

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Akli Mohand Oulhadj – Bouira –



Faculté Des Sciences Et Sciences Appliquées

Département de Génie Electrique

Mémoire de Master

Spécialité : Electromécanique

Option : Electromécanique

Présenté par :

NOUARI Aissa

AKKOUCHE Bellal

THÈME:

**COMMANDE D'UNE MSAP DÉDIÉE À UNE
ÉOLIENNE PAR LA MÉTHODE DE BACKSTEPPING**

Soutenu le : 30/09/2018

Encadreur : M^{me} Samia BEN SMAIL

Co-Encadreur : M^r Hamou AIT ABBAS

Devant les jurys

Président : M^r KHARCHI Mohamed

Examineur : M^r MOHAMMEDI Ahmed

Examineur : M^r BAHLOUL Mohamed

Année universitaire : 2017 - 2018

Remerciements

Nous remercions Dieu de nous avoir donné la force physique et morale pour accomplir ce travail

Ce travail a été effectué sous la direction du **Mme Samia BENSMAIL**, docteur à l'université Bouira et sous la codirection du **Mr Hamou AIT ABBAS**, docteur à l'université de Bouira que nous tenons à remercier vivement pour les conseils et aides apportés durant la réalisation de ce mémoire.

Mes remerciements vont également vers les membres de jurys pour l'honneur qu'ils nous ont fait en examinant ce travail.

Comme nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont aidés durant la réalisation de ce mémoire.

Dedicaces

Nous dédions ce modeste travail :



A nos très chers parents



A nos frères et sœurs



A toute la famille AKKOUICHE et NOUARI



A tous mes amis



A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin durant toutes mes années d'études

Bellal et Aissa

NOMENCLATURE

Nomenclature

- MPPT: Recherche point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking).
- GSAP : Générateur synchrone à aimant permanent.
- MAS : Générateur asynchrone.
- MSRB : Générateur synchrone à rotor bobiné.
- MACE : Machines Asynchrones a cage d'écureuil
- MSAP : Machine synchrone à aimant permanent.
- MADA : Machines Asynchrones a double alimentation.
- B_r : L'induction rémanente.
- H_c : Champ coercitif de l'aimantation.
- $(BH)_{max}$: Energie spécifique maximale.
- \vec{B} : L'induction magnétique.
- \vec{H} : Le champ magnétique.
- \vec{M} : L'aimantation.
- $V(t)$: La vitesse du vent (m/s).
- $V_0(t)$: La vitesse moyenne du vent (m/s).
- $V_T(t)$: La vitesse du vent turbulence (m/s).
- G_f : Fonction de transfert de filtre passe bas.
- τ : constante de temps (s).
- γ : Facteur d'affaiblissement sur le rotor.
- R_t : diamètre du rotor en (m).
- V_{moy} : La vitesse du vent moyenne (m/s).
- E_C : L'énergie cinétique du vent (Joule).
- ρ : masse volumique de l'air (Kg/m^3).
- S : la surface du l'arbre de turbine en (m^2).
- P_v : La puissance de vent disponible (watt).
- m_0 : La masse d'air en mouvement (kg).
- P_t : La puissance récupérable par la turbine (watt).
- C_p : Coefficient de puissance.
- C_{pmax} : Coefficient de puissance maximal.
- R : Rayon de la surface balayée en (m).
- Ω_t : Vitesse de rotation avant multiplicateur en (rad/s).
- β : L'angle de calage entre le plan de rotation et la corde du profil en ($^\circ$).

Nomenclature

- λ : La vitesse spécifique (relative).
- λ_{opt} : La vitesse relative optimale.
- C_T : Couple de la turbine éolienne (N.m).
- C_{T-opt} : Couple optimal de la turbine éolienne (N.m).
- Ω_g : Vitesse de rotation après multiplicateur en (rad/s).
- C_g : Couple après multiplicateur (N.m).
- G : Gain de multiplication.
- C_{mec} : couple mécanique total (N.m).
- J : Le moment inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice.
- C_g : Le couple après le multiplicateur en (N.m).
- C_{em} : Le Couple électromagnétique de la génératrice en (N.m).
- C_f : Le couple résistant dû aux frottements en (N.m).
- f : Le coefficient de frottement total du couplage mécanique.
- L_d : L'inductance dans l'axe direct (H).
- L_q : L'inductance dans l'axe quadrature (H).
- R_s : La résistance statorique (Ω).
- I_d : Le courant dans l'axe direct en (A).
- I_q : Le courant dans l'axe quadrature en (A).
- ω : La vitesse angulaire (rad/sec).
- V_d : La tension dans l'axe direct en (volt).
- V_q : La tension dans l'axe quadrature en (volt).
- MLI : La technique de Modulation de la Largeur d'Impulsion.
- P : Nombre de paire de pole de la génératrice.
- φ_f : Amplitude du flux des aimants permanents.
- e_d : Termes de compensation dans l'axe direct.
- e_q : Termes de compensation dans l'axe quadrature.
- PI : Régulateur proportional- integral.
- PID: Régulateur proportionnel- intégral-dérivé.
- $U(t)$: Signal de commande.
- $Y(t)$: Signal de sortie.
- $W(t)$: Signal de consigne.

Nomenclature

- K_p : Gain proportional.
- K_i : Gain integral.
- $e(t)$: Signale de l'écart.
- τ_e : La constante de temps électrique relative.
- t_r : Le temps de réponse.
- ω_0 : La pulsation naturelle.
- ξ : Le coefficient d'amortissement.
- U_{bus} : Tension de bus continu.
- $S_{a,b,c}$: Signal de commande des phases a, b, c.
- C : Capacité du condensateur.
- $E_{a,b,c}$: Les f.é.m induites dans les enroulements de phase du stator.

Table des matières

Table des matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Etat de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne

I.1 Introduction	4
I.2 Définition de l'énergie éolienne	4
I.3 Structure de la chaîne de conversion éolienne :	4
I.4 Historique.....	5
I.5 Différents types d'éolienne.....	5
I.5.1 Eolienne à axes vertical	6
I.5.1.1 Eolienne de rotor Savonius	6
I.5.1.2 Eolienne de rotor Darrieux	6
I.5.2 Eolienne à axes horizontal.....	8
I.6 Principales composants d'une éolienne	8
I.5.1 La nacelle	9
I.6.2 Le rotor	10
I.6.3 La tour	10
I.7 Fonctionnement d'une éolienne	10
I.7.1 Eoliennes à vitesse fixe et variable	10
I.7.1.1 Eoliennes à vitesse fixe.....	10
I.7.1.2 Eolienne à vitesse variable.....	10
I.7.2 Avantages et inconvénients	11
I.8 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne	11
I.8.1 Machines Asynchrones (MAS)	12
I.8.1.1 Machines Asynchrones à cage d'écureuil (MACE)	12
I.8.1.2 Machines Asynchrones à rotor bobiné (MARB).....	12
I.8.1.3 Machines Asynchrones doublement alimenté (MADA)	12
I.8.2 Machines synchrones (MS).....	12
I.8.2.1 Machines synchrones à rotor bobiné	13
I.8.2.2 Machines synchrones à aimant permanent	13
I.8.3 Les avantages et les inconvénients.....	14
I.8.3.1 Les avantage	14
I.8.3.2 Les inconvénients	14
I.8.4 Matériaux magnétiques pour les machines électriques à aimants permanents	15
I.8.4.1 Les aimants permanents.....	15
I.10 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	15

Table des matières

I.10.1 Avantages	15
I.10.2 Inconvénients	15
I.11 Conclusion	15

Chapitre II : Modélisation et simulation de conversion aérogénérateurs

II.1 Introduction	18
II.2 Modélisation du Système de Conversion d'Energie Eolienne	18
II.2.1 Le vent	18
II.2.2 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.....	19
II.2.2.1 Loi de Betz	20
II.2.2.2 Coefficient de puissance CP	21
II.3 Modélisation de la partie mécanique d'une éolienne	22
II.3.1 Action du vent sur les pales	23
II.3.2 La turbine	24
II.3.3 Le multiplicateur de vitesse	24
II.3.4 Arbre de transmission	25
II.4 Maximisation de puissance.....	26
II.5 Le schémas de simulation avec les résultats.....	27
II.6 Les résultats de simulation et interprétation	27
II.7 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents.....	29
II.8 Conclusion	31

Chapitre III : Commande vectorielle d'une MSAP

III.1 Introduction	33
III.2 Principe de la commande vectorielle de la MSAP.....	33
III.3 Modèle de la machine à commandée	33
III.4 Le découplage	34
III.5 La régulation	35
III.5.1 Régulation de courant id	36
III.5.2 Régulation de courant iq	38
III.5.3 Régulation de la vitesse ω	38
III.6 Modélisation de redresseur MLI	40
III.7 Commande de redresseur par la technique MLI triangulo-sinusoïdale.....	41

Table des matières

III.8 Le schéma globale de commande vectorielle du GSAP dédiée à l'éolienne	41
III.9 Les résultats de simulation	42
III.10 Conclusion.....	47

Chapitre IV: Commande Backstepping d'une MSAP

IV.1 Introduction.....	48
IV.2 Principe de la commande Backstepping	48
IV.2.1 Fonction de Lyapunov.....	48
IV.3 Conception de la commande Backstepping	49
IV.3.1. 1ère étape Calcul de la première commande virtuelle	49
IV. 3.2. 2ème étape - Calcul de la deuxième commande virtuelle	50
IV.3.3. La 3 ème étape - Calcul de la loi de commande finale.....	51
IV.4 Application du Backstepping à la commande du MSAP	52
IV.5 Résultats de simulation et interprétation	54
IV.6 Etude comparatif entre la commande vectorielle et Backstepping	58
IV.7 Conclusion	62
 Conclusion générale.....	 64

Liste des figures

Chapitre I

Fig. I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent..... 4
Fig. I.2 : principaux organes du système de conversion éolien..... 5
Fig. I.3 : Principe de fonctionnement d'une éolienne de rotor Savonius. 6
Fig. I.4 : Eolienne type Darrieux..... 7
Fig. I.5 : Eolienne horizontale tripale et multi-pale. 8
Fig. I.6 : Composants d'une éolienne..... 9
Fig. I.7 : Eléments d'une nacelle..... 10
Fig. I.8 : Eolienne couplée au GSRB connecte au réseau électrique à travers un système de conversion d'énergie. 13
Fig. I.9 : Eolienne couplée au GSAP connecte au réseau électrique à travers un système de conversion d'énergie. 14
Fig. I.10 : Les machines synchrone à aimant permanent à flux radiales et à flux axial..... 14

Chapitre II

Fig. II.1:Synoptique de reconstruction du vent. 19
Fig. II.2: Séquence de vent synthétique. 19
Fig. II.3 : Colonne d'air animée d'une vitesse V 20
Fig. II.4 : Tube de courant autour d'une éolienne. 21
Fig. II.5 : Différents parties mécaniques de l'éolienne. 22
Fig. II.6 : Eléments caractéristiques d'une pale 23
Fig. II.7 : Flux d'air sur un profil de pale..... 23
Fig. II.8 : Entrées-sorties du modèle de la turbine. 24
Fig. II.9 : Schéma bloc du modèle du Multiplicateur de vitesse..... 25
Fig. II.10 : Modélisation de l'arbre générateur. 26
II.4 Maximisation de puissance..... 26
Fig. II.11 : Schémas de simulation de la partie mécanique de l'éolienne. 27
Fig. II.12 : coefficient de puissance. 27
Fig. II.13 : Couple de la turbine en (N.m)..... 28
Fig. II.14 : Vitesse de la rotation de la turbine (rad/s)..... 28
Fig. II.15 : Puissance de la turbine en (watt)..... 28
Figure II.16 : Représentation symbolique de la MSAP 29

Chapitre III

Fig. III.1: Schéma fonctionnel d'un système réglé par un régulateur PI.	35
Fig. III.2 : Boucle de régulation du courant i_d	36
Fig. III.3 : Boucle de régulation du courant i_q	38
Fig. III.4 : Boucle de régulation de la vitesse ω	39
Fig. III.5: Schéma de l'association MSAP – Redresseur MLI.....	40
Fig. III.6:Schéma bloc de la technique triangulo-sinusoidale dans Matlab.	41
Fig. III.7:Schéma block représente la structure générale de commande vectorielle de GSAP.42	
Fig. III.8: La vitesse de rotation Ω (rad/s).	43
Fig. III.9: Le couple électromagnétique C_{em} (N.m).	43
Fig. III.10 : La Puissance générée en (watt).	44
Fig. III.11: Le courant I_q de la machine en (A).	44
Fig. III.12: Le courant I_d de la machine en (A).	45
Fig. III.13: La vitesse de rotation Ω (rad/s).	46
Fig. III.14: Le couple C_{em} (N.m).	46
Fig. III.15: La Puissance générée en (watt).	47
Fig. III.16: Le courant I_q de la machine en (A).	47
Fig. III.17: Le courant I_d de la machine en (A).	47

Chapitre IV

Fig. IV.1: Structure interne du bloc régulateur Backstepping.....	54
Fig. IV.2: La vitesse de rotation Ω (rad/s).	55
Fig. IV.3: Le couple mécanique C_{em} (N.m).	55
Fig. IV.4 : La Puissance générée en (watt).	55
Fig. IV.5: Le courant I_q de la machine en (A).	56
Fig. IV.6: Le courant I_d de la machine en (A).	56
Fig. IV.7: La vitesse de rotation Ω (rad/s).	58
Fig. IV.8: Le couple mécanique C_{em} (N.m).	58
Fig. IV.9 : La Puissance générée en (watt).	58
Fig. IV.10: Le courant I_q de la machine en (A).	59
Fig. IV.11: Le courant I_d de la machine en (A).	59

Liste des figures

Fig. IV.12: La vitesse de rotation Ω (rad/s).....	60
Fig. IV.13: Le couple C_{em} (N.m).	61
Fig. IV.14 : La Puissance générée en (watt).	61
Fig. IV.15: Le courant I_q de la machine en (A).....	61
Fig. IV.16: Le courant I_d de la machine en (A).....	62
Fig. IV.17: La vitesse de rotation Ω (rad/s).....	63
Fig. IV.18: Le couple C_{em} (N.m).	63
Fig. IV.19 : La Puissance générée en (watt).	64
Fig. IV.20: Le courant I_q de la machine en (A).....	64
Fig. IV.21: Le courant I_d de la machine en (A).....	64

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre I

Table I.1 : Avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical.....	7
Table I.2 : Avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal.	8
Table I.3 : Avantages et inconvénients des turbines à vitesse fixe et à vitesse variable.....	11

Introduction Générale

Introduction générale

La brûlure du soleil, la chaleur de la terre, l'ardeur du vent, la puissance de l'eau, la générosité des plantes, autant d'énergies infinies ou sans cesse régénérés qui cristallisent tous nos espoirs. L'engouement pour les énergies renouvelables est tel un vent frais de créativité semble inspirer, tous azimuts, la recherche publique et privée. Solaire thermique, photovoltaïque, géothermie, éolien, hydroélectricité, exploitation de la biomasse : les idées foisonnent encore dans les laboratoires [01].

De petites turbines de quelques dizaines de Watt en sites isolés aux grandes turbines de plusieurs MW en sites offshore raccordées au réseau électrique, la filière éolienne n'a pas encore dit son dernier mot et les performances des aérogénérateurs sont en permanente évolution profitant des dernières avancées technologiques dans le domaine de l'électronique de puissance, des machines électriques et des matériaux de construction [02]. Dans ce contexte, notre travail s'intéresse aux aérogénérateurs basés sur la machine synchrone à aimants permanents (MSAP).

