vitesse est :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{v} \quad (1.11)$$

Le couple mécanique a la sortie de la turbine (couple aérodynamique) est déterminé par :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega t} = C_p \cdot \frac{P \cdot S v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (1.12)$$

L'expression du coefficient de puissance C_p est spécifique à chaque éolienne et dépend des caractéristiques intrinsèques de celle-ci. Si on suppose que l'angle de calage β ($\beta=2$) est fixe, l'expression du C_p en fonction de λ seulement peut être donnée comme suit [18] :

$$C_p = 7,9563 \cdot 10^{-5} \cdot \lambda^5 - 17,375 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda^4 + 9,86 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda^3 - 9,4 \cdot 10^{-3} \lambda^2 + 6,38 \cdot 10^{-2} \cdot \lambda + 0,001 \quad (1.13)$$

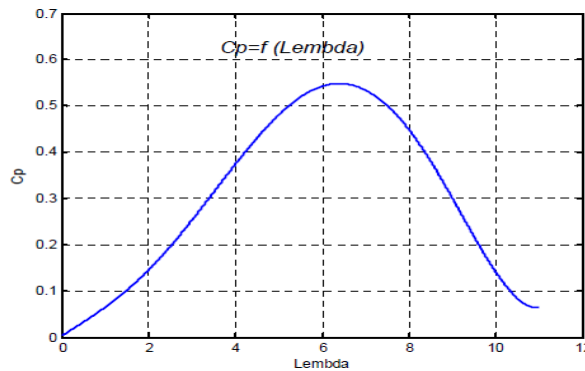


Figure 1.18 Evolution du C_p en fonction de Lambda ' λ '.

De la figure (1.18), on peut déduire que le $C_{p_{max}}=0.54$ et $\lambda C_{p_{max}}=6.41$. Le modèle de notre turbine à axe horizontal sur la plateforme Simulink du logiciel Matlab avec les données suivantes : « $R= 1m$; $\rho=1.22 \text{ kg/m}^3$ ».

Avec :

β : angle de calage.

R : longueur de pale.

$\Omega_{turbine}$: vitesse mécanique de la turbine en rad/s.

1.10.4 Modèle du multiplicateur :

Cette multiplicateur adapte la vitesse (lente) de turbine a la vitesse de génératrice (fig.2.12). Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain .Le frottement du multiplicateur sont négligés et les pertes sont considérées nulles. Donc le couple mécanique sur l'arbre du générateur :

$$C_{mec} = \frac{1}{G} \cdot C_t \quad (1.14)$$

G : rapport de multiplication.

C_{mec} : couple mécanique adaptant la vitesse de turbine a celle du générateur ainsi :

$$\Omega_g = G \cdot \Omega_t \quad (1.15)$$

1.10.5 Modèle de l'arbre :

Les masse de la parties tournantes (turbine+génératrice) sous la forme d'une inertie J . donc l'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique des cette ensemble (turbine+génératrice) est donnée par :

$$J_t \frac{d\Omega_g}{dt} = C_t - f_r \cdot \Omega_g \quad (1.16)$$

Ou :

J_t : Inertie de parties tournantes (turbine+génératrice) (N.m).

C_t : Couple totale de l'éolienne (N.m).

$$\text{Avec : } C_t = C_{em} + C_{mec} \quad (1.17)$$

C_{em} : couple électromagnétique de la génératrice (N.m) Pour un fonctionnement génératrice C_{em} à un sine négatif.

1.10.6 : le résultat de Simulation de la turbine :

❖ **Test 01** : vitesse du vent constant.

Nous avons appliqué à l'entrée de la turbine une vitesse constant, $V=8$ m/s.

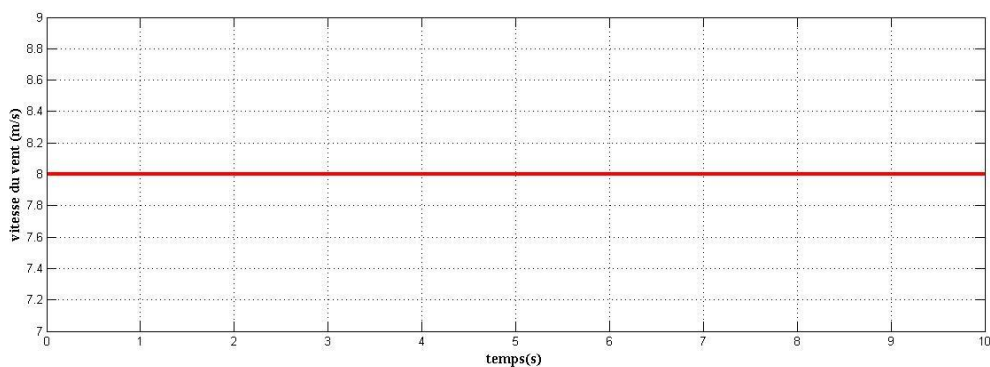


Figure 1.19 : vitesse fixe du vent (m/s).

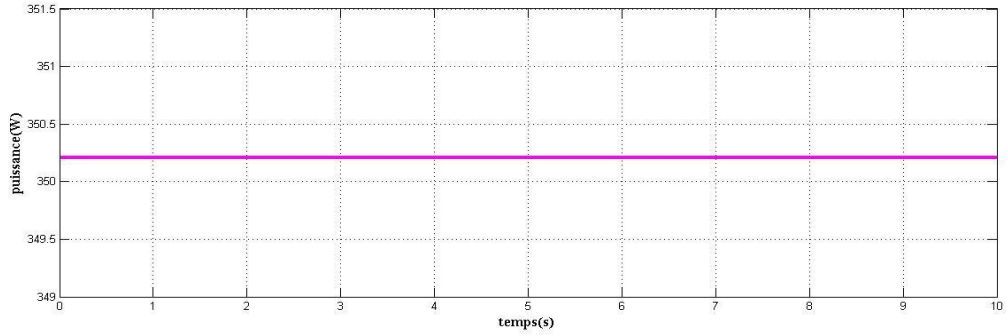


Figure 1.20 : puissance (W) avec vitesse fixe .

❖ Test 02 : avec vitesse variable.

On a appliqué un profil du vent aléatoire plus proche de l'évolution du vent réel qui on a filtré pour l'adapter à la dynamique du système étudié.

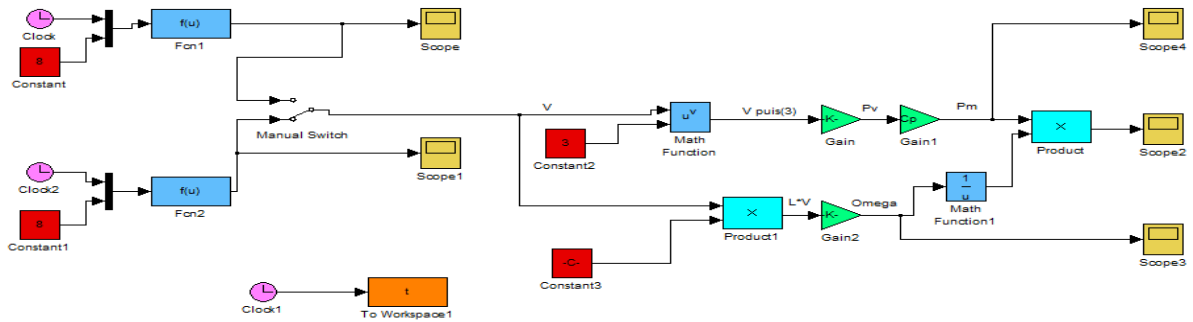


Figure 1.21 Schéma bloc d'une turbine éolienne à vitesse variable.

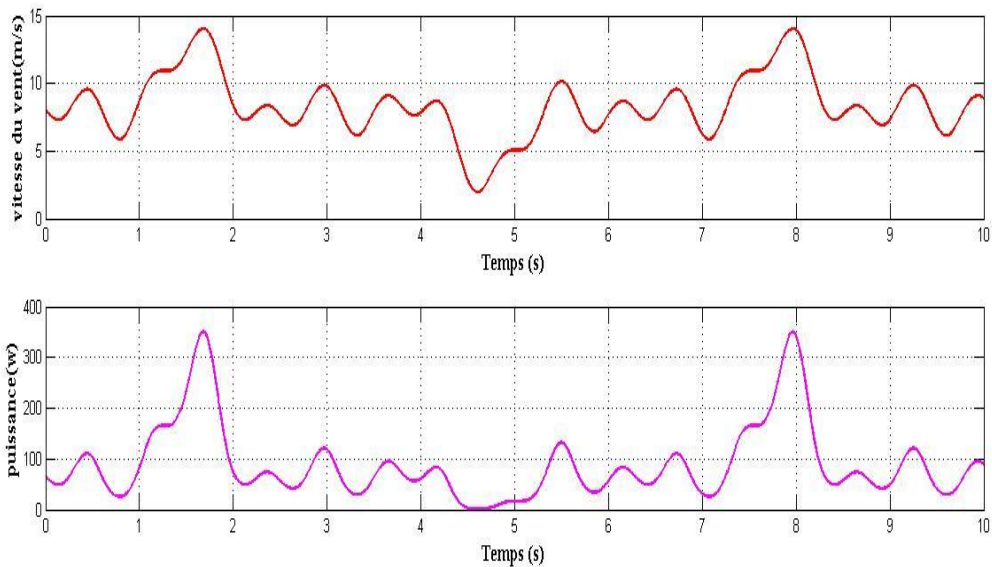


Figure 1.22 : vitesse variable (lent) de vent et puissance.

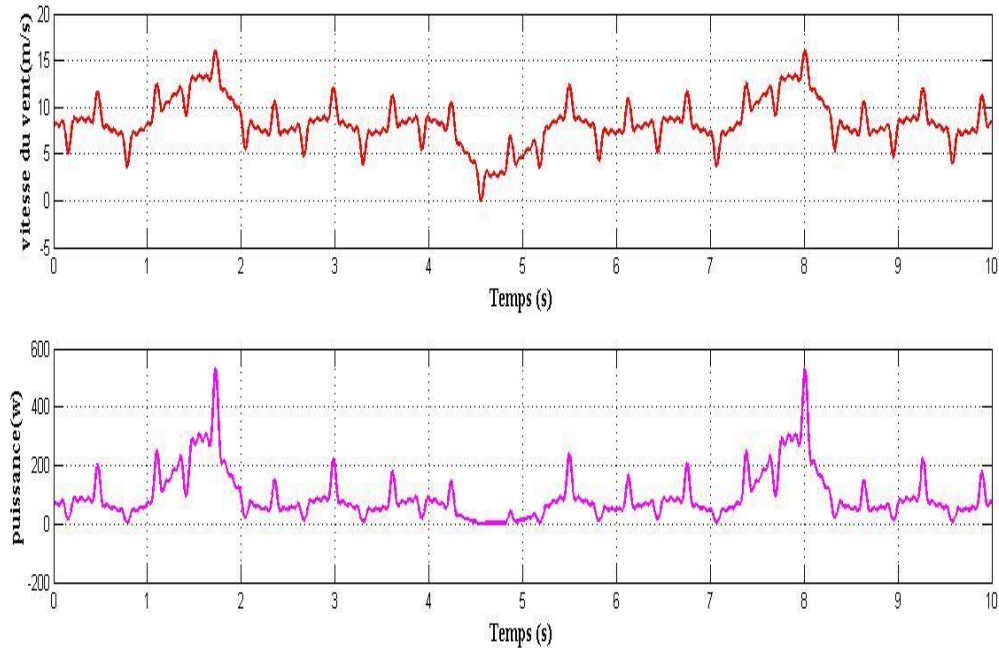


Figure 1.23: vitesse variable (rapide) de vent et puissance.

Comme interprétation on remarque que la puissance de la turbine varie de la même façon que la vitesse du vent que sa soit fixe ou variable.

1.11 : Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté l'étude, la modélisation puis la simulation du système éolien (partie mécanique), basé sur la turbine à axe horizontal

Ce chapitre représente un état de l'art des systèmes éoliens, la théorie des aérogénérateurs et leur principe de fonctionnement ainsi que les différents types. Les machines électrique adaptables a un système éolien ont été présentées, on remarque deux grandes familles des machines : machine synchrone et machine asynchrone.

Dans la seconde partie une modélisation puis une simulation des différents composants mécanique de la chaîne de conversion éolienne à été établie et cela à partir des modèles mathématiques existant dans la littérature.

Dans le chapitre suivant, nous allons étudier le fonctionnement d'une génératrice synchrone à aimants permanents et sa simulation.

CHAPITRE 2:

ETAT DE L'ART SUR LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS

2.1 Introduction :

L'évolution des aimants permanents modernes, qu'ils soient à base d'alliages métalliques ou à terres rares leur a permis d'être utilisés comme inducteurs dans les machines synchrones offrant ainsi beaucoup d'avantages: induction de saturation élevée, faible désaimantation, densité massique élevée, énergie maximale stockée plus grande par rapport aux autres types de machines [1].