Les Machines Synchrones à Aimants Permanents MSAP sont de plus en plus utilisées dans l'industrie parce qu'ils offrent beaucoup d'avantages par rapport aux autres types de machines à courant continu ou alternatif avec un couple massique élevé, un excellent rendement, une maintenance réduite, un faible moment d'inertie et une grande capacité de surcharge sur toute la plage de vitesse.

Dans des applications à vitesse variable qui nécessitent des réponses précises malgré différents types de perturbations et incertitudes paramétriques, les contrôleurs linéaires classiques comme les PI et PID sont difficiles à régler face à un problème de type non linéaire et ont des performances qui peuvent être améliorées par des techniques de commande non linéaire. Les dernières années ont connu des progrès rapides de la commande des systèmes non linéaires. En particulier plusieurs techniques de linéarisation exacte par changement de coordonnées et bouclage ont été appliquées pour la commande des machines synchrones. Ces techniques nécessitent la bonne connaissance des paramètres des systèmes, ce qui n'est pas en général le cas pour les machines électriques. Il existe de nombreux principes de commande des MSAP, parmi lesquels l'application des techniques de la commande vectorielle qui se distingue comme un outil puissant et efficace, dotant la MSAP de performances dynamiques aussi satisfaisantes que les MCC, mais posant entre autre un problème majeur dû à la variation des paramètres pendant le fonctionnement et les perturbations inconnues et par conséquent, la conservation de la nature non linéaire de la machine, la poursuite de trajectoires prédéterminées, la robustesse aux variations des paramètres et le rejet des

Introduction générale

perturbations inconnues avec une réponse performante sont les objectifs à satisfaire lors d'une mise en œuvre d'une stratégie de commande. On propose alors la synthèse d'une loi de commande utilisant une technique récursive, de type Backstepping.

Cette commande présente une procédure récursive qui combine entre le choix de la fonction de Lyapunov et la synthèse de la loi de commande. Cette méthode transforme le problème de synthèse de la loi de commande pour le système global en une synthèse de séquence de commande pour des systèmes réduits. En exploitant la flexibilité de ces derniers, le Backstepping peut répondre aux problèmes de régulation, de poursuite et de robustesse avec des conditions moins restrictives que d'autres méthodes [03].

Pour bien mener ce travail, le mémoire est devisé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous donnons une description générale des systèmes de production d'énergie éolienne, ainsi que des notions sur les différents constituants du système à étudier

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation du système d'énergie éolien étudié, il s'agit de représenter chaque constituant par son modèle mathématique, en commençant par la source du vent, la turbine en arrivant à la machine synchrone à aimant permanent,

Le troisième chapitre est consacré à la commande vectorielle, c'est une méthode qui se ramène à une structure de commande linéaire, permettant un découplage entre les variables de commande, reste la plus utilisée vu les performances dynamiques élevées qu'elle offre pour une large gamme d'applications.

Le quatrième chapitre porte essentiellement sur la commande non linéaire par Backstepping. Elle offre une méthode systématique pour effectuer la conception d'un contrôleur, pour des systèmes non linéaires. Une démonstration de la théorie du Lyapunov de la loi de commande sera détaillée.

En conclusion générale, nous faisons une synthèse du travail présenté, ainsi que des perspectives futures.

Chapitre I

Etat de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne

I.1 Introduction

Des intérêts considérables ont été offerts au domaine des énergies renouvelables ces dernières années à cause principalement des inquiétudes sur la pénurie énergétique au niveau mondial compte tenu de l'industrialisation massive, et la forte pollution environnementale engendrée par la combustion des matières fossiles [4], [5], [6].

La génération de l'énergie éolienne représente une solution importante qui pourrait mitiger ces problèmes grâce à ces impacts insignifiants sur l'environnement, et le fait que cette énergie est renouvelable et pourrait contribuer au développement dans le monde [5]. Ce chapitre présente une vue générale sur l'énergie éolienne, les Principaux organes du système de conversion ces avantages et inconvénients de l'énergie éolienne. Une brève présentation des différents types des machines électriques utilisées dans les aérogénérateurs sera abordée à la fin de ce chapitre.

I.2 Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, est un dispositif qui permet de transformer une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Fig. I.1) [7].

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière. De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [8].



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

II.3 Structure de la chaîne de conversion éolienne :

Notre chaîne de conversion éolienne est composée d'une turbine qui capte l'énergie cinétique du vent, une génératrice à aimant permanent qui transforme cette dernière en énergie électrique et d'un système de commande, d'un convertisseur statique. (Fig. I.2) [9].

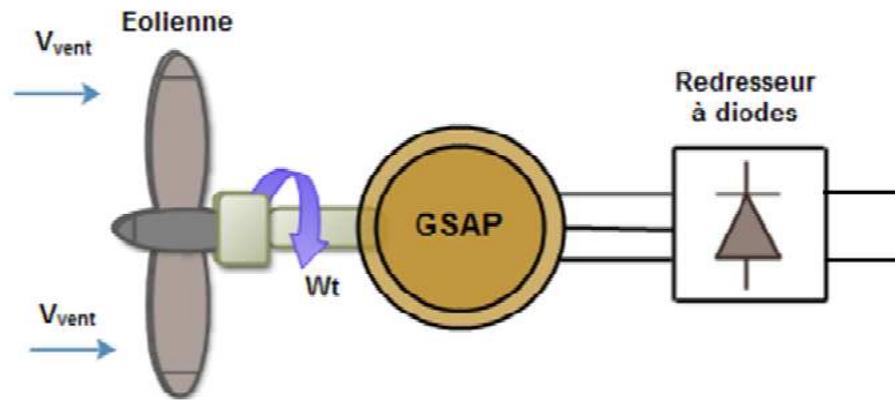


Fig. I.2 : principaux organes du système de conversion éolien [9].

I.4 Historique

Depuis plusieurs siècles (avant 3000 ans environ) l'énergie du vent, comme étant une source d'énergie inépuisable non polluante, a été exploitée. Avant que les énergies fossiles (le pétrole et le charbon) aient été découvertes, les Egyptiens et les Perses ont commencé à utiliser cette énergie pour le pompage d'eau [10].

Ensuite, des siècles avant les Européens l'homme servit des moulins à vent pour moudre le. Probablement, la première turbine à vent générant de l'électricité a été construite par le Danois Poul. La Cour en 1891. Parmi ces investissements, on cite le premier marché de la Californie au cours des années 1980-1986. Au début avec des turbines. De moyenne puissance 55 kW, puis 144 machines d'une puissance totale de 7 MW en 1981 et 4687 machines avec un total de 368 MW en 1985. Après ces années, l'industrie de l'éolienne a été développée dans des pays comme l'Allemagne, le Danemark et l'Espagne après le décollage du marché européen. En 1998, la contribution de ces trois pays au marché mondial atteint 10000 MW et en 2004 environ 47000 MW avec 7500 MW d'une croissance annuelle [11].

I.5 Différents types d'éolienne

On classe les éoliennes suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice appelée « Turbine » [13]. Il existe différentes façons de classer les turbines éoliennes qui appartiennent principalement à deux groupes selon l'orientation de leur axe de rotation [14]:

- Turbine éolienne à axe vertical.
- Turbine éolienne à axe horizontal.

I.5.1 Eolienne à axes vertical

L'axe de rotation de cette turbine éolienne est vertical par rapport au sol et perpendiculaire à la direction du vent. Ce type de turbine peut recevoir le vent de n'importe quelle direction, ce qui rend inutile tout dispositif d'orientation. Le générateur et la boîte d'engrenages sont disposés au niveau du sol, ce qui est plus simple et donc économique. La maintenance du système est également simplifiée dans la mesure où elle se fait au sol [15].

Il y a deux types d'éolienne à axes vertical :

- Eolienne de rotor Savonius.
- Eolienne de rotor Darrieux.

I.5.1.1 Eolienne de rotor Savonius

Dans leur principe de fonctionnement, le rotor d'éolienne Savonius est basé sur le principe de « traînée différentielle » utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur les faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il crée alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur (Fig. I.3) [16].

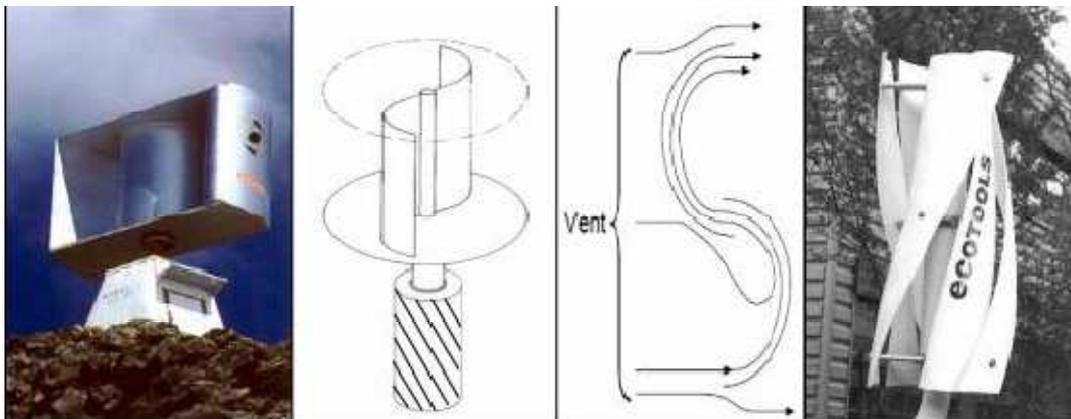


Fig. I.3 : Principe de fonctionnement d'une éolienne de rotor Savonius [17].

I.5.1.2 Eolienne de rotor Darrieux

D'après l'ingénieur français Georges Darrieux qui en breveta la conception en 1931. La compagnie américaine FloWind fabriquait cette éolienne jusqu'à 1997. Elle se caractérise avec ses 2 ou 3 pâles en forme de C [18].

L'éolienne de rotor Darrieux fonctionne grâce à l'utilisation de la force de portance qui se base sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil placé dans un écoulement

d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La combinaison de ces forces donne alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Le couple de démarrage de ce type d'éoliennes est proche de zéro, ce qui implique lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe, soit montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur (Fig. I.4) [19] [20].

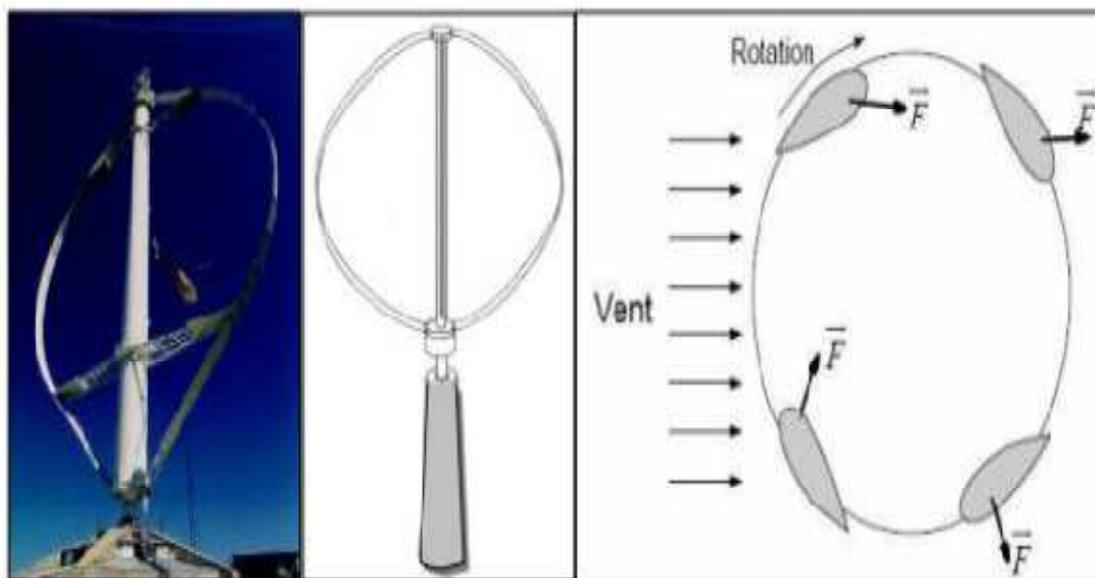


Fig. I.4 : Eolienne type Darrieux [17].

Table I.1 : Avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical [20].

Avantages	Inconvénients
La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.	Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui lui permet de fonctionner qu'elle que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.	La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.	Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

I.5.2 Eolienne à axes horizontal

La plupart des éoliennes actuellement installées utilisent des turbines à axe horizontal [13], [21]. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales (les plus courantes) et les multi-pales (Fig. I.5).

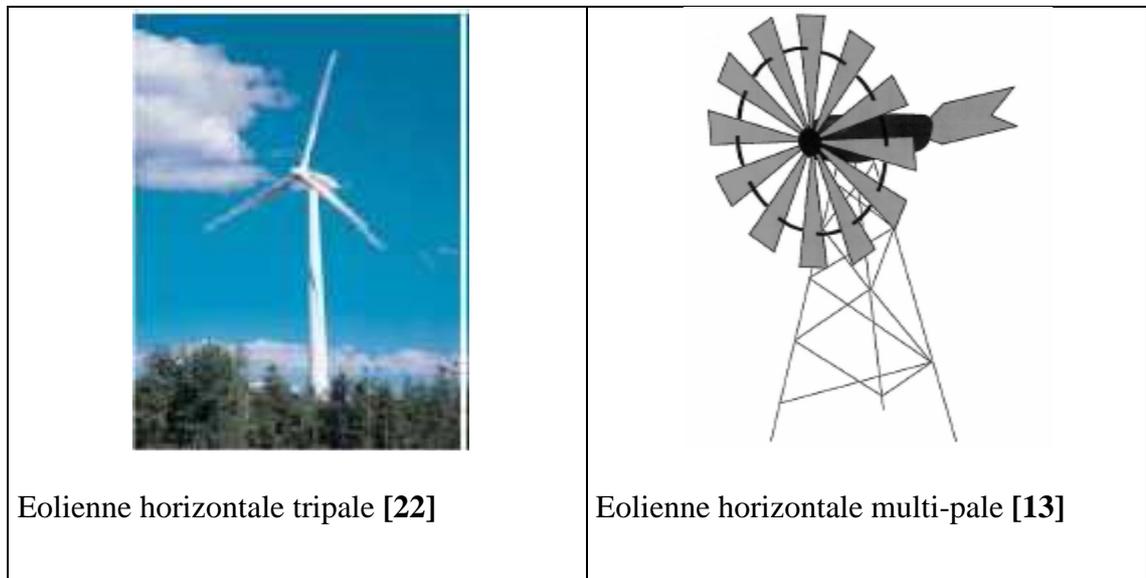


Fig. I.5 : Eolienne horizontale tripale et multi-pale.

Table I.2 : Avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal [23] [20].

Avantages	Inconvénients
Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.	Coût de construction très élevé.
Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.	L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.
Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.	

I.6 Principales composants d'une éolienne

La majorité des éoliennes installées dans le monde sont de turbine à axe horizontal [24]. On peut considérer trois composants essentiels dans ce type d'éolienne, le rotor, la nacelle et la tour, comme déterminé sur la (Fig. I.6) [13].