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

Dans ce chapitre, nous décrirons d'abord les différentes structures des machines synchrones. Nous établirons ensuite les équations générales de la machine synchrone à aimants permanents à stator lisse dans des repères liés soit au stator, soit au rotor. Ces équations se simplifient pour les machines synchrones classiques à répartition sinusoïdale des conducteurs statoriques, comme pour celles à répartition non sinusoïdale à rotor lisse. Enfin, nous terminerons ce chapitre par la modélisation et simulation de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP).

2.2 Présentation de la machine synchrone à aimants permanents

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant du stator. La machine synchrone est constituée de deux parties [09] :

a- Le stator : est se compose d'un bobinage distribue triphasé, tel que les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales ou trapézoïdales. Ce bobinage est représenté par les trois axes (a,b,c) déphasés, l'un par rapport a l'autre, de 120° électriques.

b- Le rotor : se compose d'aimants permanents. Les aimants permanents présentent l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques, ainsi que la nécessite d'une source pour fournir le

courant d'excitation. Cependant, on ne peut pas contrôler l'amplitude du flux rotorique. Il existe de nombreuses façons de disposer les aimants au rotor :

– **Aimants en surface**

Les aimants sont montés sur la surface du rotor en utilisant des matériaux adhésifs à haute résistance. Ils offrent un entrefer homogène, le moteur est le plus souvent à pôles lisses. Ses inductances ne dépendent pas de la position du rotor (Figure 2.1-a).

– **Aimants insérés**

Les aimants du type insérés aussi sont montés sur la surface du rotor. Cependant, les espaces entre les aimants sont remplis du fer. L'alternance entre le fer et les aimants provoque l'effet de saillance. (Figure 2.1-b)

– **Aimants en terres**

Les aimants sont intégrés dans la masse rotorique. Le moteur sera à pôles saillants (Figure 2.1-c)

– **Aimants à concentration de flux (Flux concentrating type)**

Les aimants sont profondément placés dans la masse rotorique. Les aimants et leurs axes se trouvent dans le sens circonférentiel. le flux sur un arc polaire du rotor est contribué par deux aimants séparés. (Figure 2.1-d).

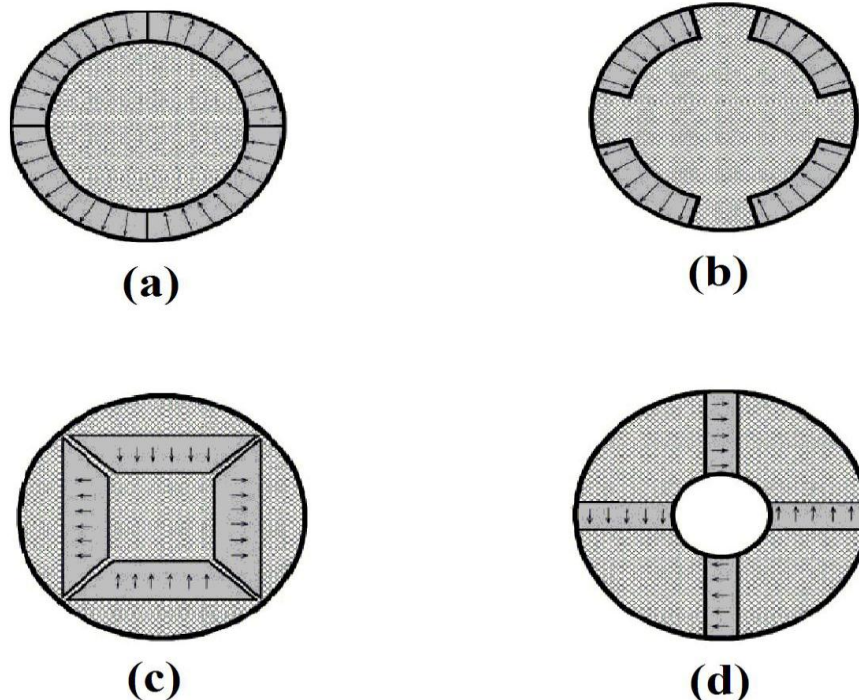


Figure 2.1: Différentes dispositions d'aimants permanents dans un rotor. (a) Aimants en surface (b) Aimants insérés (c) Aimants en terres (d) Aimants à concentration de flux [09].

2.3 Principe de fonctionnement de la MSAP

Le principe des moteurs à aimants permanents est assez simple. Seules les bobines sont alimentées. Le champs créé par les enroulements du stator interagit avec les aimants du rotor et oriente ce dernier. On définit un “pas” élémentaire θ_p comme étant le déplacement angulaire du rotor lorsque l'alimentation est commutée d'une phase à la suivante. Nous obtenons pour cette structure $\theta_p = 90$. Ceci correspond au passage de la figure 2.2.a à la figure 2.2.c. Les demi-pas sont obtenus en alimentant deux phases à la fois (figure 2.2.b). De nombreux moteurs sur le marché utilisent ce genre de structure [10].

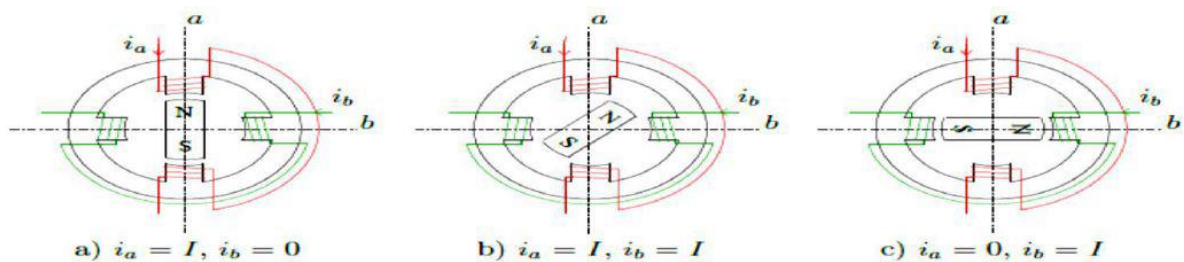


Figure 2.2: Principe de fonctionnement du moteur à aimants permanents[10].

2.4 Différents types de la machine synchrones à aimants permanents :

2.4.1 Machines à flux radial :

La machine synchrones à flux radial est la première machine à aimants permanents apparue dans l'industrie. Grace aux progrès de l'électronique de puissance et de la performance des aimants permanents, elle commence à supplanter la machine asynchrone.

La première machine synchrones à flux radial à avoir été développée est une machine dont le bobinage est reparti et les aimants placés en surface (Figure 2.3). Dans la littérature, ces études ont permis de mettre en avant l'augmentation significative du rendement et de la puissance massique par rapport aux machines asynchrones. L'inconvénient majeur de cette machine est l'emplacement des aimants. En effet, en les mettant en surface, les applications à haute vitesse sont difficiles [13].

C'est pourquoi, pour diminuer le risque de décollement des aimants, le rotor de la machine peut être placé à l'extérieur du stator (Figure 2.4). Ainsi, les aimants en surface sont placés sur le rotor grâce à l'effet de la force centrifuge.

Le rotor à l'extérieur permet d'incorporer le système électrique dans le système mécanique. Il permet également de fixer des pales directement sur le rotor pour des applications à la ventilation [13].

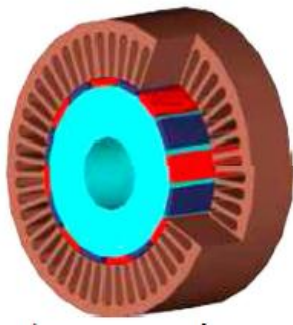


Figure2.3:Machine synchrone à aimants avec rotor intérieur[13].

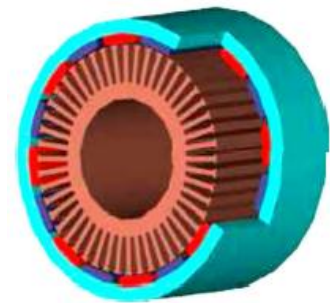


Figure2.4 :Machine synchrone à aimants avec rotor extérieur[13].

2.4.2 Machines à flux axial :

2.4.2.1 Machines à flux axial à un stator et un rotor

La première machine à flux axial apparue est une structure comprenant un rotor et un stator. Le fonctionnement de ce type de machine est basique car il ne fait intervenir qu'un stator et un rotor.

Le flux crée par un bobinage reparti classique présent au stator va interagir avec le flux crée par les aimants permanents collés en surface du rotor pour créer une énergie électromagnétique et donc un couple électromagnétique (Figure 2.5) [13].

- 1- Stator
- 2- Bobinage
- 3- Rotor
- 4- Aimants
- 5- Bâti
- 6- Roulements
- 7- Axe de rotation

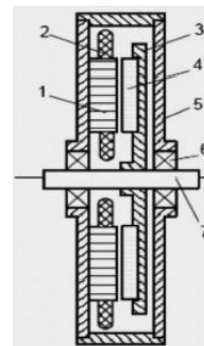


Figure 2.5 : Descriptif de la machine à flux axial 1 stator / 1 rotor [13].

2.4.2.2 Machines à flux axial à stator interne ou externe

Pour remédier à ce problème d'attraction axiale, les concepteurs se sont penchés sur des machines équipées de 2 entrefers communément appelées à stator interne ou stator externe (Figure 2.6 et Figure 2.7). Contrairement aux machines a flux radial, la machine à flux axial est bien adaptée à ce genre de concept. La présence de 2 rotors ou de 2 stators permet de rééquilibrer les forces d'attractions entre les pièces actives de la machine et ainsi diminuer le risque d'attraction entre le stator et le rotor [13].

- 1-Stator
- 2- Bobinage
- 3- Rotor
- 4- Aimants
- 5- Bâti
- 6- Roulements
- 7- Axe de rotation

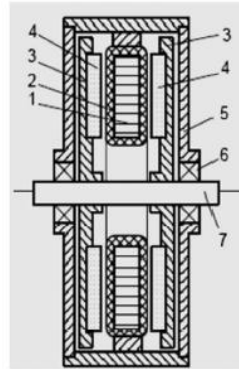


Figure 2.6: Descriptif de la machine à flux axial stator externe [13].

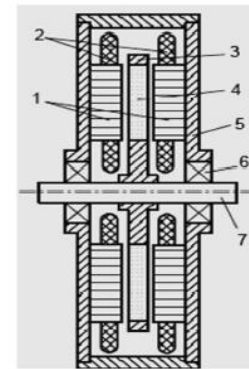


Figure 2.7: Descriptif de la machine à flux axial stator interne [13].

2.4.2.3 Machines à flux axial à stator multiples ou multi disques

En effet, pour augmenter la puissance ou le couple d'une machine il suffit d'ajouter sur le même axe de rotation un nouveau stator et rotor. Ces machines s'appellent des machines multi niveaux (Figure 2.8). Le principe global de fonctionnement reste identique aux machines discoïdes à simple ou double entrefers. La plupart du temps les machines à flux axial multi disques sont à stator interne.

Il est donc possible de réduire au minimum la culasse du stator .Les principaux inconvénients sont la difficulté pour bien aligner sur le même axe les différents étages de la machine et la nécessité d'ajouter des renforts mécaniques contre l'attraction magnétique stator / rotor. Le bruit en est une conséquence majeure [13].

- 1 - bobinage
- 2 - rotor
- 3 - bâti
- 4 - enroulement
- 5 - axe de Rotation

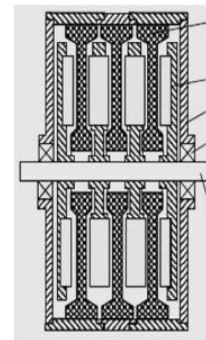


Figure 2.8 : Descriptif de la machine à flux axial multi Niveaux [13].

2.5 Modélisation et simulation de la machine synchrone à aimants permanent

Pour effectuer l'analyse d'un système ,il est nécessaire de connaitre les relations entre ses grandeurs d'entrés et de sorties , l'ensemble de ses relations constitue son modèle mathématique

l'actionneur qui fera l'objet de cette étude est une machine synchrone à aimants permanent à distribution sinusoïdale, à pôle lisses, l'inducteur et animé d'une vitesse de rotation ω [14].

2.5.1 Hypothèse simplification :

Les hypothèses simplificatrices usuelles adoptées dans la modélisation de la machine, données dans la majorité des références, sont [11] :

- résistance des enroulements invariables avec la température,
- effet de peau négligeable,
- absence de la saturation dans le circuit magnétique,
- machine alimentée par un système de tensions triphasées sinusoïdales et équilibrées,
- parfaite symétrie de construction,
- répartition spatiale sinusoïdale, le long de l'entrefer, des forces magnétomotrices,
- entrefer d'épaisseur uniforme et effet d'encoche négligeable,
- pertes ferromagnétiques (par hystérésis et courant de Foucault) négligeables.

2.5.2 Modélisation :

a. Mise en équation de la GSAP en triphasé :

Le modèle de la MSAP qui sera développé dans notre travail est basé sur le schéma de la figure 2.9 suivante :

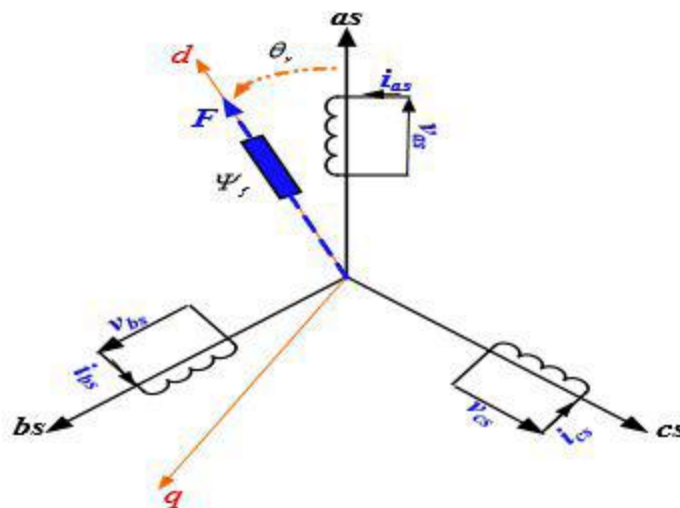


Figure 2.9 : Schéma représentatif de la MSAP.

-Equations électriques :

Les équations électriques des machines électriques sous forme matricielle :

$$[V] = [I] + \frac{d}{dt} [\Psi] \quad (2.1)$$

Pour stator :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = [R_s] \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\text{Avec } [R_s] = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix}$$

La machine étant triphasée équilibrée symétrique, la résistance dans la phase statorique :

$$R_a = R_b = R_c = R_s$$

$[V] = [V_a \ V_b \ V_c]^t =$ Vecteur tensions des phases statoriques.

$[I] = [I_a \ I_b \ I_c]^t =$ Vecteur courant des phases statoriques.

$[\Psi] = [\Psi_a \ \Psi_b \ \Psi_c]^t =$ Vecteur flux des phases statoriques.

-Equations magnétique :

$$[\Psi_{abc}] = [L_s][I_{abc}] + [M_{sf}][I_f] \quad (2.3)$$

La matrice $[L_s]$ est une matrice carrée d'ordre 3, elle contient des termes constants que nous regroupons dans et les termes variables dépendent de θ , que nous regroupons dans $[L_{s2}(\theta)]$ posons :

$$[L_s] = [L_{s0}] + [L_{s2}(\theta)] \quad (2.4)$$

Avec :

$$[L_{s0}] = \begin{bmatrix} L_{s0} & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & M_{s0} \end{bmatrix}$$

Et :

$$[L_{s2}(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos 2\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos 2\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(2\theta) \\ \cos 2\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(2\theta) & \cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

Avec :

$[M_{s0}]$: Inductance mutuelle entre deux phases statorique.

$[L_{s0}]$: Inductance propre d'une phase statorique.

θ : Caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator.

Et

$$[M_{sf}] = [M_{sf}]^t$$

ainsi :

$$[M_{sf}] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

$[M_{sf}]$: La matrice d'inductance qui correspond au couplage entre le rotor et le stator.

-Equations mécanique :

$$\Sigma C_i = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (2.5)$$

$$C_r - C_e - C_f = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (2.6)$$

Avec :

$$C_f = F\Omega \quad (2.7)$$

J : Et le moment d'inertie du moteur

F : C'est le coefficient de frottement visqueux

C_e : C'est le couple électromagnétique délivré par le moteur

C_r : C'est le couple résistant, ou de charge.

b. Transformation triphasé-déphasé :

Les équations obtenues dans le repère abc sont fortement non-linéaires et couplées. Elles sont en fonctions de la position du rotor ceci fait apparaitre des difficultés pour la résolution du système. Pour simplifier ce problème, la plupart des travaux dans la littérature font appel à l'utilisation de la transformation de PARK [14].

-Transformation de PARK :

Dans le repère classique il y a trois axes (a_s , b_s , c_s) orientés suivant les axes des trois enroulements statoriques de la machine. Habituellement, l'axe a_s est considéré comme référence pour les transformations ultérieures. Quant au rotor, on a toujours un seul axe (F correspondant à la direction de l'aimantation) pour la machine synchrones à aimants permanents θ donne la position du rotor par rapport au stator.

Les trois enroulements du stator peuvent être remplacés par deux enroulements fictifs à $\pi/2$ dans l'espace et alimentés par des courants à $\pi/2$ dans le temps. Les deux enroulements virtuels sont disposés sur les l'axes d et q , où dans le cas de la MSAP l'axe d est orienté suivant le rotor , pour passer du système triphasé, abc , au système biphasé, dq ,(réciproquement) il faut utiliser les transformations suivantes [11] :

$$[V_{abc}] = [P(\theta)][V_{dq0}] \tag{2.8}$$

$$[V_{dq0}] = [P(\theta)]^{-1}[V_{abc}] \tag{2.9}$$

$[V_{abc}]$ et $[V_{dq0}]$ sont les matrices de passage directe et inverse, qui sont données par:

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

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) & & \\ \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

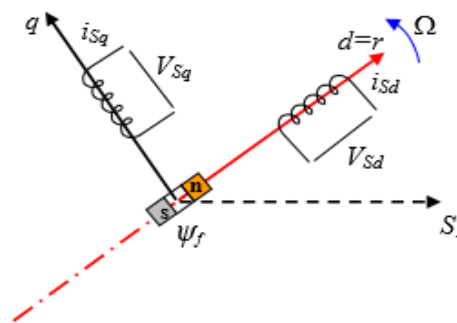


Figure 2.10 : Modèle de PARK pour la GSAP

-choix du référentiel :

Pour étudier la théorie des régimes de la machine synchrones à aimants permanents, on peut utiliser trois systèmes d'axes de coordonnées du plan d'axes (d,q) [11].

* Référentiel lié au stator :

Dans ce référentiel, les axes (d,q) sont immobiles par rapport au stator, dans ce cas la phase as et d coïncident. Ce référentiel est mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées.

L'utilisation de ce référentiel permet d'étudier les régimes de démarrages et de freinages des machines à courants alternatif.

* Référentiel lié au rotor :

Dans ce référence, les axes (d,q) sont immobiles par rapport au rotor tournant à une vitesse ωr . L'utilisation de ce système permet d'étudier les régimes de démarrages et transitoires dans les machines synchrones et asynchrones.

* Référentiel lié au champ tournant :

Dans ce référentiel, les axes (d,q) sont immobiles par rapport au champ tournant électromécanique créé par les enroulements du stator. Ce référentiel est généralement utilisé dans le but de prévoir l'application d'une commande de vitesse, de couple, etc. puisque les grandeurs dans ce référentiel sont de forme continue.

c. Mise en équation de la GSAP en biphasé :

Equations électriques :

$$\begin{cases} U_{sd} = -R_s I_{sd} + \frac{d\Psi_{sd}}{dt} - \omega_{mec} \Psi_{sq} \\ U_{sq} = -R_s I_{sq} + \frac{d\Psi_{sq}}{dt} + \omega_{mec} \Psi_{sd} \\ P_s = U_{sd} I_{sd} + U_{sq} I_{sq} \\ Q_s = U_{sq} I_{sd} - U_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (2.10)$$

Equations Magnétiques :

$$\begin{cases} \Psi_{sd} = -L_{sd} I_{sd} + \Psi_f \\ \Psi_{sq} = -L_{sq} I_{sq} \end{cases} \quad (2.11)$$

Equations Mécaniques :

Le couple électromagnétique est donné par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p [(L_{sd} - L_{sq}) I_{sd} I_{sq} + \Psi_f I_{sq}] \quad (2.12)$$

2.5.3 Simulation et interprétation :

Après la simulation on trouve les résultats suivants :

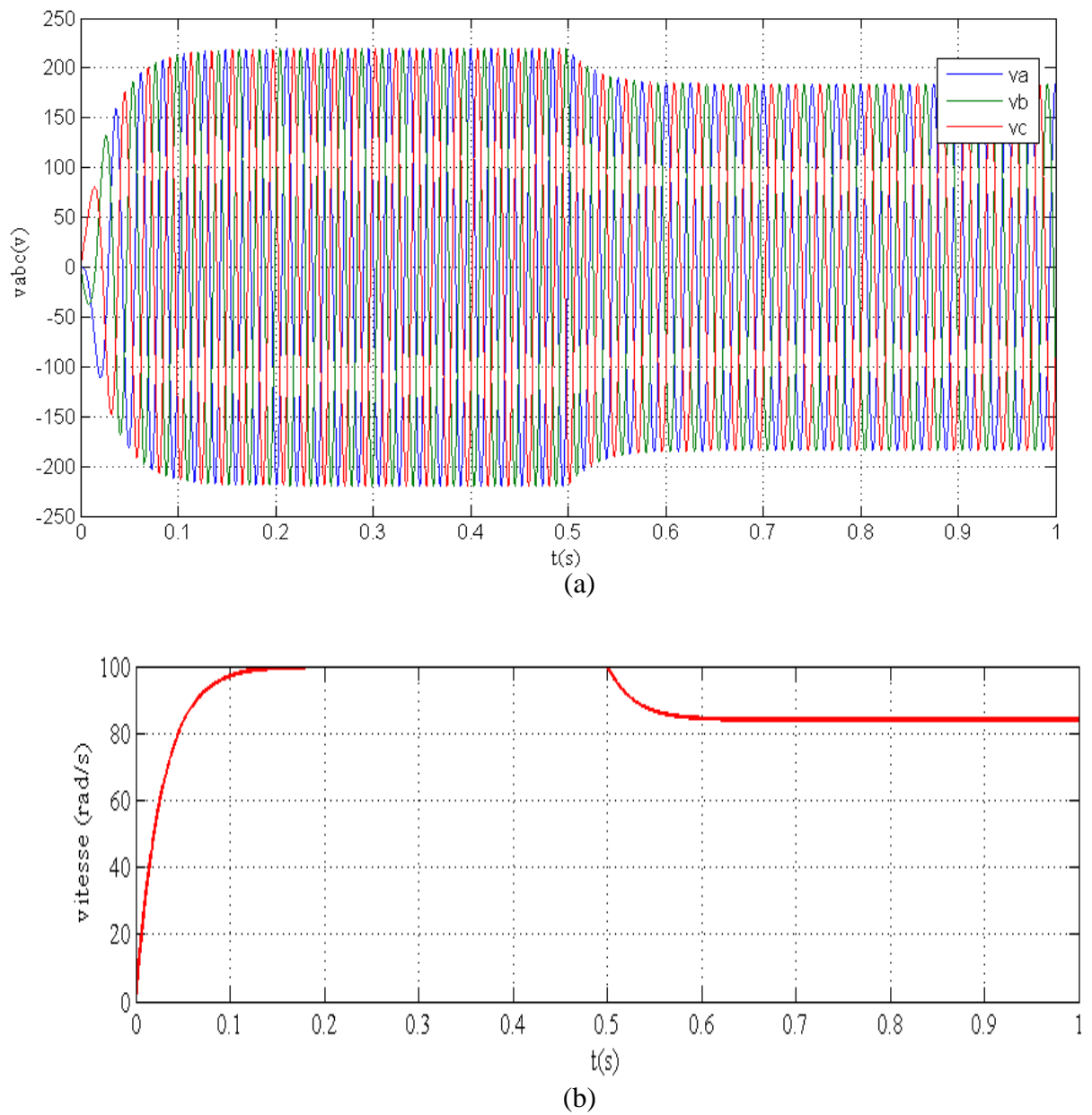
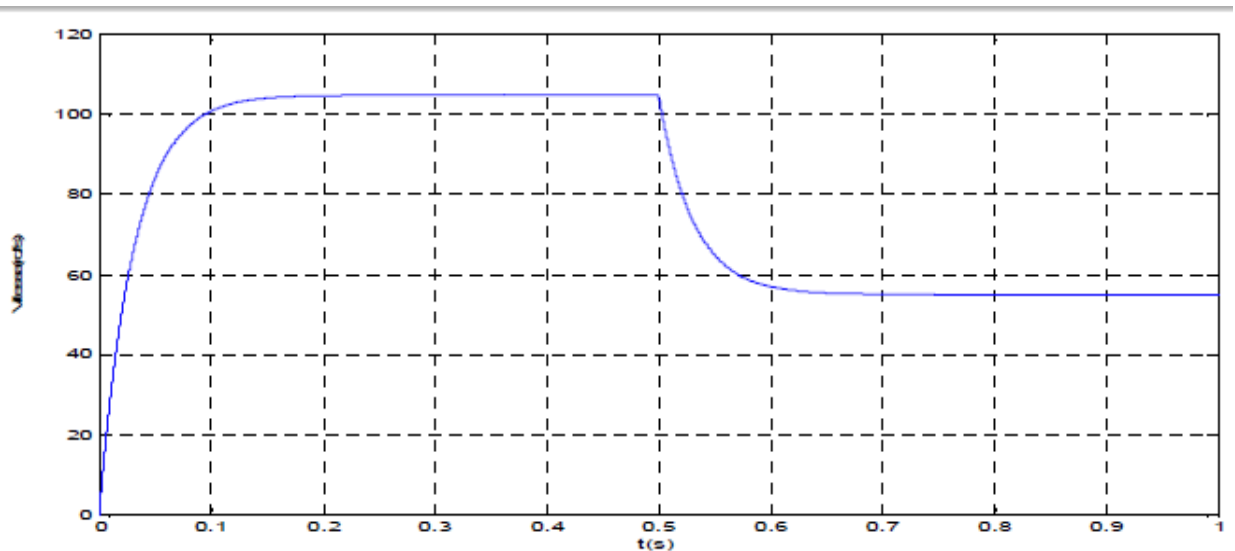
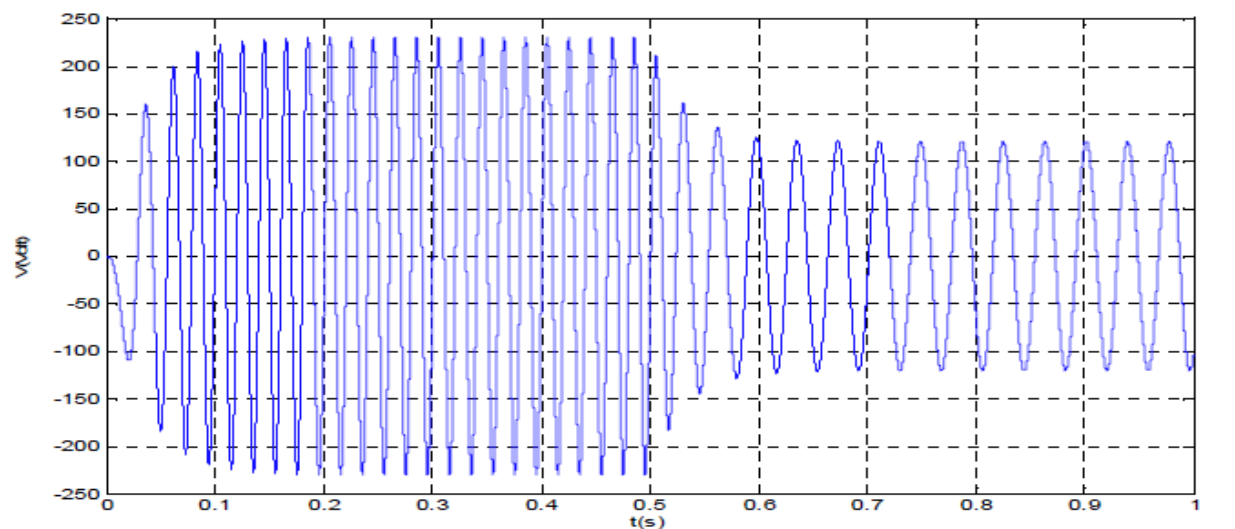