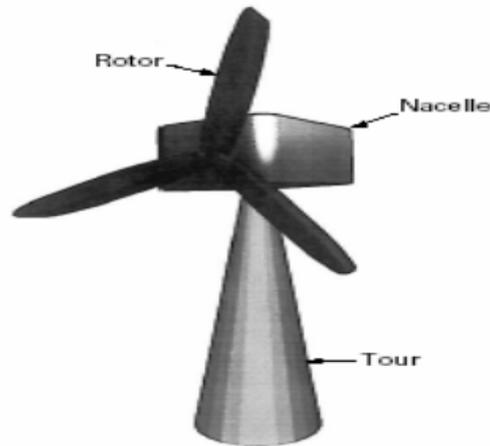


Fig. I.6 : Composants d'une éolienne [25].

I.5.1 La nacelle

C'est la partie l'essentielle de l'éolienne, elle contient les éléments de transmission mécanique entre le rotor et le générateur, aussi comprenant le multiplicateur et le système de freinage de sécurité ainsi que les équipements de mesures du vent. Elle est liée à la tour par une liaison de type pivot motorisée permettant de choisir son orientation et éventuellement de positionner l'éolienne au vent [24]. La (Fig. I.7) présente une coupe d'une nacelle avec ses différents composants :

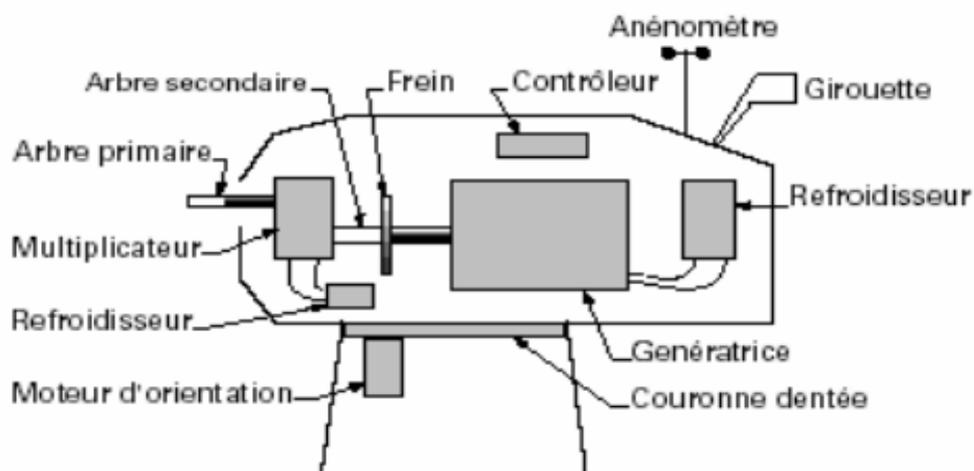


Fig. I.7 : Eléments d'une nacelle [13]

I.6.2 Le rotor

C'est le capteur d'énergie qui permet de transformer l'énergie du vent reçu en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué par des pales et de l'arbre primaire qui tourne à faible vitesse [26], [27].

I.6.3 La tour

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique. Il doit être la plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol [14].

I.7 Fonctionnement d'une éolienne

Les éoliennes sont construites pour la production de l'énergie électrique à un prix aussi bas que possible. Leurs conditions de fonctionnement dépendent essentiellement des conditions de vent sur lesquelles aucune action n'est possible. Par conséquent, on ne peut agir qu'en limitant, de manière optimale dans certaines conditions, et toujours de manière stricte dans d'autres conditions, l'énergie effectivement convertie par la turbine puis par le générateur électrique, avant transfert vers le réseau [28].

I.7.1 Eoliennes à vitesse fixe et variable [29]

Les turbines éoliennes peuvent également être classifiées à des turbines à vitesse fixe, et autres à vitesse variable.

I.7.1.1 Eoliennes à vitesse fixe

Les turbines à vitesse fixes tournent à une vitesse relativement constante. Cette vitesse est déterminée par le rapport du réducteur de vitesse, la fréquence du réseau électrique et le nombre de pôles de la génératrice. Ces turbines atteignent un rendement de conversion maximum uniquement pour une vitesse de vent donnée, et l'efficacité du système dégrade une fois la vitesse de vent change. La turbine à vitesse fixe est protégée par un contrôle aérodynamique des éventuelles rafales de vent, elle génère une puissance électrique très fluctuante par rapport aux autres sources d'énergies qui offrent une énergie constante dans le temps et facilement réglable.

I.7.1.2 Eolienne à vitesse variable

D'une autre part les turbines à vitesse variable, peuvent atteindre un rendement de conversion d'énergie sur une vaste plage de vitesse de vent. La turbine change constamment sa vitesse de rotation dépendamment de la vitesse du vent pour maximiser la puissance. Dans ce cas, la vitesse spécifique λ , qui représente la vitesse du bout de la pale par rapport à la vitesse du vent, peut être maintenue dans ces valeurs optimales de manière à réaliser une extraction maximale de la puissance électrique. Afin que la vitesse de la turbine soit ajustable, l'éolienne est connectée au réseau électrique via des convertisseurs de puissance.

I.7.2 Avantages et inconvénients

Le tableau ci-dessous représente les principaux avantages et inconvénients des turbines à vitesse fixe et à vitesse variable :

Table I.3 : Avantages et inconvénients des turbines à vitesse fixe et à vitesse variable.

Mode de fonctionnement	Avantages	Inconvénients
Vitesse fixe	<ul style="list-style-type: none"> • Simple, robuste, fiable. • Faible coût de construction et maintenance 	<ul style="list-style-type: none"> • Rendement de conversion d'énergie faible • Fort stress mécanique qui augmente le coût de la structure devant supporter ceci • Fluctuation importante de la puissance
Vitesse variable	<ul style="list-style-type: none"> • Fort rendement de conversion d'énergie • Puissance électrique de meilleure qualité • Stress mécanique réduit 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût et pertes supplémentaires dues à l'utilisation des convertisseurs • Contrôle du système plus compliqué

I.8 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne

Le domaine le plus utilisé des turbines éoliennes est aujourd'hui la production d'électricité. Pour cela, l'utilisation d'une machine électrique est nécessaire et indispensable. Les générateurs habituellement rencontrés dans les éoliennes sont présentés généralement dans la nacelle pour les éoliennes à axe horizontal. Différents types des machines électriques peuvent être utilisés pour la génération de puissance éolienne. Le choix de type de la machine utilisée pour chaque application, il dépend des facteurs techniques et économiques. Pour les petites puissances (< 20 kW), la simplicité et le coût réduit des générateurs synchrones à aimants permanents (GSAP) expliquent leur prédominance. Dans les applications de plus forte puissance, jusqu'à 2 MW environ, le générateur asynchrone (GAS) est plus courant et économique [14].

I.8.1 Machines Asynchrones (MAS)

L'utilisation de la machines Asynchrones est largement répandue dans le domaine de la production d'énergie renouvelable. Il existe trois types de Machine Asynchrone pouvant être couplés avec une éolienne : Machine Asynchrone à rotor bobine (MARB), Machines Asynchrones a double alimentation (MADA) et Machines Asynchrones a cage d'écureuil (MACE) [30].

I.8.1.1 Machines Asynchrones à cage d'écureuil (MACE)

La machine asynchrone à cage est la machine la plus utilisée dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne à cause de sa réversibilité, sa robustesse, son faible coût de construction vue l'absence du système de contact glissant qui ne nécessite que peu d'entretien et sa facilité de connexion au réseau. Ces caractéristiques ont permis la fabrication en grandes quantités et à très grande échelle de puissances de ce type de machines [31].

I.8.1.2 Machines Asynchrones à rotor bobiné (MARB)

Les machines asynchrones à rotor bobiné offrent un potentiel économique très attractif pour la variation de vitesse. Malgré un surcoût (construction plus complexe) par rapport à une machine à cage et la présence d'un système bagues-balais triphasé, elles permettent d'exploiter des variateurs électroniques de puissance réduite [25].

I.8.1.3 Machines Asynchrones doublement alimenté (MADA)

Pour cette machine, le rotor est bobiné et comporte des enroulements triphasés couplés en étoile associés à des bagues collectrices qui permettent d'alimenter ses enroulements. Le stator est identique à celui d'une machine asynchrone à cage. On connecte toujours le stator au réseau mais ici, au lieu de court-circuiter les enroulements rotoriques, on les alimente en alternatif à fréquence variable à partir du réseau [14].

I.8.2 Machines synchrones (MS)

La machine synchrone est composée d'un rotor et d'un stator. Le rotor représente la partie mobile et le stator la partie fixe de la machine. Dans le fonctionnement en mode générateur, le stator comporte un ensemble de trois bobinages qui alimentent une charge externe, alors que le rotor produit le champ magnétique nécessaire au fonctionnement du générateur. Le champ magnétique du rotor est créé soit par des aimants permanents insérés sur la surface du rotor, soit par un courant continu qui circule dans un bobinage d'excitation

solidaire du rotor (électroaimant). Suivant la composition du rotor on distingue deux types de générateurs synchrones : le générateur synchrone à aimants permanents et le générateur synchrone à rotor bobiné [30].

I.8.2.1 Machines synchrones à rotor bobiné

La fréquence de la tension générée aux bornes du stator du GSRB est variable en fonction de la vitesse du rotor, Cette dernière, dépend de la vitesse du vent. La vitesse du vent est fluctuante et par conséquent la vitesse de rotation de l'éolienne n'est pas constante. Le champ tournant rotorique est créé par un enroulement alimenté en courant continu (roue polaire) au moyen d'un redresseur connecté au réseau [31]. Nous voyons que la connexion directe du GSRB avec le réseau électrique est impossible. Pour cette raison, la connexion est faite à l'aide d'un système de conversion énergie comme celui de la (Fig. I.8) [30].

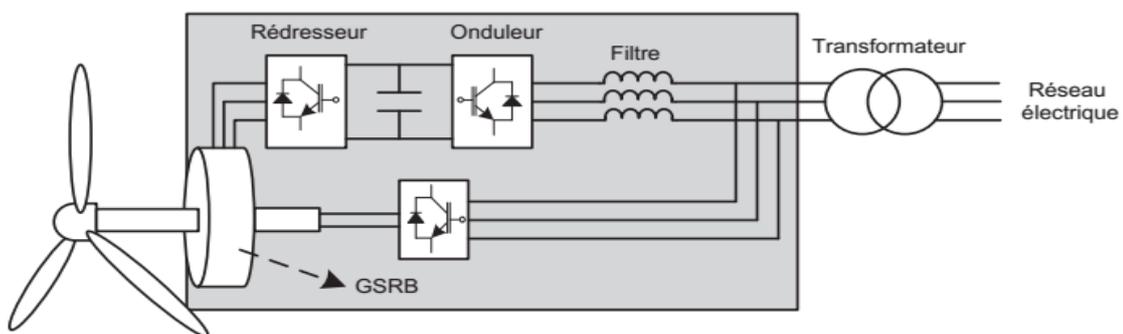


Fig. I.8 : Eolienne couplée au GSRB connecte au réseau électrique à travers un système de conversion d'énergie.

I.8.2.2 Machines synchrones à aimant permanent

La fréquence de la tension produite par le GSAP dépend de sa vitesse de rotation comme dans le cas précédent. Il ne peut donc ne pas être connecté directement au réseau électrique [30]. Ce type de générateur utilise un aimant permanent à rotor multi-pôles, ce qui donne l'avantage d'avoir un grand couple massique. Donc la machine ne consomme pas d'énergie réactive dans le rotor [31], comme celui de la (Fig. I.9).

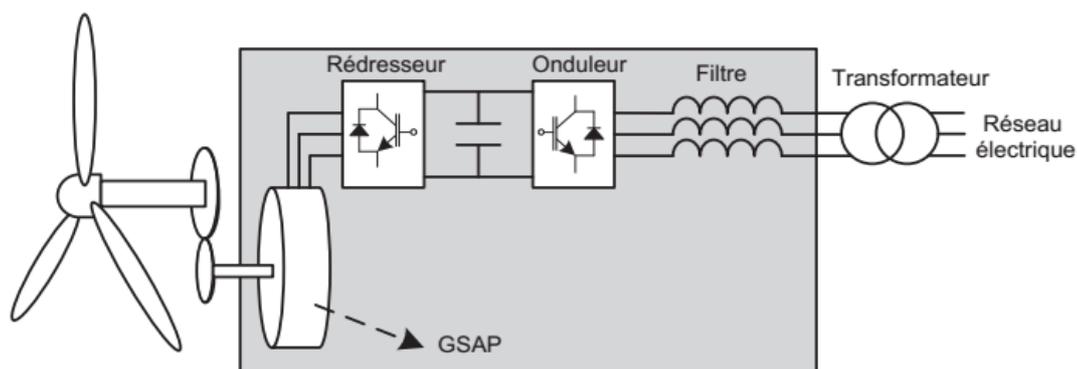


Fig. I.9 : Eolienne couplée au GSAP connecte au réseau électrique à travers un système de conversion d'énergie [30].

Il existe plusieurs types de ces machines destinées aux applications éoliennes comme : les générateurs à flux radiales, et à flux axial.

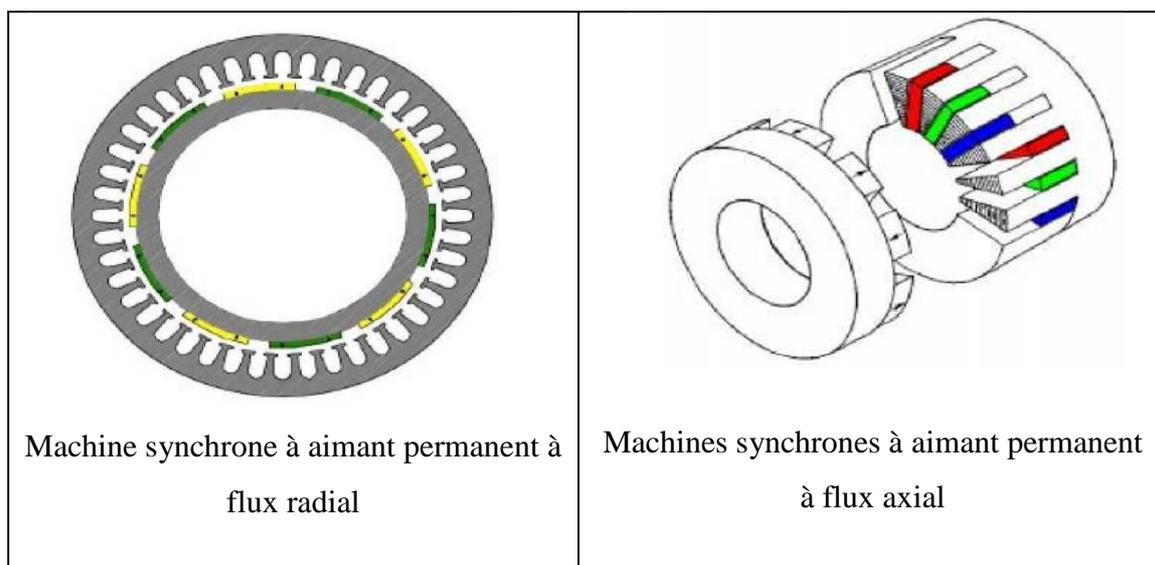


Fig. I.10 : Les machines synchrones à aimant permanent à flux radiales et à flux axial [32].