Figure 2.11 : Evolution des tensions statorique en fonction du temps ($C_r=5$ N.m puis $C_r=4.2$ N.m à l'instant $t=0.5$ s) pour la même inductance charge L_{ch} .



(a)



(b)

Figure 2.12 : Evolution de la tension statorique d'une phase en fonction du temps pour deux vitesse d'entraînement différentes ($R_{ch} = 200\Omega$ puis $R_{ch} = 150\Omega$ à l'instant $t=0.5$ s) pour la même inductance charge L_{ch} .

La variation de la charge électrique induit une dégradation de la tension au niveau du bobinage statorique et une légère dégradation au niveau de la fréquence. Cela est dû au changement du point de fonctionnement (voir la figure (2.11)).

La variation de la vitesse d'entraînement induit une dégradation de la tension au niveau du Bobinage statorique et une importante dégradation au niveau de la fréquence. Cela est dû au changement du point de fonctionnement (voir la figure (2.12)).

2.6 Conclusion:

L'intérêt porté à la GSAP ne cesse de croître pour diverses applications : en tant que génératrice pour les énergies renouvelables ou en tant que moteur pour certaines applications industrielles. Nous nous concentrons le long de ce travail sur le fonctionnement de la GSAP en mode générateur.

Le chapitre suivant sera dédié à présenter la commande de cette machine (la machine est intégrée dans un système éolien à axe horizontal).

CHAPITRE 3:

OPTIMISATION DU RENDEMENT POUR L'EOLIENNE A AXE HORIZONTAL BASE SUR LA GENERATRICE SYNCHRONE

3.1 Introduction :

L'amélioration du rendement d'un système éolien nécessite l'utilisation d'un dispositif nommé MPPT et qui signifie maximisation de la puissance extraite. Les systèmes éoliens à axe horizontal et sont de puissances (grandeurs de sorties) variables car leurs grandeurs d'entrées sont variables, pour cela un algorithme d'MPPT qui suit la puissance maximale est indispensable.

Ce chapitre est dédié à l'MPPT pour un système éolien dans la plateforme de Matlab. Pour ce faire, en premier lieu on décrira la commande adoptée pour la machine synchrone, on expliquera ensuite les MPPTs proposés et finalement une simulation sera exposée et interprétée.

3.2 La commande vectorielle de la génératrice synchrone a aimants permanents :

3.2.1 Principe :

La commande vectorielle est une méthode qui traite la technique de contrôle des machines alternatif. Son principe consiste à éliminer le couplage entre l'inducteur et l'induit en dissociant le courant statorique de deux composantes (I_{ds} , I_{qs}) en quadrature dans un référentiel lié au champs tournant de façon que l'une des composantes (I_{qs}) commande le couple et l'autre (I_{ds}) commande le flux, ce qui permet d'obtenir un fonctionnement comparable à celui d'une machine à courant continu, à excitation séparée [15].

La commande de la génératrice est basée sur un pilotage vectoriel classique avec capteur de position. Le champ magnétique d'excitation dans une machine synchrone est produit par le rotor. Ce champ magnétique tourne avec une vitesse angulaire égale à la vitesse de rotation électrique $p\Omega$. Un autre champ magnétique tournant est appelé la réaction de l'induit est produit par les enroulements du stator.

La vitesse de rotation est liée à la pulsation du champ tournant par la relation :

$$\Omega = \frac{\omega}{p} \quad (3.1)$$

Ou p le nombre de paires de pôles de la machine. Si on suppose un fonctionnement de la machine à vide et sans pertes, seul le flux magnétique d'excitation apparaît. La commande vectorielle

classique consiste à aligner un des deux axes du repère de Park, généralement l'axe direct d selon ce vecteur tournant composé par le champ d'excitation [16].

Lorsque la machine est chargée, une réaction d'induit apparaît et déplace le flux d'excitation.

Le couple électromagnétique et la vitesse de rotation dépendent donc des courants statorique et du flux magnétique. Comme nous avons vu dans le chapitre 3, le modèle de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère de Park est donné par les équations différentielles :

$$\begin{cases} U_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\Psi_{sd}}{dt} - \omega \Psi_{sq} \\ U_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\Psi_{sq}}{dt} - \omega \Psi_{sd} \end{cases} \quad (3.2)$$

Avec :

$$\begin{cases} \Psi_{sd} = L_{sd} I_{sd} + \Psi_f \\ \Psi_{sq} = L_{sq} I_{sq} \end{cases} \quad (3.3)$$

Le couple électromagnétique est donné par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p [\Psi_{sd} I_{sq} - \Psi_{sq} I_{sd}] \quad (3.4)$$

Parmi les stratégies de commande vectorielle appliquées à une machine synchrone, celle qui consiste à imposer une référence du courant direct I_{sd} à zéro est la plus répandue. Ce choix est justifié dans le but d'éviter la démagnétisation des aimants permanents due à la réaction d'armature selon l'axe d [16].

Le couple électromagnétique est donné par l'expression (3.4).

$$C_{em} = \frac{3}{2} P \Psi_f I_{sq} \quad (3.5)$$

L'expression du courant de référence I_{sq} est donnée donc par :

$$I_{sq-ref} = \frac{2}{3 p \Psi_f} C_{em-ref} \quad I_{sq} \quad (3.6)$$

À flux d'excitation émis par les aimants, il est donc possible de réguler le couple électromagnétique en contrôlant le courant I_{sq} tandis que le courant I_{sd} est asservi à zéro.

La figure (3.1) illustre la stratégie de commande en couple, elle comporte les boucles de régulation de courants et le découplage des tensions.

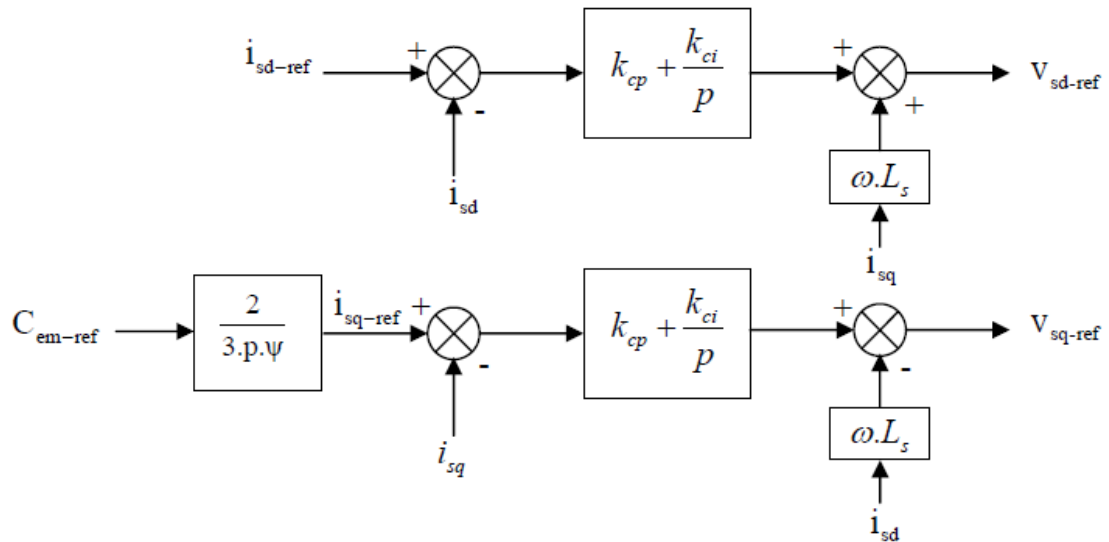


Figure 3.1 : stratégies de commande en couple de GSAP

3.2.2 Avantages et inconvénients de la commande vectorielle

3.2.2. a Avantages de la commande vectorielle

- Elle est basée sur le modèle transitoire (traiter les régimes transitoires ce que ne permettait pas de faire le variateur classique)
- Elle est précise et rapide.
- Il y a un contrôle du couple à l'arrêt.
- Le contrôle des grandeurs se fait en amplitude et en phase.

3.2.2. b Inconvénients de la commande vectorielle

Le contrôle vectoriel par orientation du flux rotorique présente un certain nombre d'inconvénients :

- Très chère (encodeur incrémental ou estimateur de vitesse, DSP).
- Faible robustesse aux variations paramétriques et en particulier à celles de la constante de temps rotorique.
- Nécessité d'un modulateur pour la commande rapprochée de l'onduleur qui provoque des retards, surtout à basse fréquence de modulation (grande puissance). Ces retards sont responsables d'une augmentation du temps de réponse en couple, ce qui pénalise les variateurs utilisés en traction.
- Présence de transformations de coordonnées dépendant d'un angle θ_s estimé.
- la vitesse de rotation intervient explicitement dans l'algorithme de commande. Quand on ne mesure pas cette vitesse (variateur sans capteur de vitesse), les erreurs sur l'estimée de cette vitesse dégradent les performances du variateur.

3.2.3 Synthèse de correcteurs :

On propose de mettre en œuvre des régulateurs de type PI dans la structure de commande. Les équations du modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents peuvent être écrites par la forme :

$$\begin{cases} U_{sd}(P) = R_s I_{sd}(P) + P L_s I_{sd}(P) - \omega \Psi_{sq}(P) \\ U_{sq}(P) = R_s I_{sq}(P) + P L_s I_{sq}(P) - \omega \Psi_{sd}(P) \end{cases} \quad (3.7)$$

La fonction de transfert de la machine peut s'écrire sous la forme :

$$G_s(P) = \frac{1}{R_s + L_s P} = \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + T_e P} \quad (3.8)$$

$$G_s(P) = \frac{I_{sd,q}(P)}{V_{sd,q}(P) + E_{d,q}(P)} \quad (3.9)$$

Avec la constant de temps électrique :

$$T_e = \frac{L_s}{R_s} \quad (3.10)$$

Les boucles de régulation se présentent alors sous la forme du schéma donné sur la figure (3.2) , (Le schéma est identique pour la boucle de courant dans l'axe q).

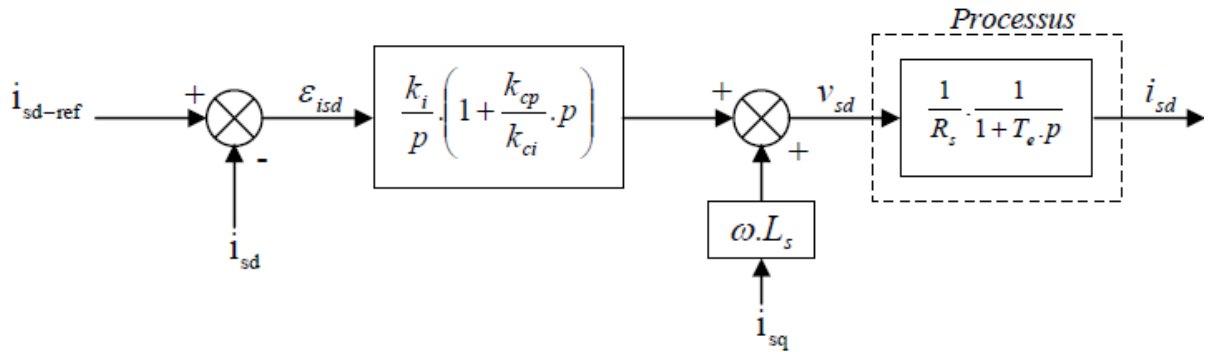


Figure 3.2 : Boucle de régulation de courant

En boucle ouverte la fonction de transfert est donnée par :

$$G_0(P) = \frac{k_{ci}}{R_s + L_s P} \left(1 + \frac{k_{cp}}{k_{ci}} P \right) \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + T_e P} \quad (3.11)$$

Les paramètres du régulateur sont déterminés par la méthode de la compensation du pôle en boucle ouverte. Ainsi, les constantes de temps sont égales à :

$$G(P) = \frac{G_0}{1+G_0(P)} = \frac{1}{\frac{R_s}{k_{ci}} P} = \frac{1}{1+T_f P} \quad (3.12)$$

En boucle fermée la constante de temps T_f et donc égale a :

$$T_f = \frac{R_s}{k_{ci}} \quad (3.13)$$

Alors :

$$T_f = \frac{L_s}{T_f} \quad (3.14)$$

Le coefficient proportionnel k_{cp} se déduit donc comme suit :

$$k_{cp} = \frac{L_s}{T_f} \quad (3.15)$$

3.2.4 Le découplage

Les équations différentielles qui représente le modèle de la machine étudiée dans le référentielle de Park (d, q), sont couplée entre elles où les courants i_d et i_q (pas indépendants l'un de l'autre), reliés par des termes non linéaires $\omega L_q i_q$ et $\omega L_d i_d$ comme montré dans les équations (3.17) [7]

Ce couplage est éliminé par une méthode de compensation, Cette méthode à pour but de découpler les axes (d, q), qui permet d'écrire les équations de la machine et de la partie de régulation d'une manière simple et ainsi de calculer de façon simple les coefficients des régulateurs [7].

On aura donc les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_d = V_{d1} + e_q \\ V_q = V_{q1} + e_d \end{cases} \quad (3.16)$$

Avec

$$\begin{cases} e_q = -\omega L_q i_q \\ e_d = \omega(L_d i_d - \varphi_f) \end{cases} \quad (3.17)$$

e_q et e_d sont les termes de compensation.

On a donc

$$\begin{cases} V_{d1} = \left(R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} \right) \\ V_{q1} = \left(R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} \right) \end{cases} \quad (3.18)$$

Dans la référence (d, q) :

$$\begin{cases} V_{d1} = (R_s + sL_d)i_d \\ V_{q1} = (R_s + sL_q)i_q \end{cases} \quad (3.19)$$

On aura donc les courants i_d et i_q qui sont découplés (indépendants) et s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} i_d = \frac{V_{d1}}{R_s + sL_d} \\ i_q = \frac{V_{q1}}{R_s + sL_q} \end{cases} \quad (3.20)$$

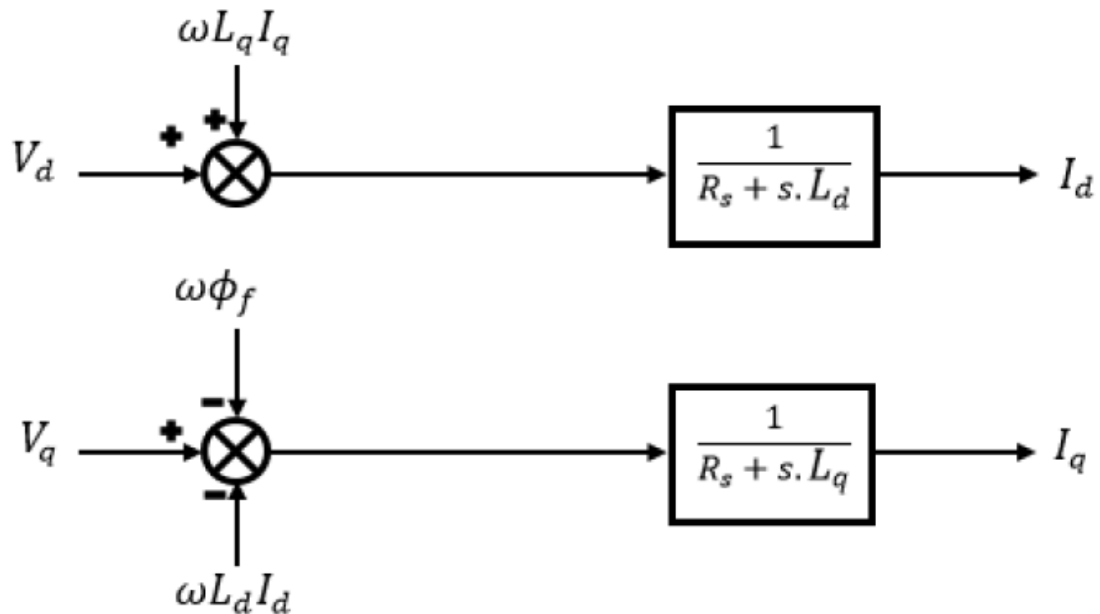


Figure 3.3 : Description des couplages

3.2.5 : Simulation et interprétation :

- ❖ **Test 01** : fixé la charge électrique résistive a 200Ω et variée le couple de 4.5 à 3.5 (N.m) à l'instant $t=5s$

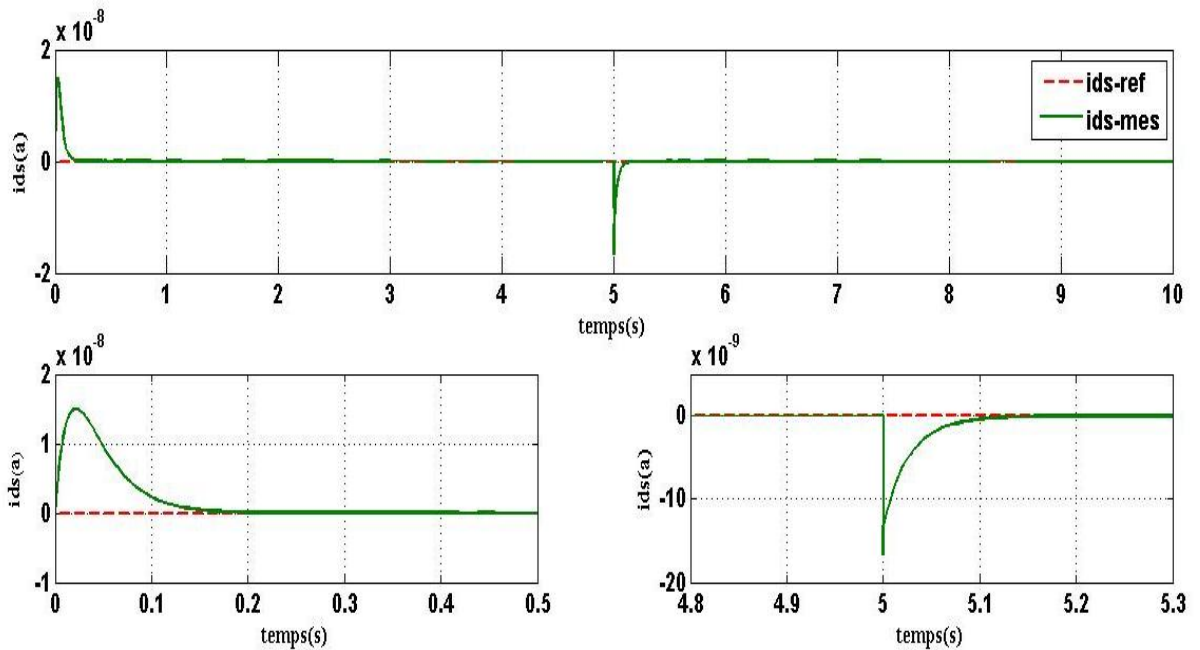


Figure 3.4 : Le courant I_d de la génératrice en (A). avec un couple de 4.5 et 3.5

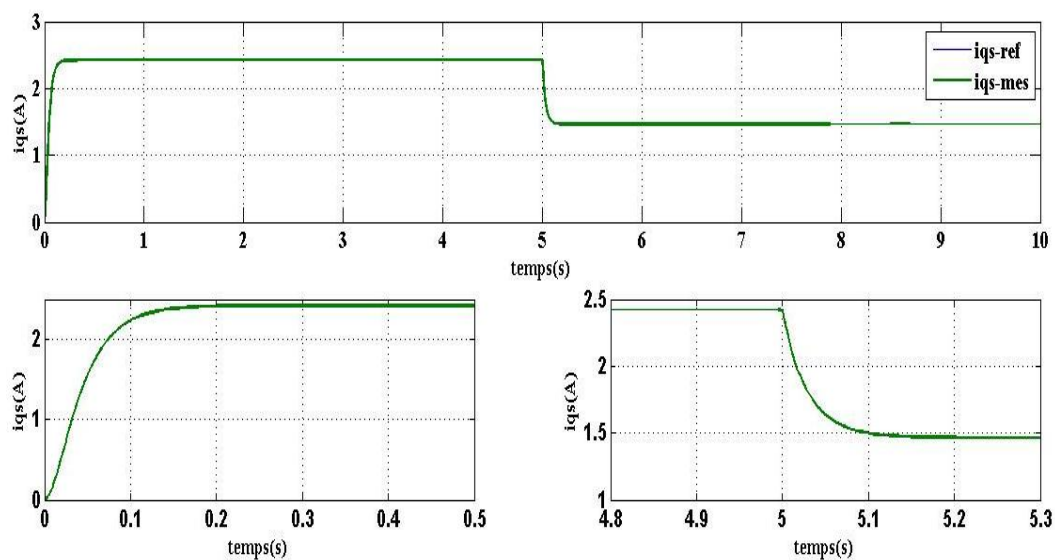


Figure 3.5 : Le courant I_q de la génératrice en (A) avec un couple de 4.5 et 3.5

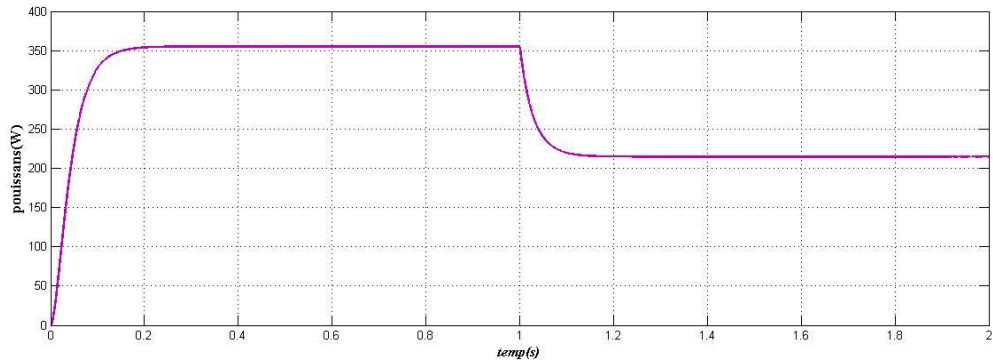


Figure 3.6 : La Puissance générée en (watt). Avec un couple de 4.5 et 3.5

Test 02 : fixe le couple a 4.5 (N.m) et change la charge électrique résistive de 250 Ω et 300Ω