I.8.3 Les avantages et les inconvénients

La machine synchrone à aimants permanents possède plusieurs avantages et inconvénients par rapport aux autres machines à courant continu, asynchrone, synchrone à excitation électrique [33].

I.8.3.1 Les avantages

On cite les avantages suivants:

- rendement et facteur de puissance élevés.
- Puissance massique important.

- Une capacité à fonctionner à haute, voire très haute vitesse.
- Augmentation de la fiabilité.
- Absences des contacts glissants.

I.8.3.2 Les inconvénients

Comme inconvénients on indique :

- Ondulation de couple, coût élevé des aimants, technologie coûteuse, survitesse pénalisante.
- Risque de désaimantation (irréversible) : limite de température maximale.
- Interaction magnétique due au changement de structure.
- Pertes par courants de Foucault dans les aimants.

I.8.4 Matériaux magnétiques pour les machines électriques à aimants permanents

Les matériaux magnétiques jouent un rôle essentiel pour la conversion électromécanique [34].

I.8.4.1 Les aimants permanents [35]

Les aimants sont des matériaux magnétiques durs, caractérisés par une induction rémanente B_r , un champ coercitif de l'aimantation H_c , et une énergie spécifique maximale $(BH)_{max}$. D'un point de vue macroscopique, l'état magnétique d'un aimant est décrit par trois vecteurs :

- L'induction magnétique \vec{B} .
- le champ magnétique \vec{H} .
- l'aimantation \vec{M} .

I.10 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

I.10.1 Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles.
- L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement.
- L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire.

I.10.2 Inconvénients

- La nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux.
- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés [12].

I.11 Conclusion

Dans le présent chapitre, un état de l'art sur l'énergie éolienne et une étude descriptive de l'ensemble des éléments constituant la chaîne de conversion d'énergie éolienne a été présentée. Aussi, les différentes structures des éoliennes existantes et leurs technologies, leurs systèmes mécaniques de régulation, ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients ont été affichés et discutés.

Après avoir présenté les différentes génératrices utilisées dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne. La suite de ce travail est principalement consacrée à la modélisation de la chaîne de conversion éolienne.

Chapitre II

Modélisation et simulation de conversion aérogénérateurs

II.1 Introduction

Afin de pouvoir étudier le système de conversion d'énergie éolienne de petite puissance sur une plateforme de simulation, il est nécessaire de modéliser mathématiquement les différents constituants de notre système (turbine, MSAP, convertisseur). Toutefois, le modèle doit décrire la dynamique mécanique réelle de la voilure, et non pas uniquement le comportement quasi-statique aussi la modélisation de la GSAP traduit les phénomènes électromagnétiques et mécaniques qui régissent son fonctionnement. Ce qui permet d'étudier avec pertinence le comportement des différentes variables en mode dynamique et statique et exploiter ce modèle dans les simulations.

II.2 Modélisation du Système de Conversion d'Énergie Eolienne

L'aérogénérateur transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de rotation, cette énergie mécanique est alors utilisée pour faire tourner un générateur électrique et produit de l'électricité. Pour l'emploi efficace de cette ressource (le vent) il est indispensable d'étudier les caractéristiques aérodynamiques de la turbine utilisée et le vent lui-même [36].

II.2.1 Le vent

L'énergie cinétique du vent est l'élément primaire et fondamental du système de conversion d'énergie éolienne. Le vent est un champ de déplacement de masses d'air caractérisé par une vitesse variable et une direction aléatoire. Son déplacement au niveau de la turbine éolienne crée des forces sur les surfaces de ses pales, qui génèrent un mouvement rotatif du dispositif [31].

La vitesse du vent en un point de l'espace $V(t)$ est la résultante de deux composantes, l'une $V_0(t)$ varie lentement [37] et régulièrement sur de plus longues périodes dans un site donné [7], alors que l'autre $V_T(t)$ varie en turbulence en fonction de temps. Son expression est donnée par la formule (II. 1) [37].

$$V(t) = V_0(t) + V_T(t) \quad (\text{II. 1})$$

L'aéro-turbine 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 (G_f) est donnée par la formule (II. 2):

$$G_f = \frac{1}{1 + \tau \cdot s} \quad (\text{II. 2})$$

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 ($\tau = 0.11375s$) [7].

Avec : $\tau = \gamma \cdot (R_t/V_{moy})$.

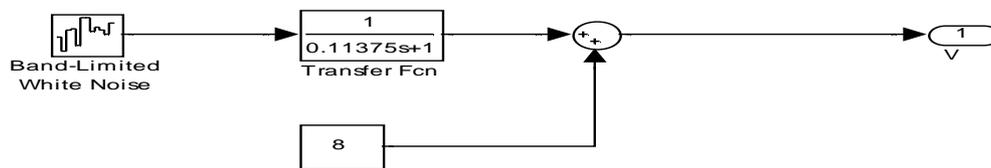


Fig. II.1: Synoptique de reconstruction du vent.

La figure suivante représente une séquence de vent générée par le modèle Simulink de la Fig. II.2 avec une vitesse moyenne de vent $V_0(t) = 8m/s$.

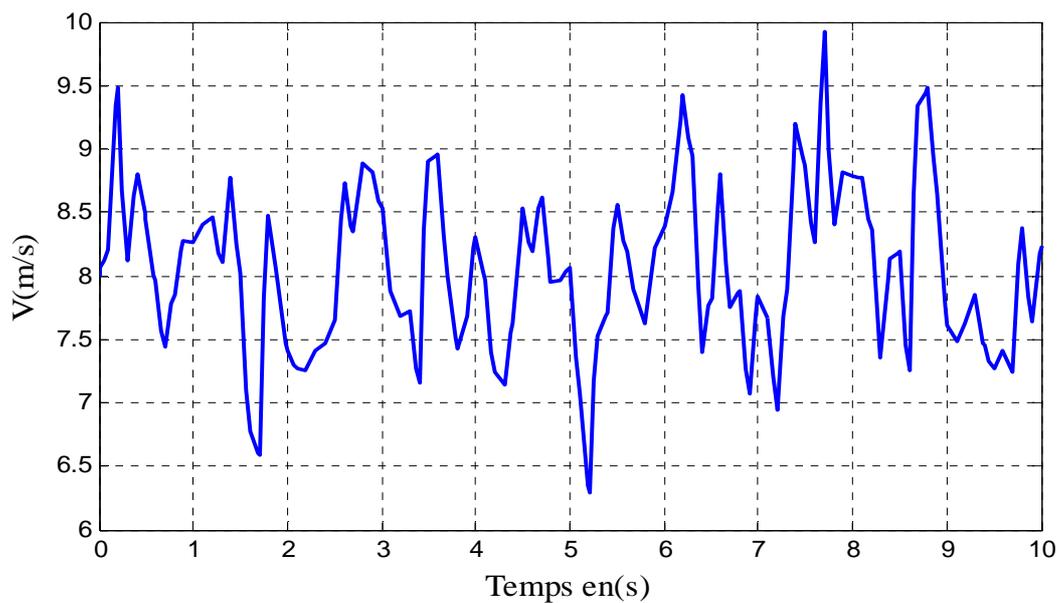


Fig. II.2: Séquence de vent synthétique.

II.2.2 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

Soit une colonne d'air élémentaire de longueur dx , de section S , de masse volumique ρ , animée d'une vitesse V , (Fig. II.3) s'écrit [25], [38]:

$$dE_C = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot dx \cdot V^2 \quad (\text{II.3})$$

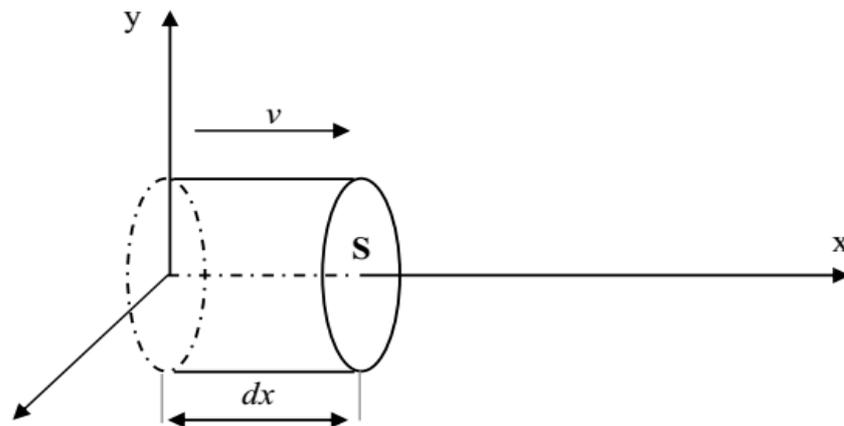


Fig. II.3 : Colonne d'air animée d'une vitesse V .

La puissance de vent disponible P_v extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps [25].

En supposant $dx=V.dt$, on déduit l'expression de P_v :

$$P_v = \frac{dE_C}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (\text{II.4})$$

ρ : masse volumique de l'air (Kg/m^3).

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

E_C : Énergie cinétique du vent en joules.

$S = \pi \cdot R^2$: la surface du l'arbre de turbine en (m^2).

II.2.2.1 Loi de Betz

La formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par l'unité de temps (seconde) [39].

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure II.5, sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 , soit V_{12} [20], [40].

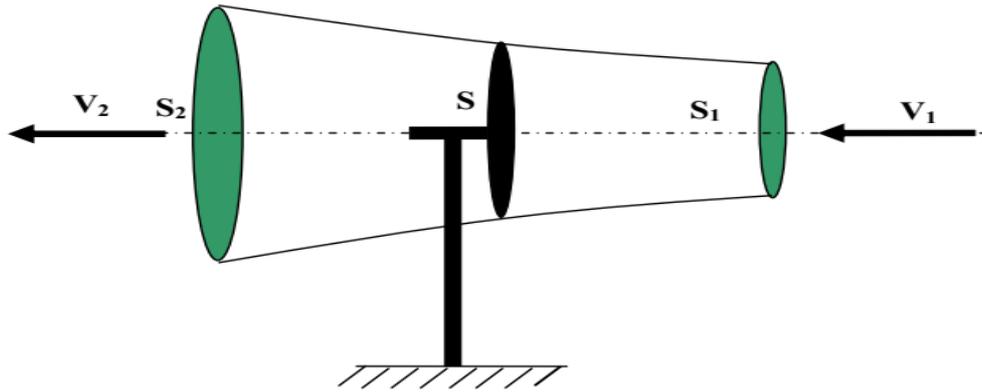


Fig. II.4 : Tube de courant autour d'une éolienne [25].

La masse d'air en mouvement traversant ce tube en une seconde est donnée par le produit de la densité d'air, la surface, et la vitesse moyenne [13], [41].

$$m_0 = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{II.5})$$

La puissance récupérable P_t est la puissance réelle extraite par le rotor des pales qui signifie la différence des puissances du vent en amont et en aval [13].

$$P_t = \frac{m_0 \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{II.6})$$

Soit en remplaçant m_0 par son expression dans (II.6) :

$$P_t = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 - V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{II.7})$$

La puissance totale théoriquement disponible sur la surface S est extraite sans diminution de vitesse de vent en mettant $V_2 = 0$ dans l'expression (II.7) :

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot V_1^3}{2} \quad (\text{II.8})$$

II.2.2.2 Coefficient de puissance C_p

On définit le coefficient de puissance, le rapport entre la puissance extraite du vent (récupérable) et la puissance totale théoriquement disponible [13], [26], [41].

$$C_p = \frac{P_T}{P_v} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_2}{V_1}\right)\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right)}{2} \quad (\text{II.9})$$

Le coefficient de puissance présente un maximum de $\frac{16}{27}$ soit 0,59. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent

donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant la vitesse relative est le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [40].

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V} \quad (\text{II.10})$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} R: \text{ Rayon de la surface balayée en m.} \\ V: \text{ Vitesse de vent en m/s.} \\ \Omega_t: \text{ Vitesse de rotation avant multiplicateur en rad/s.} \end{cases}$$

Dans notre travail on utilise cette formule du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative λ et l'angle de calage β [31]:

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.167(\beta - 2)) \cdot \sin\left(\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)}\right) - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2). \quad (\text{II.11})$$

II.3 Modélisation de la partie mécanique d'une éolienne [7]

Dans cette partie, on modélise la turbine éolienne, le multiplicateur de vitesse et l'arbre de transmission :

- La turbine éolienne se compose de 3 pales orientables.
- Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique.
- L'arbre est relié la partie mécanique à la partie électrique autrement dit relie la turbine au générateur.

La figure II.5, ci-dessous représente différents composants de la partie mécanique :

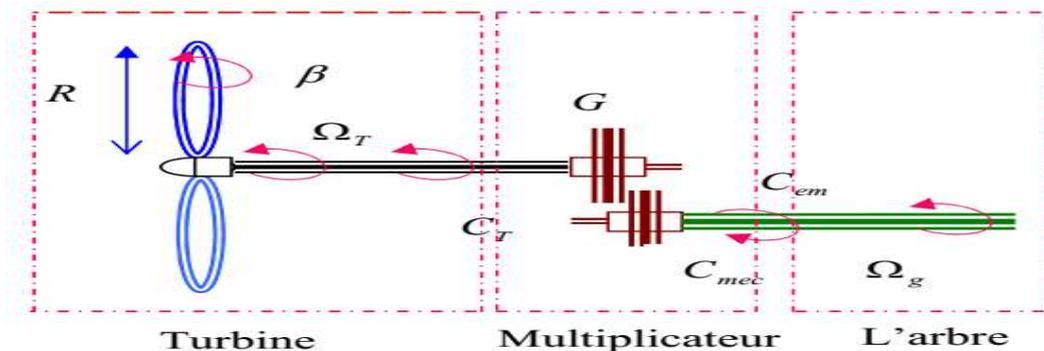


Fig. II.5 : Différents parties mécaniques de l'éolienne.

II.3.1 Action du vent sur les pales

L'action de l'air en mouvement va se traduire par des forces appliquées en chaque point de la surface [42]. Les pales ont un profil aérodynamique présenté sur le schéma de la Figure II.6.

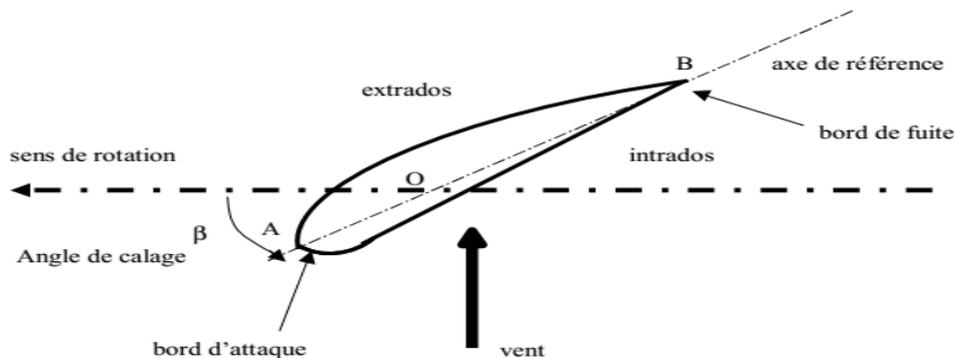


Fig. II.6 : Eléments caractéristiques d'une pale [43].

On remarque plus particulièrement les éléments suivants [43]:

- extrados : dessus de la pale.
- intrados : dessous de la pale.
- corde : longueur l du profil du bord d'attaque au bord de fuite.
- angle de calage β : l'angle entre le plan de rotation et la corde du profil [29].