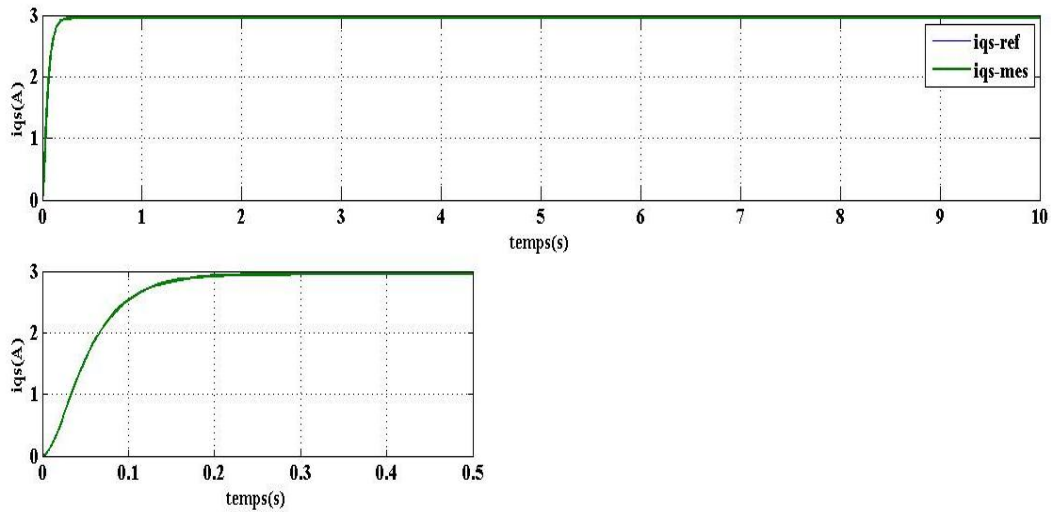


Figure 3.7 : Le courant I_q de la génératrice en (A) avec $R_{ch} = 250 \Omega$

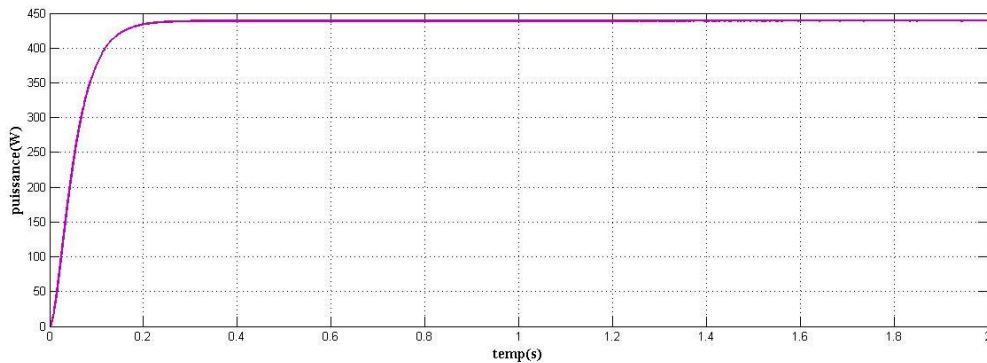


Figure 3.8 : La Puissance en (watt). Avec $R_{ch} = 250 \Omega$

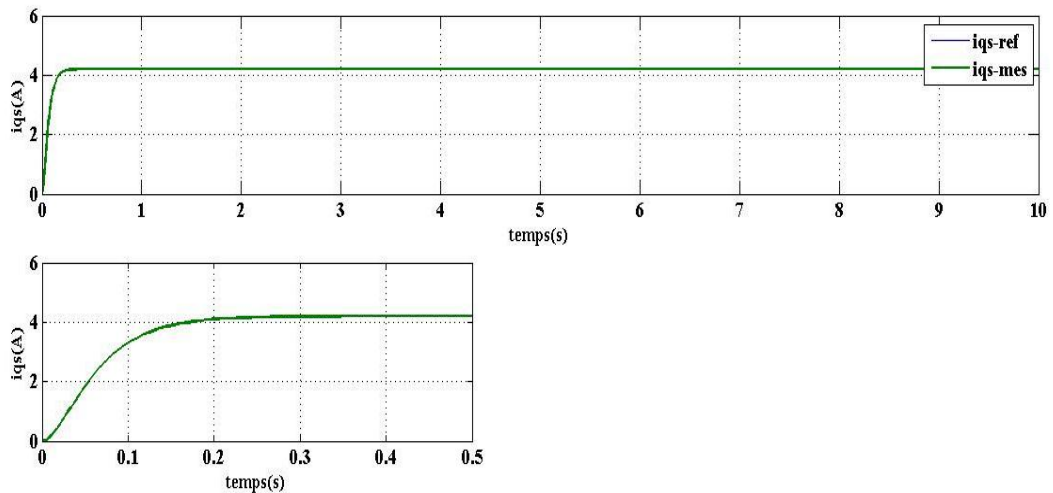


Figure 3.9 : Le courant I_q de la génératrice en (A) avec $R_{ch} = 300 \Omega$

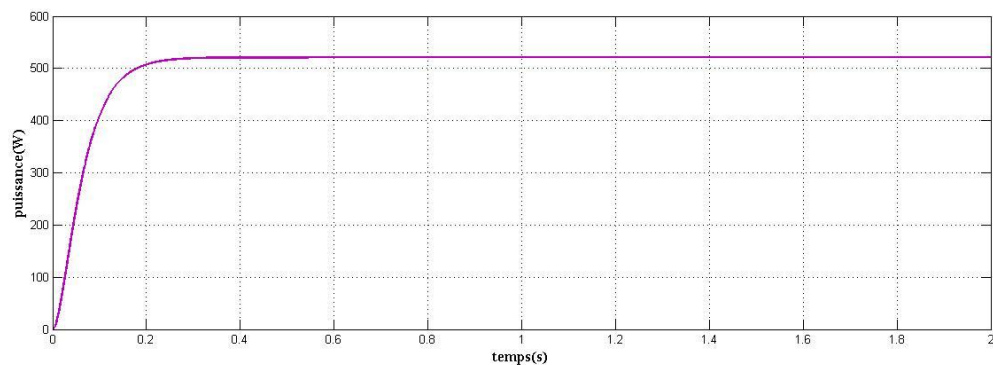


Figure 3.10 : La Puissance en (watt).avec $R_{ch} = 300 \Omega$

***Interprétation :** pour le premier test on a fixé la charge à 200Ω et varier le couple de 4.5 à 3.5 (N.m) à l'instant $t=5s$, on voit clairement que les valeurs mesurées de i_d et i_q suivent la référence d'une façon efficace. pour le douzième test on a fixé le couple à 4.5 (N.m) et on a varié la charge de 250Ω à 300Ω , les valeurs mesurées suivent les valeurs de référence pour les courants et la puissance d'une façon impeccable.

3.3 Définition et principe de fonctionnement du système éolien à vitesse variable :

3.3.1 Principe:

Le système éolien à vitesse variable est un système apte à travailler pour des vitesses égales ou différentes de la vitesse nominale (optimal) à l'aide du sous système MPPT, et cela pour produire la puissance max [17]. L'MPPT peut être définie comme étant un algorithme [19] ou un système [18] capable d'aider le système éolien à axe horizontal à vitesse variable pour extraire le maximum de puissance électrique à partir de l'énergie cinétique du vent disponible.

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 de courbes de la Figure 3.11. 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 $\lambda_{opt} = \lambda_{C_{pmax}}$ et C_p donné nommé C_{pmax} . La vitesse de rotation optimale Ω_{opt} résultante est alors donnée par la caractéristique correspondant à cette relation donnée sur la zone II de la figure (3.12). 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. 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. 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 délivrée 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.

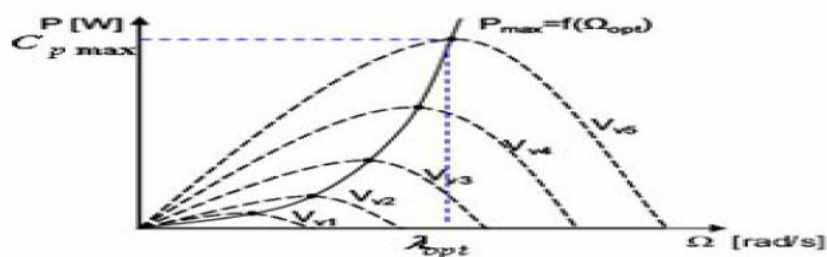


Figure 3.11 : maximisation de la puissance d'une éolienne à vitesse variable [20]

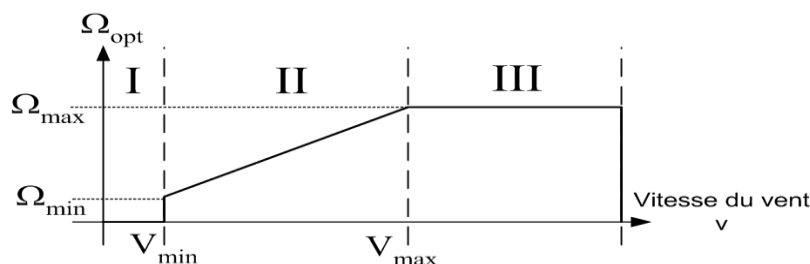


Figure 3.12: Diagramme de la vitesse angulaire sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent [21].

La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est fortement non linéaire [21]. Pour chaque vitesse de vent, il faut que le système trouve la puissance maximale ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale qui correspond aussi à un couple de charge strictement défini. Le schéma de la figure (3.11) donne les courbes caractéristiques de la voilure éolienne de type Savonius dans le plan puissance-vitesse de rotation de la voilure. Chaque courbe en ligne pointillée correspond à une vitesse du vent V donnée. Cette famille des courbes est obtenue directement à partir de la caractéristique C_p de la voilure. L'ensemble des sommets de ces caractéristiques, qui sont les points optimaux recherchés, définit une courbe dite de puissance optimale de forme cubique. Idéalement, cette courbe doit être suivie à tout moment du fonctionnement du système éolien. Pour s'approcher de ce but, une commande spécifique doit être utilisée.

3.3.2 Les différents types d'MPPT éoliens:

La puissance capturée par la turbine éolienne peut être maximisée en ajustant le coefficient C_p . Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la génératrice. L'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance électrique générée (donc le couple) en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quelle que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice. Pour cela, on peut distinguer deux approches (types) possibles :

- La première, la moins classique, considère que la caractéristique C_p n'est pas connue ;
- La seconde façon d'agir, plus répandue, suppose que cette caractéristique de voilure est connue. Il suffit de suivre la courbe de puissance optimale comme caractéristique de charge pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales.

a. Maximisation de la puissance sans la connaissance de la courbe caractéristique de la voilure:

Pour l'étude de la commande permettant d'effectuer une recherche du point maximal de la puissance sans la connaissance de la courbe caractéristique C_p , une structure avec redresseur MLI triphasé peut être utilisée [20]. Cette structure assure un contrôle dynamique en vitesse ou en couple de la génératrice synchrone ce qui permet facilement de déplacer le point de fonctionnement sur toute la plage des vitesses de rotation et ainsi d'effectuer par ce biais une recherche de la puissance maximale souhaitée. En l'absence de toute connaissance des caractéristiques de voilure, des

algorithmes de comportement sont à tenir afin de converger vers le point optimal. Ces algorithmes dépendent des variations de puissance ΔP et de vitesse $\Delta\Omega$. Par exemple : si on mesure une augmentation de puissance ($\Delta P > 0$) suite à un incrément positif de vitesse, on doit continuer à accélérer la voilure ($\Delta\Omega_{ref} > 0$). On se situe alors sur la partie gauche de la cloche $P(\Omega)$ (figure 3.11). L'utilisation d'un dispositif MPPT (Maximum Power Point Tracking) basé sur le principe des ensembles flous peut être réalisable [19]. Il existe aussi d'autres structures, comme celle basée sur la machine asynchrone à cage, pilotée par le stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques [18], et celle basée sur la machine asynchrone à rotor bobiné ou la vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissances situés au circuit rotorique [18].

b. Maximisation de la puissance avec connaissance de la courbe caractéristique de la voilure:

Une autre façon de procéder consiste en une pseudo recherche du point maximal de puissance en connaissant la courbe caractéristique de la voilure éolienne à piloter. Ces méthodes permettent de se rapprocher rapidement de l'optimum à l'aide des mesures simples, internes au convertisseur mécano-électrique, c'est-à-dire sans obligation de capture de la vitesse du vent. Cette façon de procéder exige au constructeur de la voilure des essais de caractérisation (extérieur, soufflerie) ou des simulations du profil de pales.

- **Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse :** Si on suppose que la génératrice est idéale, donc quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique C_{em} développé est à tout instant égal à sa valeur de référence C_{em-ref} , (c.-à-d : $C_{em} = C_{em-ref}$). Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine $\Omega_{turbine}$ qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. La vitesse de la génératrice Ω égale à $\Omega_{turbine}$ (pas de multiplicateur) est influencée par l'application de trois couples : le couple éolien C_g , le couple électromagnétique C_{em} et le couple résistant C_r . En regroupant l'action de ces trois couples on peut écrire [18] :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (C_g - C_{em} - C_r) \quad (3.21)$$

Avec , J : l'inertie de la turbine plus l'inertie de la génératrice.