Les profils sont généralement de type plan-convexe (l'intrados est plan alors que l'extrados est convexe) ou alors biconvexe (l'intrados et l'extrados sont convexes) [43].

Le système de réglage aérodynamique se base sur le principe de l'augmentation de l'angle de calage β ce qui diminue la valeur du facteur de puissance d'où une diminution du rendement de la turbine, ceci empêche l'augmentation de la vitesse de rotation de l'aérogénérateur, comme illustrée sur la figure II.7 [36] :

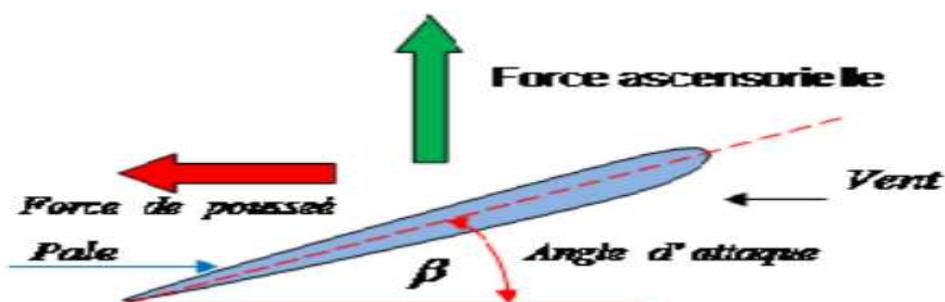


Fig. II.7 : Flux d'air sur un profil de pale.

II.3.2 La turbine

La turbine assure une transformation d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Elle est composée de trois pales qui pivotent sur les axe d'un angle β [31], [44]. Le vent de vitesse V , appliqué sur les pales de l'éolienne, entraîne sa mise en rotation et crée une puissance mécanique sur l'arbre de la turbine [45].

En combinant les équations (II.8), (II.9), et (II.10), la puissance mécanique P_T disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi [35]:

$$P_T = C_P \cdot P_V = \frac{1}{2} \cdot C_P(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 \quad (\text{II.12})$$

D'où l'expression du couple :

$$C_T = \frac{P_T}{\Omega_T} = \frac{R \cdot P_T}{\lambda \cdot V} = \frac{C_P}{2 \cdot \lambda} \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot V^2 \quad (\text{II.13})$$

Où :

C_T : Couple de la turbine éolienne (N.m).

Le coefficient de puissance C_P représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne et dépend également de la caractéristique de la turbine [45].

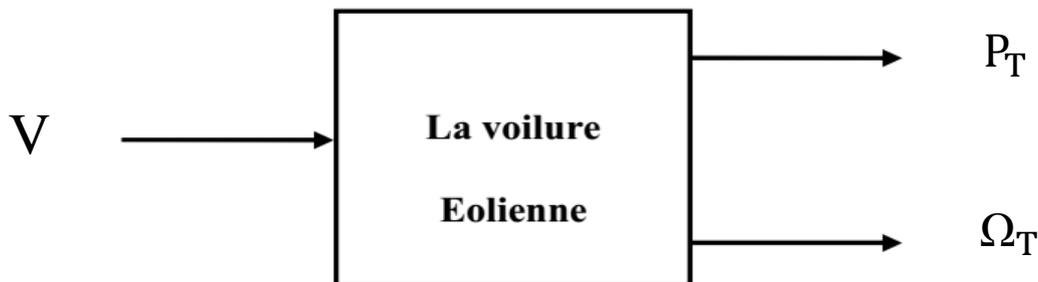


Fig. II.8 : Entrées-sorties du modèle de la turbine.

II.3.3 Le multiplicateur de vitesse

En introduisant le Gain de multiplicateur de vitesse G sur l'équation (II.13) on aura :

$$\Omega_g = G \cdot \Omega_t, \quad \text{et} \quad C_g = \frac{C_T}{G} \quad (\text{II.14})$$

$$\text{Donc :} \quad C_g = \frac{P_T}{\Omega_g} \quad (\text{II.15})$$

Où $\left\{ \begin{array}{l} \Omega_g: \text{Vitesse de rotation après multiplicateur en (rad/s).} \\ C_g: \text{Couple après multiplicateur (N.m).} \\ G : \text{Gain de multiplication.} \end{array} \right.$

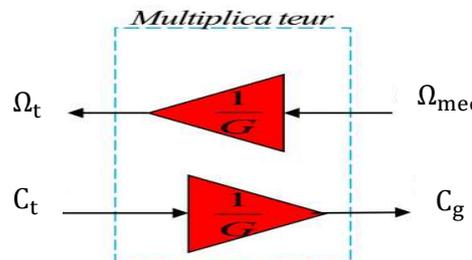


Fig. II.9 : Schéma bloc du modèle du Multiplicateur de vitesse.

II.3.4 Arbre de transmission [47]

L'équation fondamentale du moment du couple dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse à partir du couple mécanique total C_{mec} appliqué au rotor [25]:

$$J \frac{d\Omega_g}{dt} = C_{mec} \tag{II.16}$$

Où :

J : est l'inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice.

Le couple mécanique est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f \tag{II.17}$$

C_{mec} : Le couple électromagnétique développé par la génératrice en (N.m).

C_g : Le couple après le multiplicateur en (N.m).

C_{em} : Le Couple électromagnétique de la génératrice en (N.m).

C_f : Le couple résistant dû aux frottements en (N.m).

$$C_f = f \cdot \Omega_g \tag{II.18}$$

On aura :

$$J \frac{d\Omega_g}{dt} + f \cdot \Omega_g = C_g - C_{em} \tag{II.19}$$

Où :

f : le coefficient de frottement total du couplage mécanique.

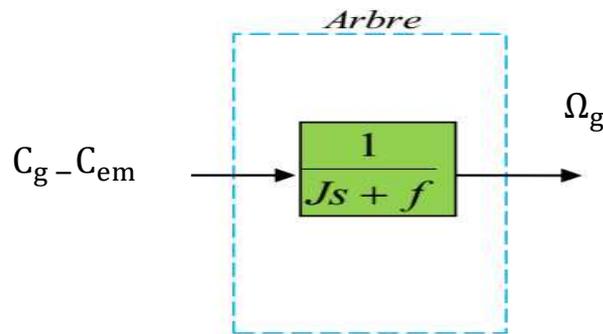


Fig. II.10 : Modélisation de l'arbre générateur.

II.4 Maximisation de puissance

MPPT classique nous facilite la recherche du point maximum de puissance, en connaissant la caractéristique de la voilure éolienne, cette méthode nous permet de se rapprocher rapidement de l'optimum à l'aide des mesures simples, internes au convertisseur mécano – électrique, c'est-à-dire sans utilisation de capteur de vitesse du vent [48], [19].

La courbe spécifique d'une turbine tripalpe possède une forme en cloche. Le sommet de cette courbe est équivalent à la puissance maximale. Il est caractérisé par la vitesse réduite optimale (λ_{opt}) et le coefficient de puissance maximal (C_{p-opt}). La valeur de la vitesse du vent d'après l'équation est égale à :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{v} \quad (\text{III.20})$$

L'expression de la puissance en fonction de la vitesse de la turbine :

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot \rho C_p(\lambda) \cdot S \cdot \frac{R^3}{\lambda^3} \cdot \Omega_t^3 \quad (\text{III.21})$$

Si on divise cette dernière sur la vitesse de rotation, on aura l'expression du couple :

$$C_t = \frac{1}{2\lambda^3} C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \Omega_t^2 \quad (\text{III.22})$$

On considère que les conditions sont optimales (à puissance optimale) alors l'équation (III.22) permet le calcul de la valeur optimale du couple :

$$C_{t-opt} = K_{opt} \cdot \Omega_t^2 \quad (\text{III.23})$$

$$\text{Avec : } K_{opt} = \frac{1}{2\lambda_{opt}^3} C_{pmax} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \quad (\text{III.24})$$

II.5 Le schémas de simulation avec les résultats

Notre schéma bloc de la turbine d'éolienne utilisée est représenté comme ci-dessous :

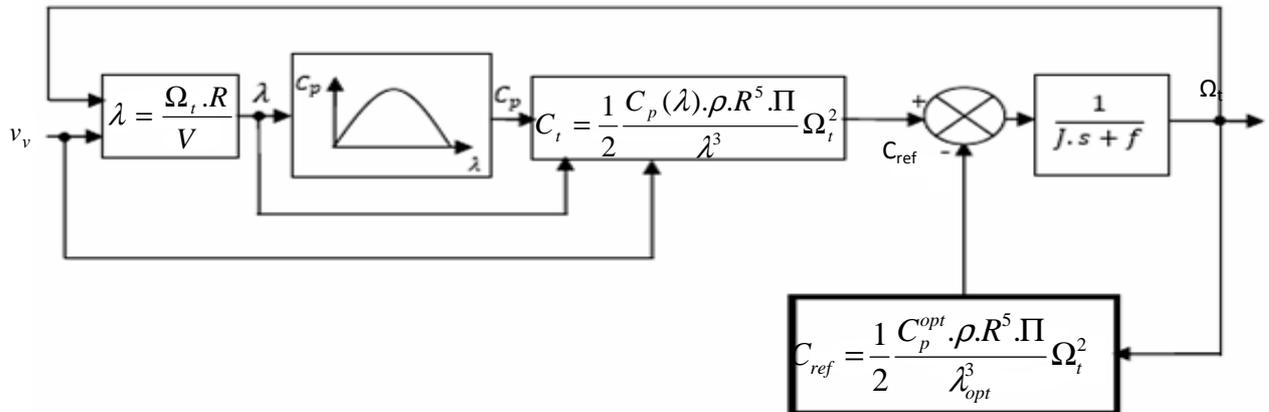


Fig. II.11 : Schémas de simulation de la partie mécanique de l'éolienne.

II.6 Les résultats de simulation et interprétation

Les résultats ci-dessous obtenus avec une vitesse du vent variable, et de vitesse moyenne égale $V_{moy} = 8\text{m/s}$.

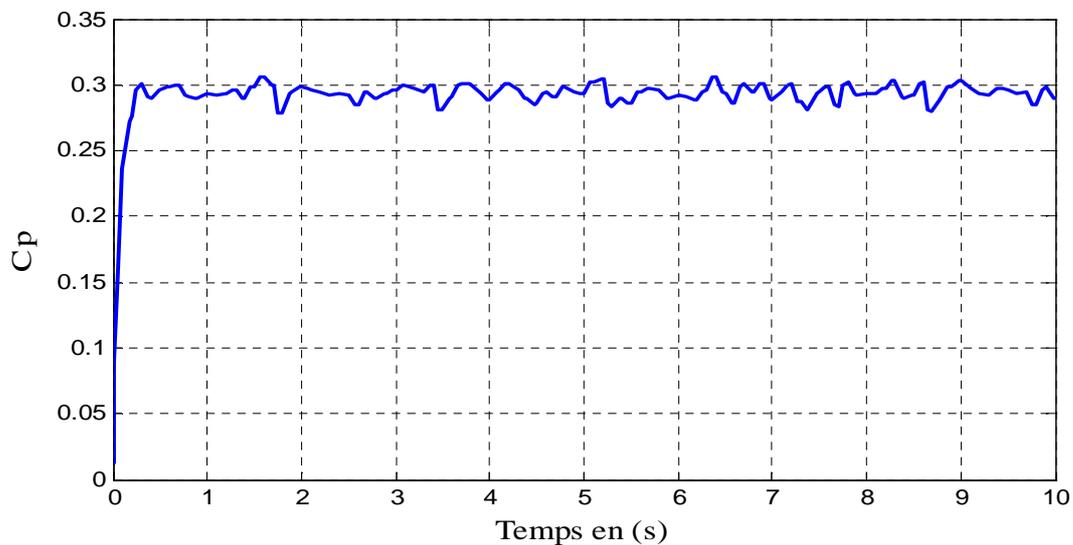


Fig. II.12 : coefficient de puissance.

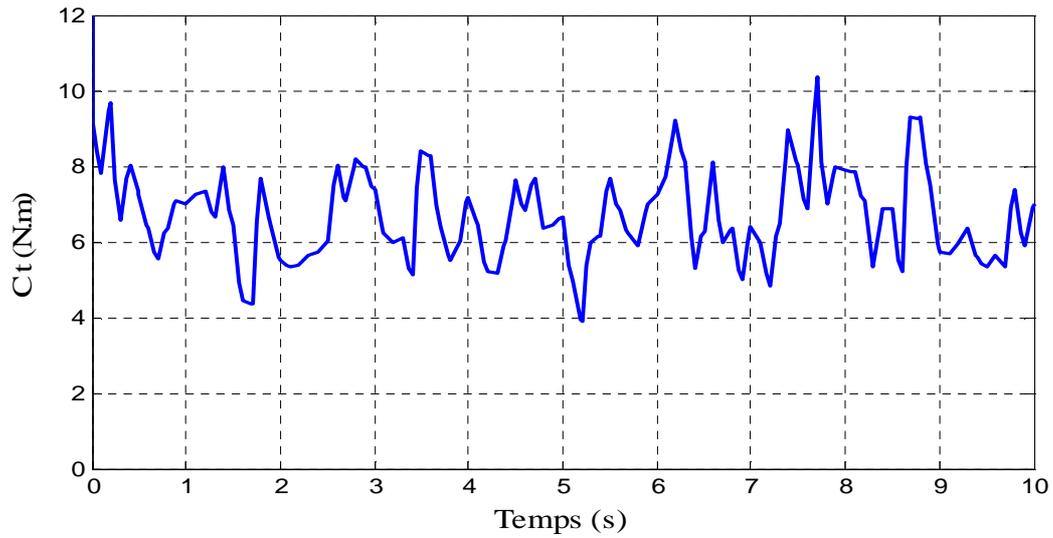


Fig. II.13 : Couple de la turbine en (N.m).

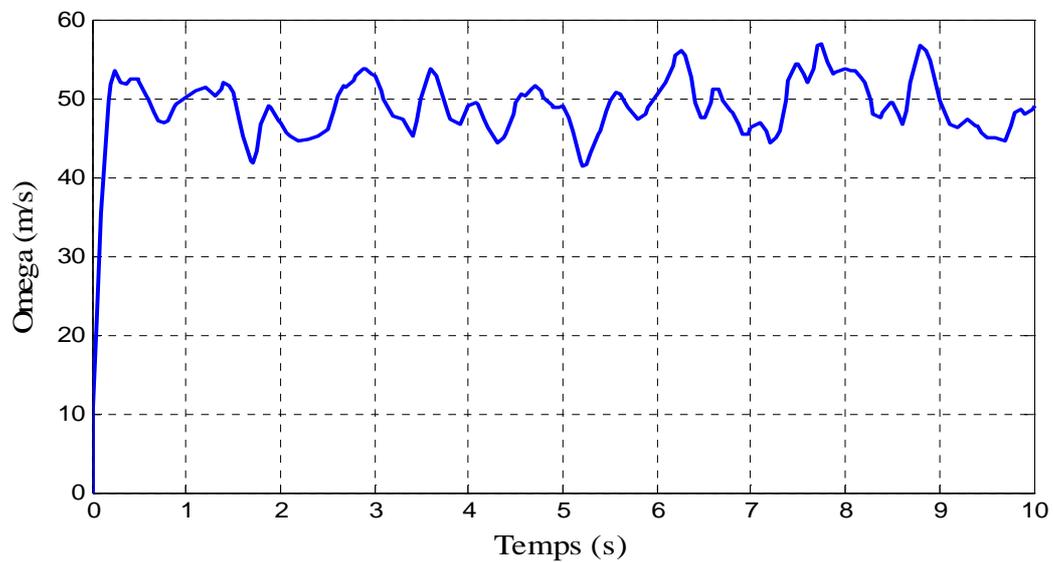


Fig. II.14 : Vitesse de la rotation de la turbine (rad/s).

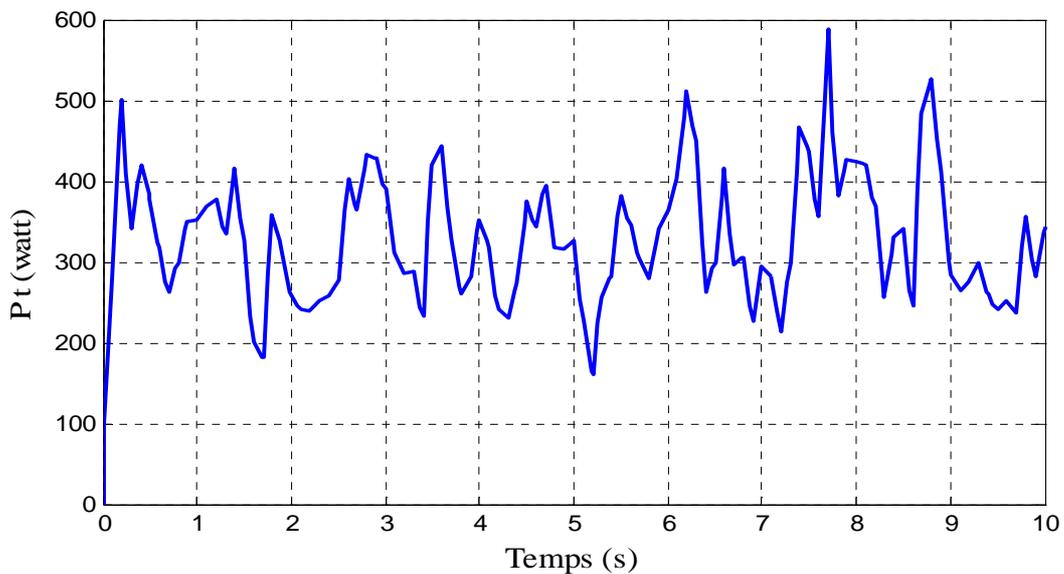


Fig. II.15 : Puissance de la turbine en (watt).

La figure (II.12) représente l'évolution du coefficient de puissance C_p en fonction du temps, qui est constant même avec la variation de la vitesse du vent. Donc le fonctionnement à puissance maximale est respecté.

On remarque que la vitesse de rotation de la turbine suit celle du vent, de même cas pour la puissance ce qui est expliqué par la transformation de la puissance cinétique du vent en puissance mécanique sur l'arbre de transmission.

II.7 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

La modélisation de la génératrice synchrone et primordiale pour concevoir des systèmes de commandes performantes, ceci consiste à décrire son comportement par un modèle mathématique, la génératrice à aimant permanent dans sa configuration exacte est complexe.

La structure générale d'une machine synchrone bipolaire à aimants permanents est présentée par la figure (II.16) :

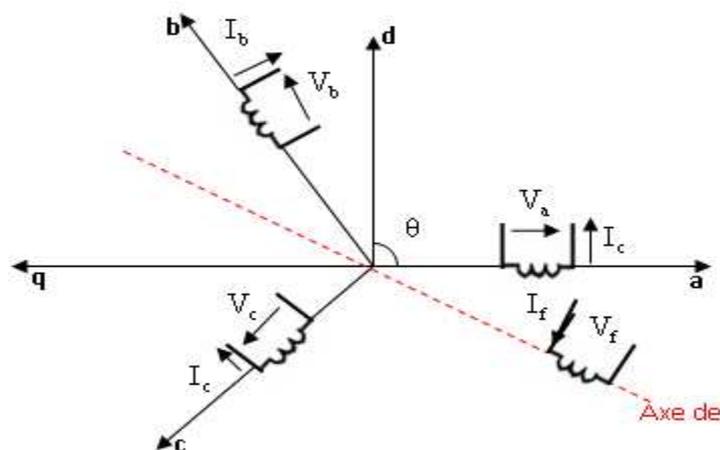


Figure II.16 : Représentation symbolique de la MSAP

Il s'agit d'une machine multi pôle. Lors de la modélisation, un certain nombre d'hypothèses simplificatrices ont été adoptées, permettant ainsi une mise en équations particulièrement simple [49].

- La non saturation du circuit magnétique.
- La perméabilité des aimants est considérée comme proche de celle de l'air. Le rotor est donc (à pôle lisse, $L_d=L_q=L$) du point de vue magnétique et les inductances sont indépendantes de la position du rotor.
- La tension magnéto motrice engendrée par les trois phases est à répartition sinusoïdale.
- Les pertes fers et l'effet amortisseur sont négligés.
- Les équations de la machine sont établies en convention moteur.

A. Equations électriques et magnétiques de la machine

• Equations des tensions et du couple

La machine étudiée est une machine synchrone à aimants permanents à rotor lisse, dont les aimants sont disposés sur la surface du rotor. Le neutre est isolé et la somme instantanée des courants de phase est nulle.

Les équations des tensions (convention moteur) sont données par :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L_c \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Où :

$v_{a,b,c}$: Les tensions de phase de la machine ;

$i_{a,b,c}$: Les courants de phase de la machine ;

L : L'inductance ;

R_s : Résistance de l'enroulement statorique ;

$E_{a,b,c}$: Représentent les f.é.m induites dans les enroulements de phase du stator.

- L'expression du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{em} = \frac{P}{\omega} (E_a \cdot i_a + E_b \cdot i_b + E_c \cdot i_c) \quad (\text{II.26})$$

Où :

p : Le nombre de paire de pôle,

ω : La vitesse du rotor avec ($\omega = p \cdot \Omega$).

La résolution de L'équation matricielle de la machine obtenue est trop complexe; pour simplifier cette équation, on fait appel la transformation de Park, qui permet une économie considérable du temps de calcul.

• Application de la transformation de Park aux équations de la MSAP

En reportant la transformation de PARK, dans le système d'équations (II.25), on obtient l'équation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega L \\ \omega L & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

L'expression des f.é.m est donnée par:

$$\begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \phi_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

Ou : Φ_f est le flux de l'aimant permanent.

- L'expression du couple :

$$C_{em} = \frac{P}{\omega} (E_d I_d + E_q I_q) \quad (\text{II.29})$$

- Le système d'équations (II. 27) devient :

$$\begin{cases} V_d = R_s I_d + L \frac{dI_d}{dt} - L I_q \omega \\ V_q = R_s I_q + L \frac{dI_q}{dt} + (L I_d + \phi_f) \omega \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

- L'expression du couple se réduit à :

$$C_{em} = \frac{P}{\omega} (E_q I_d) = p \phi_f I_q \quad (\text{II.31})$$

II.8 Conclusion

Ce chapitre à été consacré à la modélisation des différents composants de la chaîne de conversion éolienne, à partir des modèles mathématiques existant dans le littérature, puis évaluer les caractéristiques de chaque élément du système. On a constaté que la caractéristique de l'éolienne est fortement non linéaire, pour cela on a insérer un régulateur MPPT pour extraire le maximum de puissance. A fin d'améliorer le rendement totale de notre système, nous allons commander la MSAP, ce qui fera l'objectif de chapitre prochaine.

Chapitre III

Commande vectorielle d'une MSAP

III.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter les structures de commande pour une MSAP, définie dans un référentiel tournant (d, q). Nous choisissons de travailler avec une commande vectorielle dans le repère de Park associée à une stratégie de MLI et en utilisant un redresseur MLI qui va développer une combinaison adéquate de ces interrupteurs pour assurer la bonne commande de la MSAP. Dans une première partie nous présenterons le principe de la commande vectorielle appliquée à la MSAP. Ensuite nous développons un modèle de simulation sur Matlab-Simulink.

III.2 Principe de la commande vectorielle de la MSAP

Le principe de base de la commande vectorielle a été proposé par BALSCHKE et HASSE dans les années 70. Cette commande consiste à orienter le vecteur courant et le vecteur flux afin de rendre le comportement de la machine synchrone similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée. Le but de la commande vectorielle appliquée à la MSAP est d'éliminer le problème de couplage entre l'induit et l'inducteur [50].

Il nécessite de placer le système dans le référentiel (d, q). Habituellement, la composante d'axe (d) du courant statorique joue le rôle de l'excitation et permet de régler la valeur du flux dans la machine. La composante d'axe (q) joue le rôle du courant d'induit et permet de contrôler le couple [51]. La stratégie de commande la plus souvent utilisée est celle qui consiste à maintenir la composante i_d nulle pour minimiser les pertes par effet Joule [33], [52].

III.3 Modèle de la machine à commandée

Notre modèle est la machine synchrone à aimant permanent à pôle lisse, telle que les inductances L_d et L_q sont égales ($L_d = L_q = L$).

➤ Les équations électriques dans le repère de Park

$$V_d = \left(R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \right) \quad \text{III.1}$$

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} (V_d - R_s i_d + \omega L_q i_q) \quad \text{III.2}$$

$$V_q = \left(R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d - \omega \varphi_f \right) \quad \text{III.3}$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} (V_q - R_s i_q - \omega (L_d i_d - \varphi_f)) \quad \text{III.4}$$

➤ **Les équations mécaniques :**

$$J \frac{d}{dt} \Omega + f\Omega = C_t - C_{em} \quad \text{III.5}$$

Avec : C_t le couple de la turbine appliquée sur la GSAP

$$C_{em} = \frac{3}{2} P i_q \varphi_f \quad \text{III.6}$$

III.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 (III.1, III.3) [53].

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 [53].

On aura donc les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_d = V_{d1} + e_q \\ V_q = V_{q1} + e_d \end{cases} \quad \text{III.7}$$

Avec

$$\begin{cases} e_q = -\omega L_q i_q \\ e_d = \omega (L_d i_d - \varphi_f) \end{cases} \quad \text{III.8}$$

e_q et e_d sont les termes de compensation.

On a donc

$$\begin{cases} V_{d1} = \left(R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} \right) \\ V_{q1} = \left(R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} \right) \end{cases} \quad \text{III.9}$$

Dans la référence (d, q) :

$$\begin{cases} V_{d1} = (R_s + sL_d) i_d \\ V_{q1} = (R_s + sL_q) i_q \end{cases} \quad \text{III.10}$$

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

$$\begin{cases} i_d = \frac{V_{d1}}{R_s + sL_d} \\ i_q = \frac{V_{q1}}{R_s + sL_q} \end{cases} \quad \text{III.11}$$

III.5 La régulation

Les régulateurs les plus utilisés dans le domaine des réglages industriels sont les régulateurs classiques de type PI ou PID, pour assurer une meilleure précision, et un bon temps de réponse [54].

Un régulateur PI remplit essentiellement deux fonctions [55] :

- Il fournit un signal de commande $U(t)$ en tenant compte de l'évolution du signal de sortie $Y(t)$ par rapport à la consigne $W(t)$.
- Il élimine l'erreur statique grâce au terme intégrateur.

La relation entre la sortie de régulateur et le signal de l'écart $e(t)$ est donné :

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad \text{III.12}$$

C'est-à-dire

$$\frac{U(t)}{e(t)} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad \text{III.13}$$

Où :

$$\begin{cases} K_p : \text{Gain proportionnel} \\ K_i : \text{Gain integral} \end{cases}$$

A partir de l'équation (III.12) le régulateur PI est représenté comme suit :

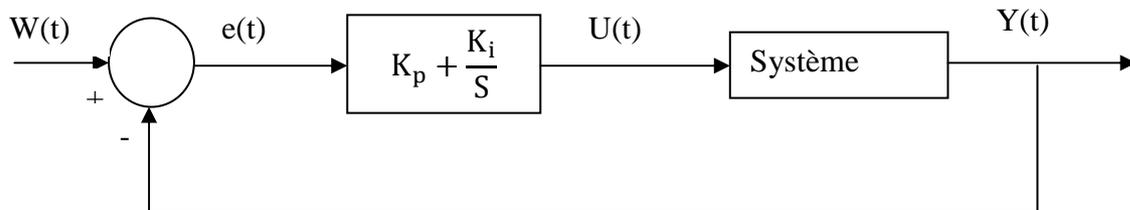


Fig. III.1: Schéma fonctionnel d'un système réglé par un régulateur PI.

Le rôle des régulateurs est de maintenir une grandeur de sortie égale à la grandeur de référence imposée [33].

III.5.1 Régulation de courant i_d [56]

La boucle de régulation de courant i_d est montrée par la figure (III.4) :

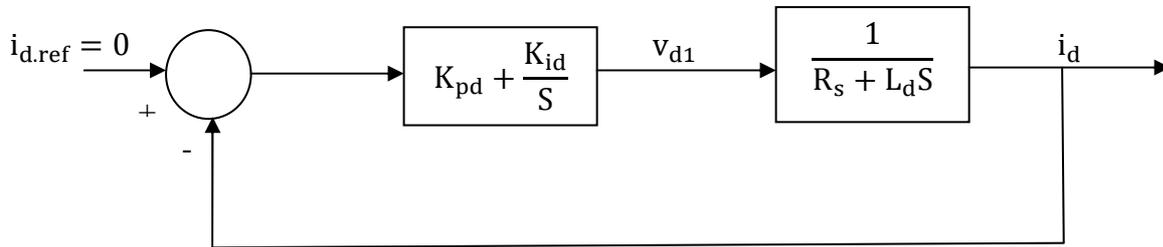


Fig. III.2 : Boucle de régulation du courant i_d .