Cette structure de commande (figure 3.13) consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine C_{aer} de manière à fixer sa vitesse à une référence. Pour réaliser ceci, l'utilisation d'un

asservissement de la vitesse est indispensable. Alors le couple électromagnétique de référence C_{em-ref} permettant d'obtenir une vitesse mécanique égale à la vitesse de référence Ω_{ref} est basé sur la relation suivante [18] :

$$C_{em-ref} = K_{reg} \cdot (\Omega_{ref} - \Omega) \tag{3.22}$$

K_{reg} : le régulateur de vitesse (il peut être PI ou à avance de phase....etc.).

Cette vitesse de référence Ω_{ref} dépend de la vitesse de la turbine à fixer $\Omega_{turbine}$ pour maximiser la puissance extraite. La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle de la valeur optimale du ratio de vitesse λ_{Cpmax} (β constant) permettant d'obtenir la valeur maximale du C_p . Alors on peut écrire :

$$\Omega_{ref} = \frac{\lambda_{Cpmax} \cdot V}{R} \tag{3.23}$$

- Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse : Cette seconde structure de commande (figure 3.14) repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine [18] :

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_g - C_{em} - C_r = 0 = C_{mec} \tag{3.24}$$

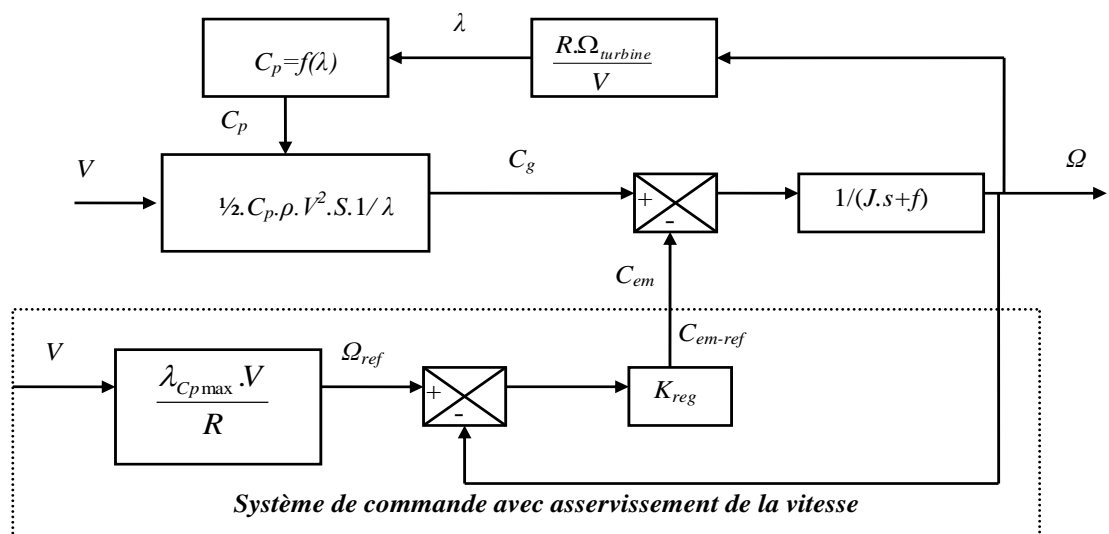


Figure 3.13: MPPT avec asservissement de la vitesse.

Une mesure précise de la vitesse du vent est pratiquement difficile. Ceci pour deux causes :

- L'anémomètre est situé derrière le rotor de la turbine [18], ce qui errone la lecture de la vitesse du vent ;
- Le diamètre de la surface balayé par les pales étant important.

Selon L'équation (1.11), le couple mécanique C_{mec} est nul. Donc, si on néglige l'effet du couple des frottements visqueux ($C_r \cong 0$), on obtient :

$$C_{mec} = C_t = C_g \quad (3.25)$$

Le couple électromagnétique de réglage est déterminé à partir d'une estimation du couple éolien :

$$C_{em-ref} = C_{aer-estimé} \quad (3.26)$$

Le couple éolien peut être déterminé à partir de la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent et de la mesure de la vitesse mécanique en utilisant l'équation :

$$C_{aer-estimé} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V_{estimé}^3}{2 \cdot \Omega_{turbine-estimé}} \quad (3.27)$$

L'estimation de $\Omega_{turbine}$ vient de la mesure de la vitesse mécanique Ω : $\Omega_{turbine-estimé} = \Omega$

La vitesse du vent estimée peut être donnée par l'équation suivante :

$$V_{estimé} = \frac{\Omega_{turbine-estimé} \cdot R}{\lambda} \quad (3.28)$$

En se basant sur les équations précédentes, on peut alors écrire :

$$C_{em-ref} = \frac{C_p \cdot \rho \cdot \Omega^2 \cdot \pi \cdot R^3}{2 \cdot \lambda^3} \quad (3.29)$$

Pour extraire le maximum de puissance, il faut fixer le ratio de vitesse à la valeur $\lambda_{C_{pmax}}$ qui correspond au maximum du coefficient de puissance C_{pmax} . Le couple électromagnétique doit être réglé à la valeur suivante :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{pmax} \cdot \rho \cdot \Omega^2 \cdot \pi \cdot R^3}{2 \cdot \lambda_{C_{pmax}}^3} \quad (3.30)$$

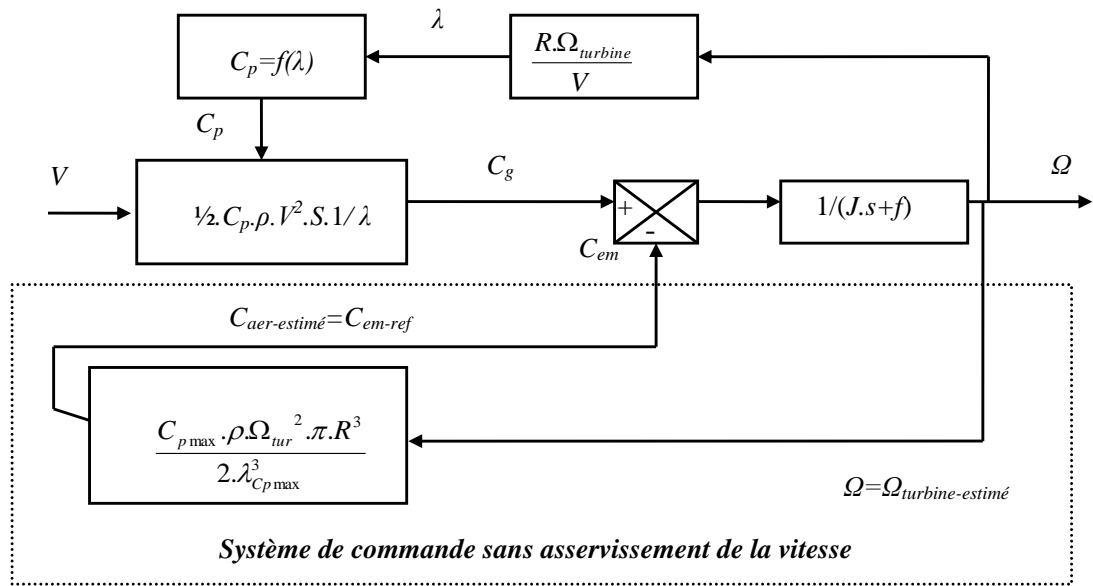


Figure 3.14 MPPT sans asservissement de la vitesse.

***Simulation**

Test 03 : Pour une vitesse variable de la turbine : On obtient les résultats suivants (avec une charge électrique résistive fixe qui égale a 200 Ω (sans MPPT)) :

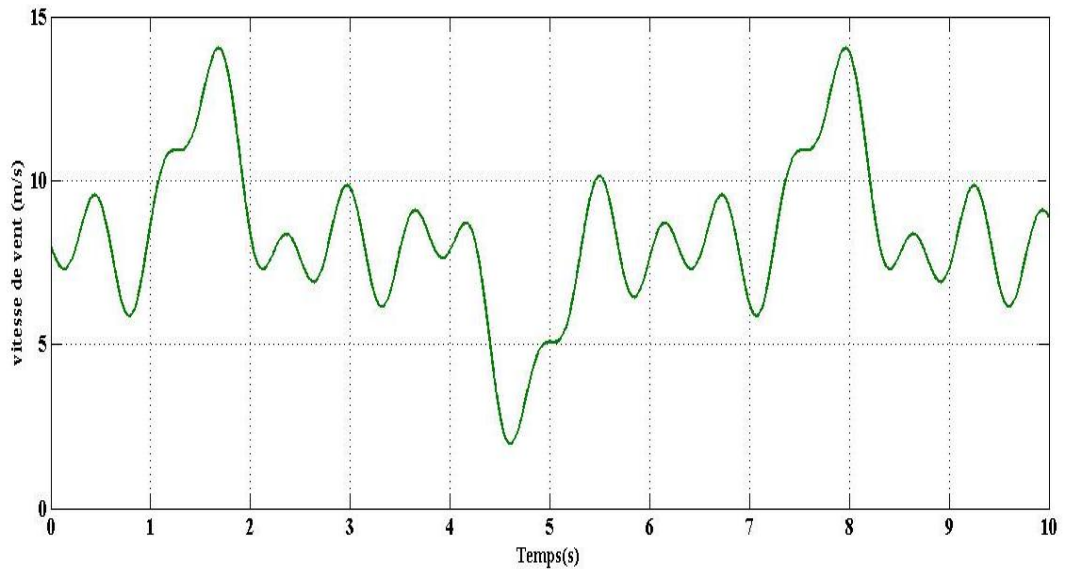


Figure 3.15 : profil du vent

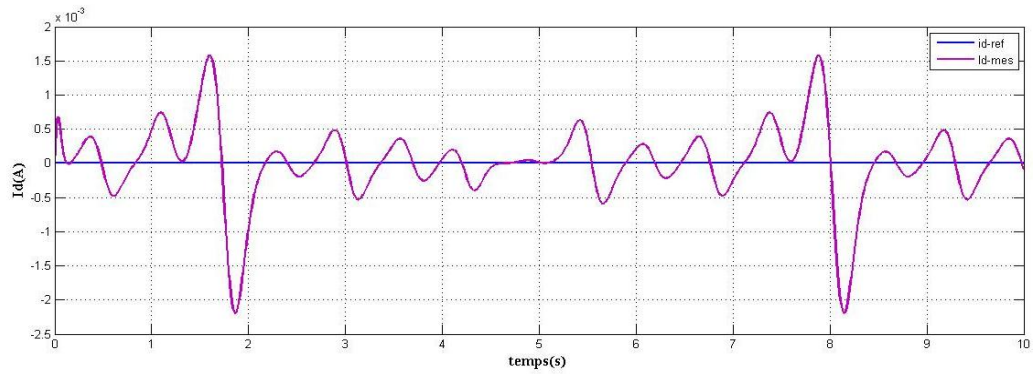


Figure 3.16 : Le courant I_d de la génératrice en (A)

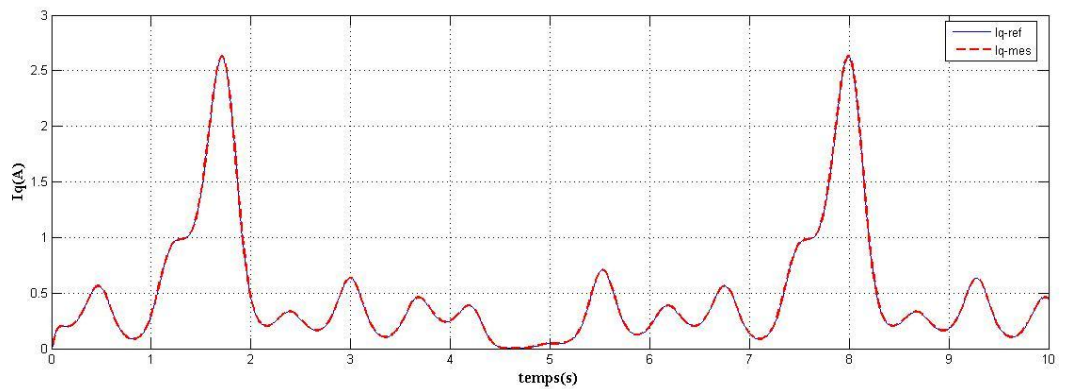


Figure 3.17: Le courant I_q de la génératrice en (A)

❖ **Test 04 :** Pour une vitesse fixe de la turbine de 8 puis de 10(m/s) à 5s, On obtient le résultat suivant et cela avec une charge électrique résistive fixe qui égale a 200 Ω .L'MPPT appliqué est celui sans asservissement de la vitesse du vent.