A partir de la fonction (III.11) on peut écrire la fonction de transfert qui représente un système du 1^{ère} ordre suivante :

$$F_d(s) = \frac{I_d}{V_{d1}} = \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + \left(\frac{L_d}{R_s}\right)s} \quad \text{III.14}$$

Avec :

$$\frac{L_d}{R_s} = t_e, \text{ est la constante du temps électrique relative sur l'axe d.}$$

La fonction de transfert de ce système en boucle ouverte FTBO est donnée :

$$\text{FTBO}_d = \frac{K_{id}}{s} \left(1 + \frac{K_{pd}}{K_{id}}s\right) \cdot \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + t_e s} \quad \text{III.15}$$

$$\text{FTBO}_d = \left(K_{pd} + \frac{K_{id}}{s}\right) \cdot \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + t_e s} \quad \text{III.16}$$

La fonction de transfert en boucle ouverte du système régulé est donnée par l'équation(III.16),

en posant $\frac{L_d}{R_s} = \frac{K_{pd}}{K_{id}} = t_e$, alors :

$$\text{FTBO}_d = \frac{\left(K_{pd} + \frac{K_{id}}{s}\right)}{\frac{R_s}{1 + \frac{K_{pd}}{K_{id}}s}} \quad \text{III.17}$$

$$\text{FTBO}_d = \frac{(K_{pd}s + K_{id}) \cdot K_{id}}{(K_{pd}s + K_{id}) \cdot (R_s s)} \quad \text{III.18}$$

La fonction de transfert en boucle ouverte aura :

$$\text{FTBO}_d = \frac{K_{id}}{R_s \cdot s} \quad \text{III.19}$$

La fonction de transfert en boucle fermée de courant i_d sur l'axe d est donnée par la fonction suivante :

$$FTBF_d = \frac{FTBO_d}{1+FTBO_d} \quad \text{III.20}$$

$$FTBF_d = \frac{1}{\frac{R_s}{K_{id}}s+1} \quad \text{III.21}$$

$$FTBF_d = \frac{1}{\tau_e s+1} \quad \text{III.22}$$

$$\text{Avec : } \tau_e = \frac{R_s}{K_{id}} \quad \text{III.23}$$

On a le temps de réponse de système du 1^{ere} ordre t_r définie par la relation suivante [56] :

$$t_r = 3 \tau_e \quad \text{III.24}$$

$$t_r = 3 \frac{R_s}{K_{id}}$$

Donc :

$$K_{id} = \frac{3.R_s}{t_r} \quad \text{III.25}$$

$$\frac{L_d}{R_s} = \frac{K_{pd}}{K_{id}}$$

$$K_{pd} = \frac{L_d \cdot K_{id}}{R_s}$$

$$\text{Alors : } K_{pd} = \frac{3.L_d}{t_r} \quad \text{III.26}$$

Finalement on a les paramètres de régulateur PI suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{id} = \frac{3.R_s}{t_r} \\ K_{pd} = \frac{3.L_d}{t_r} \end{array} \right. \quad \text{III.27}$$

III.5.2 Régulation de courant i_q

La boucle de régulation de courant i_q est montrée par la figure (III.5) :

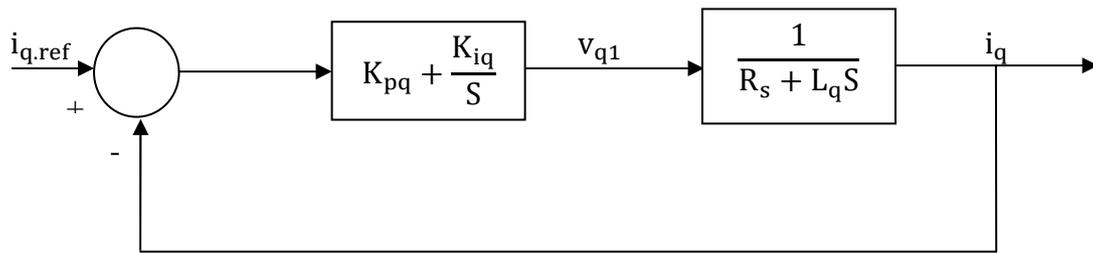


Fig. III.3 : Boucle de régulation du courant i_q .

Le système de régulation de courant i_q est le même que dans le cas en courant i_d car dans notre modèle MSAP à pole lisse, les inductances L_q et L_d sont égaux, donc on prend les mêmes démarches pour obtenir finalement des mêmes résultats :

$$\begin{cases} K_{iq} = \frac{3.R_s}{t_r} \\ K_{pq} = \frac{3.L_q}{t_r} \end{cases} \quad \text{III.28}$$

III.5.3 Régulation de la vitesse ω

Le régulateur de vitesse permet de déterminer le courant i_q de référence, ainsi le couple de référence, afin de maintenir la vitesse correspondante. La sortie du régulateur de vitesse est le signal de commande qui représente le courant i_q de référence du régulateur de courant i_q . La relation entre la vitesse et le couple est donnée par l'équation de mouvement suivante [57]:

$$J \frac{d}{dt} \Omega + f \Omega = C_t - C_{em}$$

Avec :

C_t : Le couple de la turbine.

C_{em} : Le couple de machine.

Le schéma fonctionnel du contrôle de vitesse est donné par

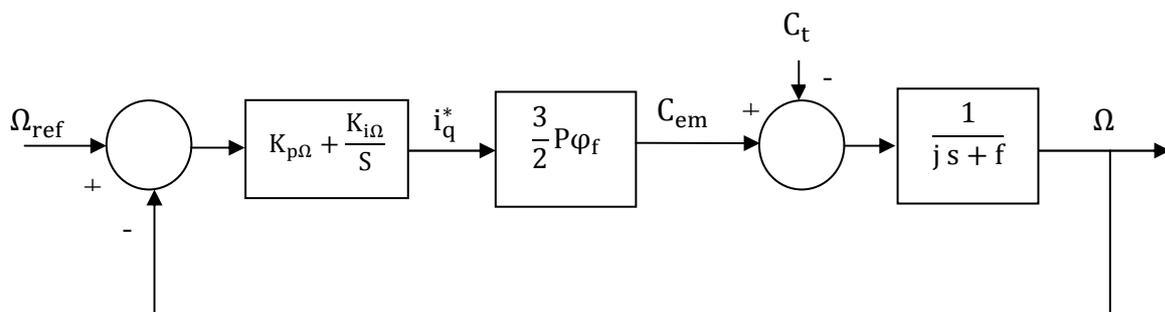


Fig. III.4 : Boucle de régulation de la vitesse ω .

La fonction de transfert de la vitesse en boucle ouverte est donnée par ($C_t=0$):

$$FTBO_{\Omega} = \frac{K_{p\Omega}}{s} \left(s + \frac{K_{i\Omega}}{K_{p\Omega}} \right) \frac{3P\varphi_f}{2} \frac{1}{J_{s+f}} \quad \text{III.29}$$

En adoptant la méthode de placement de pôle et la fonction de transfert de la vitesse en boucle fermée est donnée par:

$$FTBF_{\Omega} = \frac{3P\varphi_f K_{p\Omega} \left(s + \frac{K_{i\Omega}}{K_{p\Omega}} \right)}{2Js^2 + (2f + 3P\varphi_f K_{p\Omega})s + 3P\varphi_f K_{i\Omega}} \quad \text{III.30}$$

Après le calcul on trouve :

La $FTBF_{\Omega}$ possède une dynamique de 2^{ème} ordre, par identification à la forme canonique du 2^{ème} ordre dont l'équation caractéristique est représentée comme suit :

$$FTBF_{\Omega} = \frac{1}{\omega_0^2} s^2 + \left(\frac{2\xi}{\omega_0} \right) s + 1 \quad \text{III.31}$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_0: \text{représente la pulsation naturelle.} \\ \xi: \text{représente le coefficient d'amortissement.} \end{array} \right.$$

Par identification des équations (II.25) et (II.26) on obtient :

$$\frac{2J}{3.P.\varphi_f.K_{i\Omega}} = \frac{1}{\omega_0^2} \quad \text{III.32}$$

$$\frac{2.f + 3.P.\varphi_f.K_{p\Omega}}{3.P.\varphi_f.K_{i\Omega}} = \frac{2\xi}{\omega_0} \quad \text{III.33}$$

On déduit $K_{p\Omega}$ et $K_{i\Omega}$:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{i\Omega} = \frac{2J.\omega_0^2}{3.P.\varphi_f} \\ K_{p\Omega} = \frac{4.\xi.J.\omega_0 - 2.f}{3.P.\varphi_f} \end{array} \right. \quad \text{III.34}$$

III.6 Modélisation de redresseur MLI

Le redresseur MLI est un convertisseur d'une grandeur électrique de régime alternatif vers le régime continu réalisé à l'aide des semi-conducteurs (interrupteurs) généralement transistor en parallèle avec diode montée à des bras et commandés à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur,

parce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture avec une fréquence assez élevée. [58].

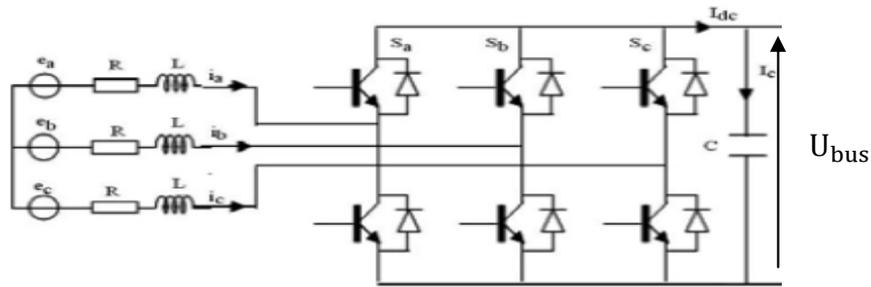


Fig. III.5: Schéma de l'association MSAP – Redresseur MLI [59].

Pour le modèle dynamique du système, on va diviser l'étude du convertisseur en trois parties: le coté alternatif, la partie discontinue composée par les interrupteurs et le coté continu. Pour cette raison, la fonction des interrupteurs est d'établir une liaison entre le côté alternatif et le bus continu U_{bus} , étant donné que ces interrupteurs sont complémentaires, leur état est défini par la fonction suivante [60], [61] :

$$S = \begin{cases} 1, \bar{S} = 0 \\ 0, \bar{S} = 1 \end{cases} \quad \text{Pour } S = a, b, c$$

En écrit les tensions composées entre les phases de redresseur MLI comme suit :

$$\begin{cases} U_{Sab} = (S_a - S_b)U_{bus} \\ U_{Sbc} = (S_b - S_c)U_{bus} \\ U_{Sca} = (S_c - S_a)U_{bus} \end{cases} \quad \text{III.36}$$

Avec : U_{bus} tension de bus continu

On obtient finalement sur les tensions de phases suivantes :

$$\begin{cases} U_{Sa} = \frac{2S_a - S_b - S_c}{3} U_{bus} \\ U_{Sb} = \frac{2S_b - S_a - S_c}{3} U_{bus} \\ U_{Sc} = \frac{2S_c - S_a - S_b}{3} U_{bus} \end{cases} \quad \text{III.37}$$

Finalement, on déduit l'équation de couplage entre côtés alternatif et continu par:

$$C \frac{dU_{bus}}{dt} = S_a I_a + S_b I_b + S_c I_c$$

III.7 Commande de redresseur par la technique MLI triangulo-sinusoidale

Dans notre travail, le redresseur est commandé par la technique de Modulation de la Largeur d'Impulsion (MLI) à porteuse triangulaire. Elle consiste de comparer l'erreur entre le signal de tension et sa consigne avec une onde triangulaire (porteuse) d'une amplitude et d'une fréquence fixées [58], [62].

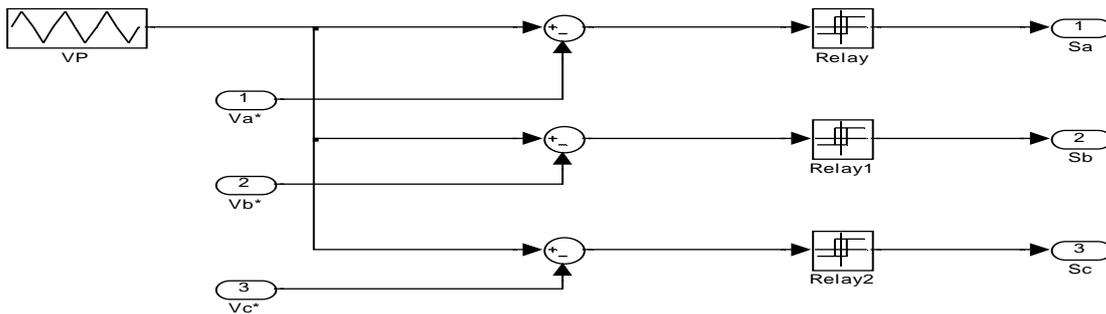


Fig. III.6: Schéma bloc de la technique triangulo-sinusoidale dans Matlab.

III.8 Le schéma globale de commande vectorielle du GSAP dédiée à l'éolienne

Le schéma synoptique de la commande vectorielle est représenté totalement avec ces composants qui la constituent, dans la (Fig. III.7) ci-dessous :

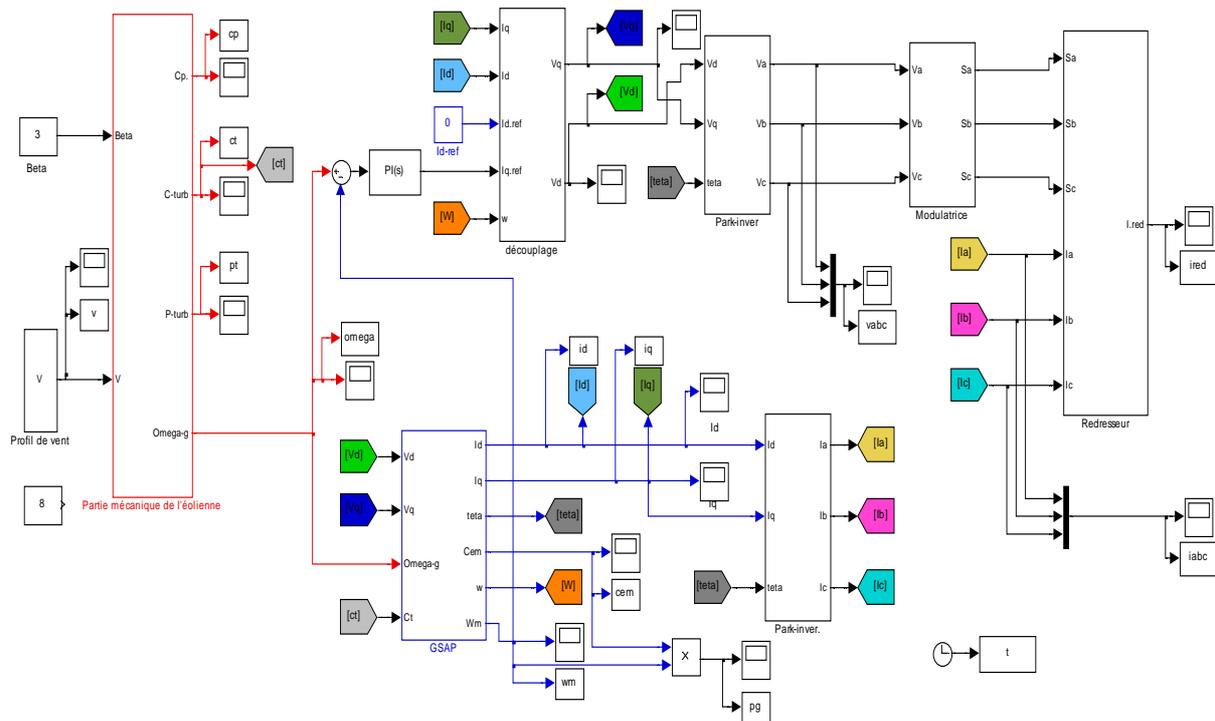


Fig. III.7: Schéma bloc représente la structure générale de commande vectorielle de GSAP.