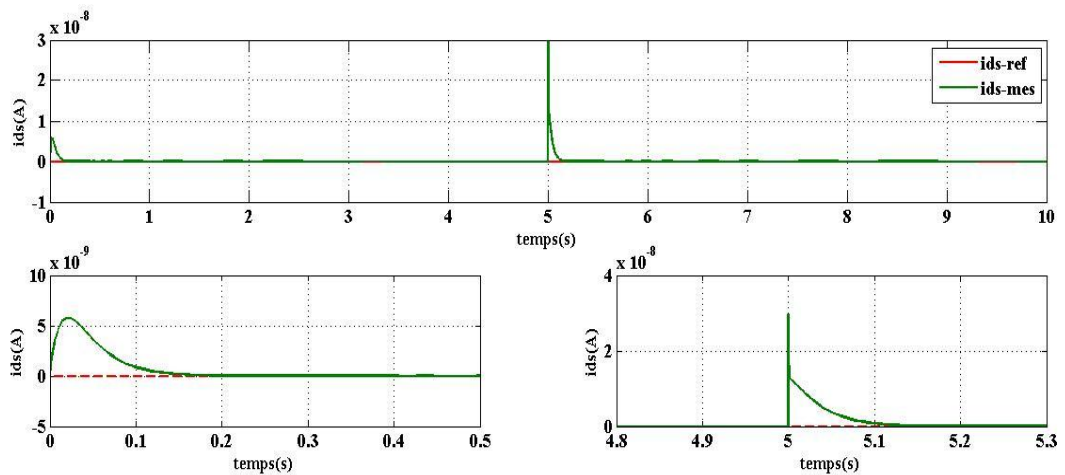


Figure 3.18: Le courant I_d de la génératrice en (A)

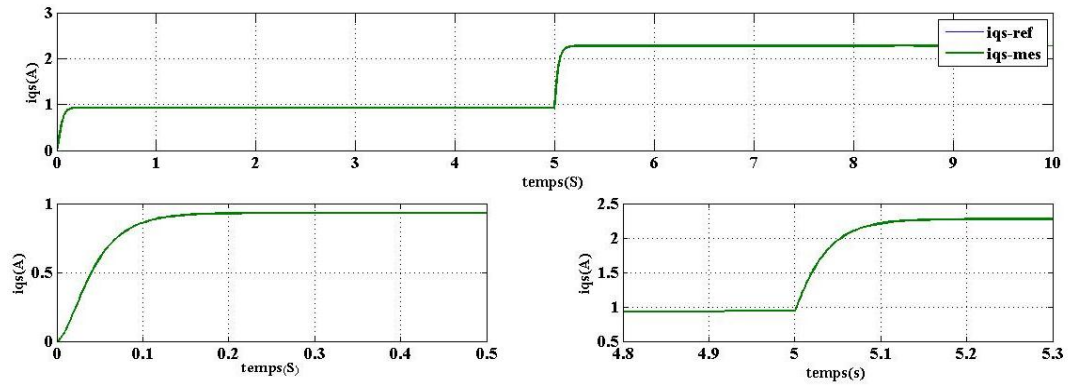


Figure 3.19: Le courant I_q de la génératrice en (A)

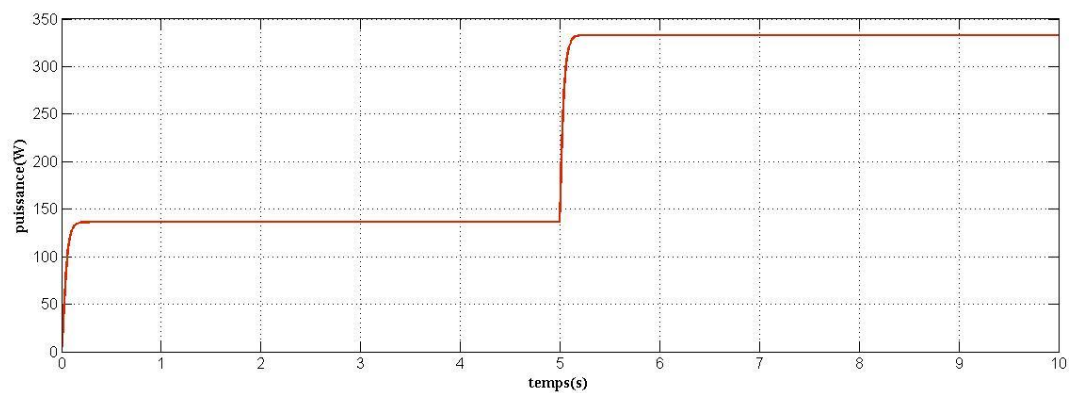


Figure 3.20 : La Puissance en (watt).

***Interprétation :** pour le test 3 et à une vitesse variable de la turbine avec une charge électrique résistive fixe qui égale à 200Ω sans MPPT ; on voit clairement que la variation des valeurs mesurées de i_d et I_q suivent les références (un régime transitoire acceptable est apparent). pour le quatrième test : une vitesse fixe de la turbine de $8(m/s)$ puis à l'instant $t=5s$ on change la vitesse de vent à $10(m/s)$ et avec une charge électrique résistive fixe qui égale à 200Ω . L'application de l'MPPT sans asservissement de la vitesse du vent montre que les valeurs mesurées suivent les valeurs de référence pour les courants et pour la puissance.

3.4 Conclusion:

Dans ce chapitre, on a présenté la commande vectorielle de la génératrice synchrone à aimant permanent, une mise en œuvre pratique sur la plateforme Matlab de l'MPPT par une hybridation Machine -turbine a permis de statuer sur la manière dont les deux systèmes devraient être connectés. Les résultats obtenus sur simulations sur Matlab d'une éolien avec des données copiant la réalité (vent) approuvent bien l'efficacité de telles approches.

CONCLUSION GENERALE

LE TRAVAIL ACCOMPLI

L'objectif préalablement défini de ce travail consistait à la modélisation et la commande des génératrices synchrones à aimants permanents utilisées dans l'éolien. A la lumière de l'étude effectuée, nous avons vu les étapes successives permettons d'élaborer une stratégie de commande pour une génératrice asynchrone jusqu'à sa mise en œuvre.

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

Dans le deuxième chapitre constitue son modale mathématique et les différents structures des machines synchrones utilisées dans l'éolien. Dans ce même chapitre, la GSAP a été modélisées et simulées dans les différents régimes de fonctionnement que soit linéaire ou de saturation (cas réel).

Pour finaliser ce travail on à plusieurs techniques de commande de la génératrice synchrone, on a choisis la commande vectorielle à flux rotorique orienté, les de simulation résultats obtenus dans plusieurs travaux cités dans la bibliographie ce qui nous encouragera au Future de compléter la chaîne éolienne par la simulation de la partie mécanique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [01] **Naouel HAMDI** « Modélisation et commande des génératrices éoliennes » *Mémoire de magister*, Département d'Electrotechnique, Université Mentouri de Constantine, 24 /01/2008.
- [02] **LATRECHE Mohammed Tahar** « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien » *Mémoire de magister*, Département d'Electrotechnique, Université Ferhat Abbas de Sétif UFAS –ALGERIE, 24 /06 /2012.
- [03] **AZZOUZ Tamaarat** « Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne a base d'une MADA » Tese de doctorat, Département d'Electrotechnique, Université Mohamed khider - Biskra, 08/12/2015.
- [04] **Mlle. ZERARI NAZIHA** «Modélisation et optimisation multi objectifs d'une éolienne à axe horizontal d'un système de production éolien isolé de petite taille» Tese doctorat, Département d'Electromécanique, Université BADJI MOKHTAR-ANNABA, 17 /09/ 2015.
- [05] **BENHADDA Abdelmoundir, BENTIFOUR Mustapha** « Commande d'une turbine éolienne à pitch variable basée sur un générateur synchrone à aimants permanents » *Mémoire de MASTER*, Département de Génie électrique, Université Aboubakr Belkaïd –Tlemcen, 16 / 09 / 2017.
- [06] **LOUAR FATEH** « Modélisation et simulation d'une chaine de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent » Thèse doctorat, Département d'Electrotechnique, Université BADJI MOKHTAR- ANNABA,2016.
- [07] **Mayouf Messaoud** « contribution a la modélisation de l'aérogénérateur synchrone a aimant permanents » *Mémoire de magister*, Département d'Electrotechnique, Université de Biskra, 18/02/2008.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [08] **Nesmat ABU-TABAK** « Stabilité dynamique des systèmes électriques multimachines : Modélisation, commande, observation et simulation » Thèse doctorat, L'école doctorale Electronique, électrotechnique, automatique, Université de Lyon ,19/11/2008.
- [09] **Marwa Mohamed Moustafa EZZAT** «commande non linéaire sans capteur de la machine synchrone à aimants permanents»,thèse de doctorat , école doctorat sciences et technologies de l'information et mathématique, école centrale de nantes, 17 Mai 2011.
- [10] **LOUAR FATEH** «Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent », thèse de doctorat , Faculté des sciences de l'ingénierie Département d'électrotechnique, université badji mokhtar annaba, 2016 .
- [11] **AMIRI MOHAMMED, ALI DAHMANE OUSSAMA** , «Commande vectorielle en vitesse du moteur synchrone à aimants permanents dotée d'un observateur mode glissant», mémoire de master, Faculté de technologies Commande des machines électriques , Université AboubakrBelkaïd– Tlemcen, 04 / 07 / 2017 .
- [12] **BENHADDA Abdelmoundir BENTIFOUR Mustapha**, «Commande d'une turbine éolienne à pitch variable basée sur un générateur synchrone à aimants permanents », mémoire de master, Faculté de technologies Commande des machines électriques, Université Aboubakr Belkaïd-Tlemcen ,16 / 09 / 2017.
- [13] **LATRECHE Mohammed Tahar**, «*Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien*», mémoire de magister, Département d'Electrotechnique, Université Ferhat Abbas de Setif, 24 /06 /2012
- [14] **NAIT SEGHIR amirouche**, «contribution à la commande adaptative neuronale d'une machine synchrone à aimants permanents », mémoire de magister ,département génie électrique –laboratoire de commande des processus, école national polytechnique,16 /12/2007

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [15] **Gaad M**, « Modélisation et réalisation d'un onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC. Application à la conduite de la machine asynchrone », mémoire de magister, EMP 2000 Alger.
- [16] **H. Semmache et al.** «Développement des Performances des Systèmes Energétiques dans la Production d'Énergie Éolienne» Laboratoire 'Interaction Réseau Commande', Dpt. électrotechnique, Université Djillali Liabbès, Sidi Bel Abbés. 1999.
- [17] **Salma.El Aimani** « Modélisation d'une éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation couplée à un réseau Moyenne Tension », JCGE'03, Saint-Nazaire, 5 et 6 juin 2003.
- [18] **Salma.El Aimani** « modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans réseaux de moyenne tension» *thèse de Doctorat de l'Université Lille, France, 2004.*
- [19] **Andreas Petersson** « Evaluation of Current Control Methods for Wind Turbines Using Doubly-Fed Induction Machines », IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL.20, NO. 1, JANUARY 2005.
- [20] **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 reliée aux réseaux)», *Thèse de Doctorat de génie électrique, Université Nantes, France, 2003*
- [21] **Frédéric.Poitiers** « Etude d'un système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation », JCGE'03, Saint-Nazaire, 5 et 6 juin 2003.
- [22] **B.Multon** « Le Génie Electrique dans le vent : état de l'art et recherches dans le domaine de la génération éolienne», JCGE'03, Saint-Nazaire, 5 et 6 juin 2003.
- [23] **Srinivas R.Chellapilla** « A dynamic model of induction generators for wind power studies», 0-7803-7989-6/03/\$17.00 © 2003 IEEE.
- [24] **Tony.Burton**, «Wind energy handbook», Copyright 2001 by John Wiley & Sons, Ltd Baffins Lane, Chichester West Sussex, PO19 1UD, England.

Annexe

Paramètres de la turbine :

Table 1 – Paramètres de la turbine

Nom	Valeur	Unité
Puissance nominale	350	W
Angle de calage	2	
Nombre de pale	3	
Rayonne de pale (R)	1	M
Gaine de multiplicateur (G)	1	
Coefficient de frottement visqueux	0	N.m /rad
Coefficient de puissance (Cp)	0.54	
Lambda (λ)	6.61	
La densité volumique	1.22	
Moment d'inertie (J)	0.0141	Kg.m ²

Paramètres de la GSAP :

Table 2 – Paramètres de la GSAP utilisée

Nom	Valeur	Unité
Puissance nominale	350	W
Nombre de paires du pôle	3	
inductance statorique en directe	0.012	H
inductance statorique en quadrature	0.021	H
résistance statorique	0.895	Ω
le flux magnétique produit par les aimants	0.9	Web
la charge électrique résistive (Rch)	200	Ω
la charge électrique inductive (Lch)	0.002	H
f	0.001	