III.9 Les résultats de simulation

Afin de vérifier les performances de la commande mise en oeuvre nous allons effectuer deux tests :

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

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

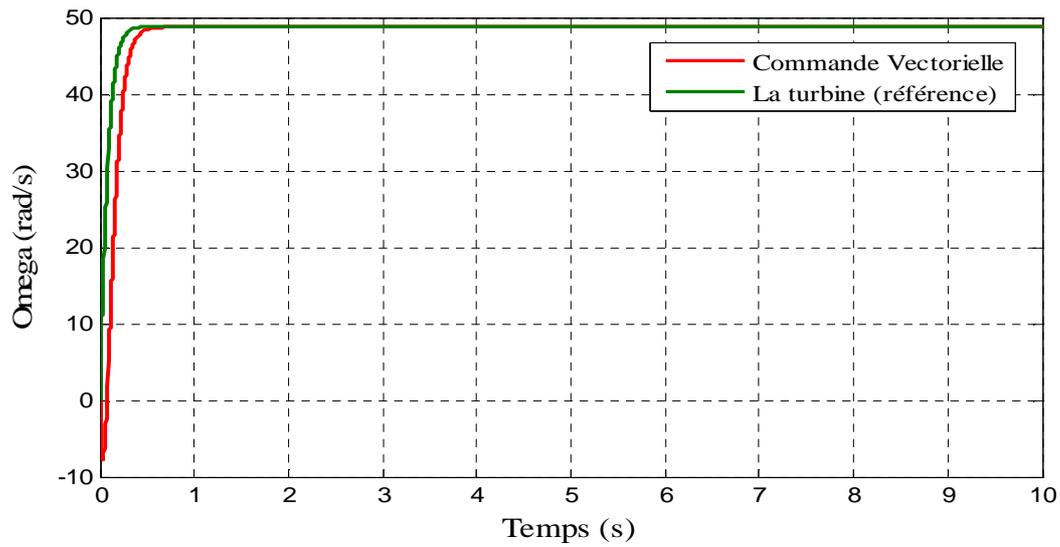


Fig. III.8: La vitesse de rotation Ω (rad/s).

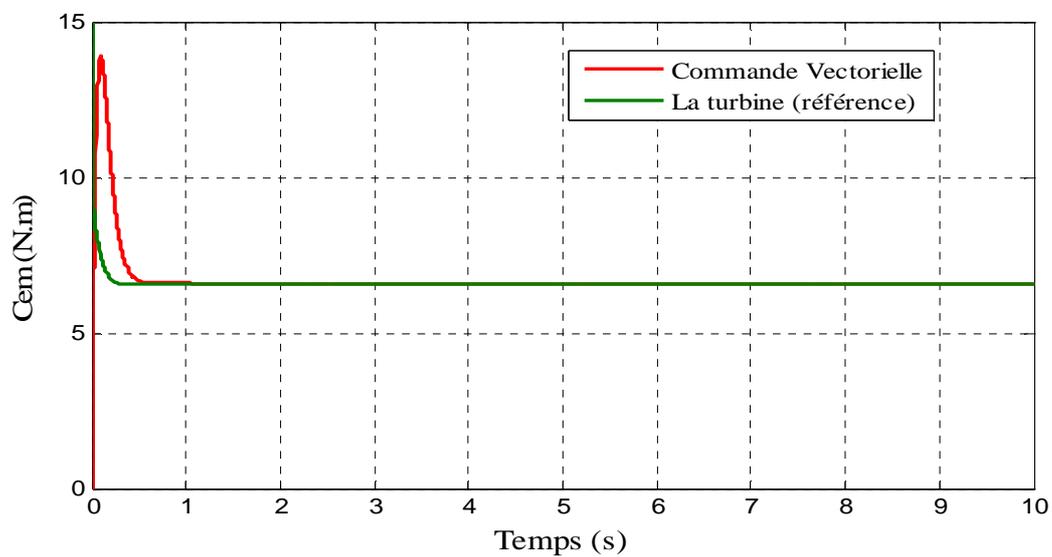


Fig. III.9: Le couple électromagnétique C_{em} (N.m).

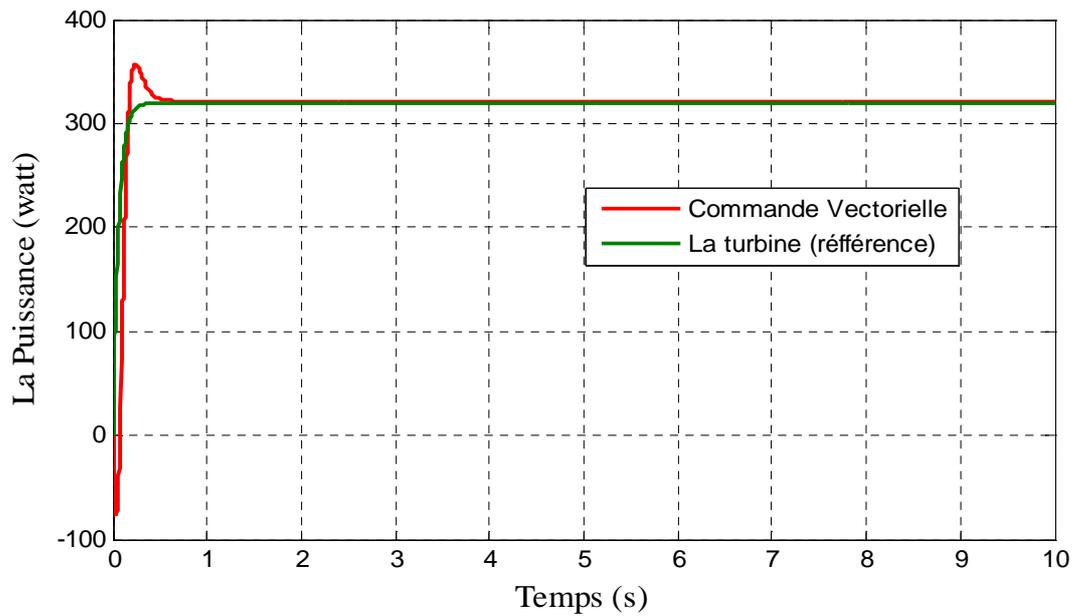


Fig. III.10 : La Puissance générée en (watt).

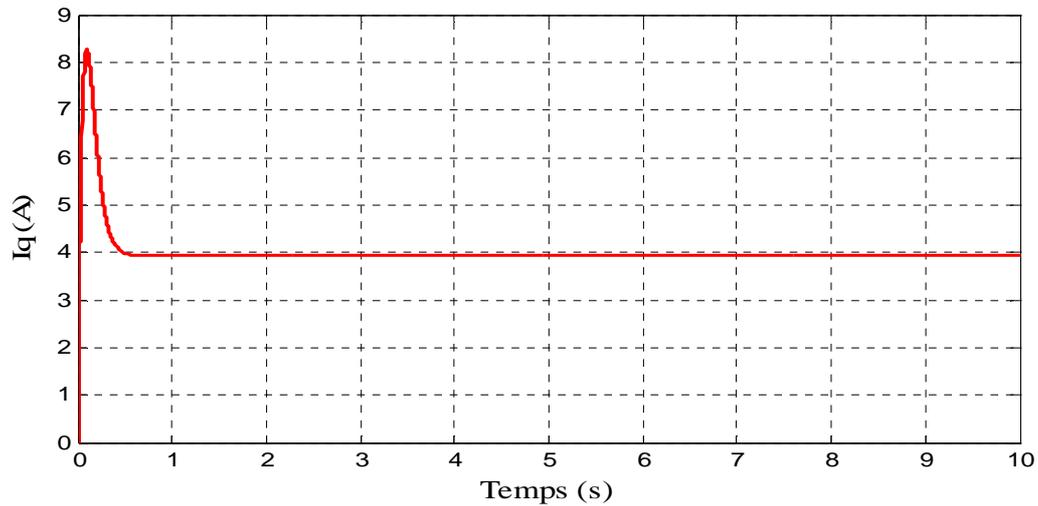


Fig. III.11: Le courant I_q de la machine en (A).

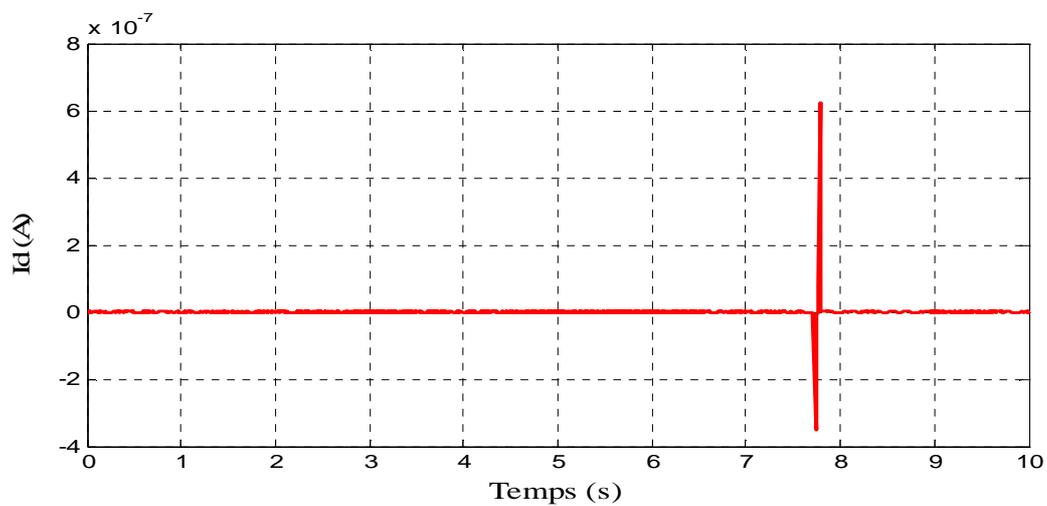


Fig. III.12: Le courant I_d de la machine en (A).

Les résultats de simulation présente une bonne réponse où on peut remarquer que chaque grandeurs suit parfaitement sa référence sauf au démarrage qui présente quelques perturbations et provoque un pique de courant et couple qui disparaîtra au bout d'un temps négligeable, le courant I_q est de même forme que celle du couple C_{em} , la GSAP modélisée dans le repère d, q est naturellement découplée et analogue à une machine à courant continu, le couple électromagnétique est directement proportionnel au courant I_q comme le montre la (Fig. III.11), $C_{em}=K \cdot I_q$, avec $K=Cte$.

❖ **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 lente du système étudié. L'objectif c'est de voir le degré de Poursuite du point à maximum de puissance et l'efficacité du réglage de vitesse assuré par le PI classique (stabilité face aux variation lorsque du vent).

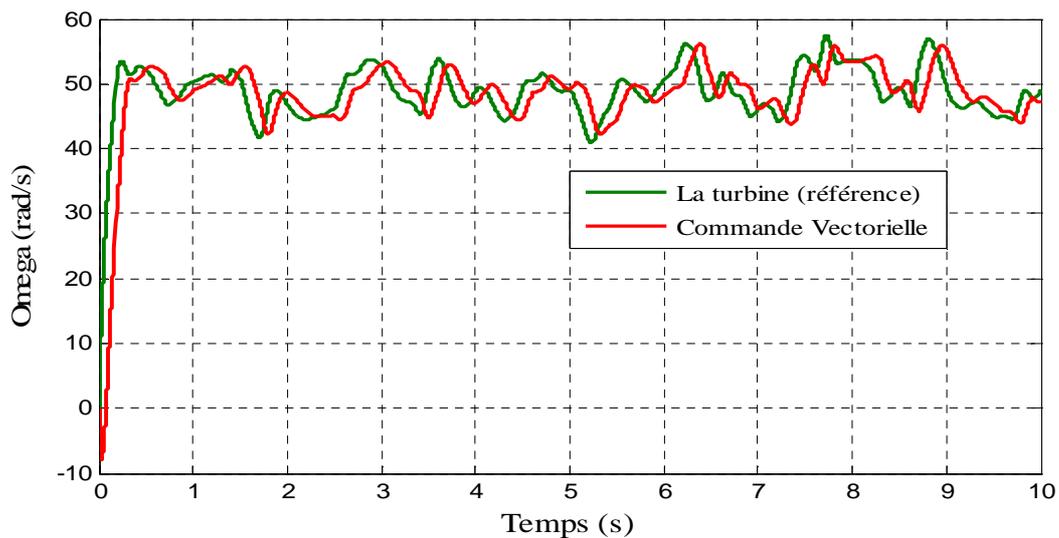


Fig. III.13: La vitesse de rotation Ω (rad/s).

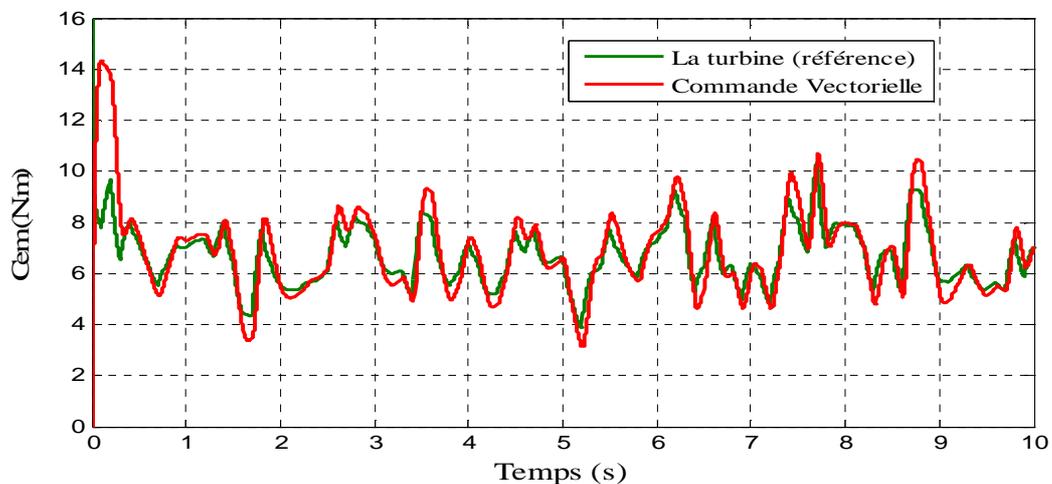


Fig. III.14: Le couple C_{em} (N.m).

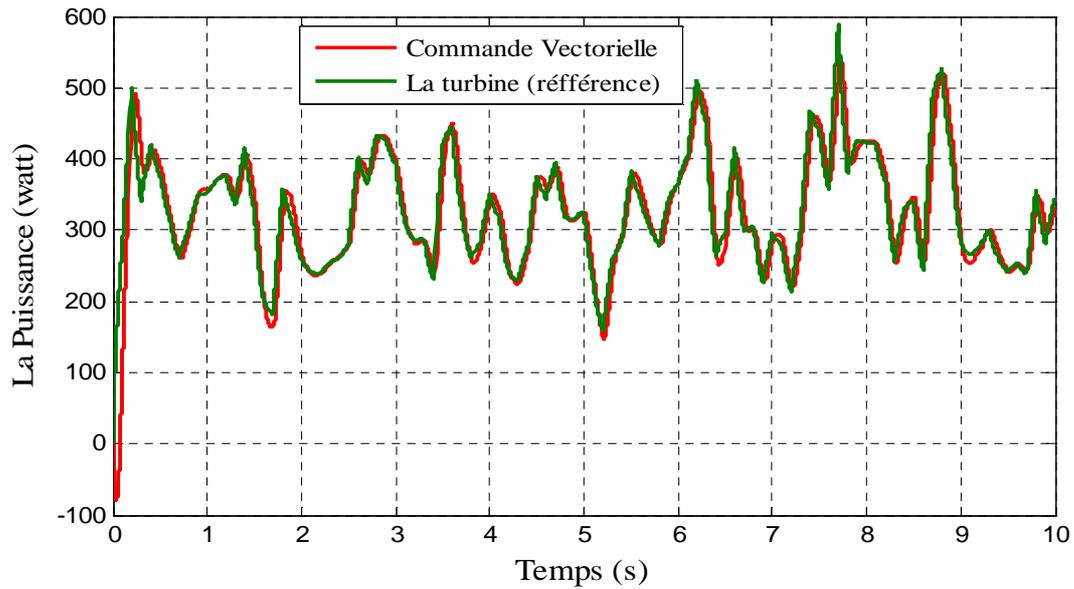


Fig. III.15: La Puissance générée en (watt).

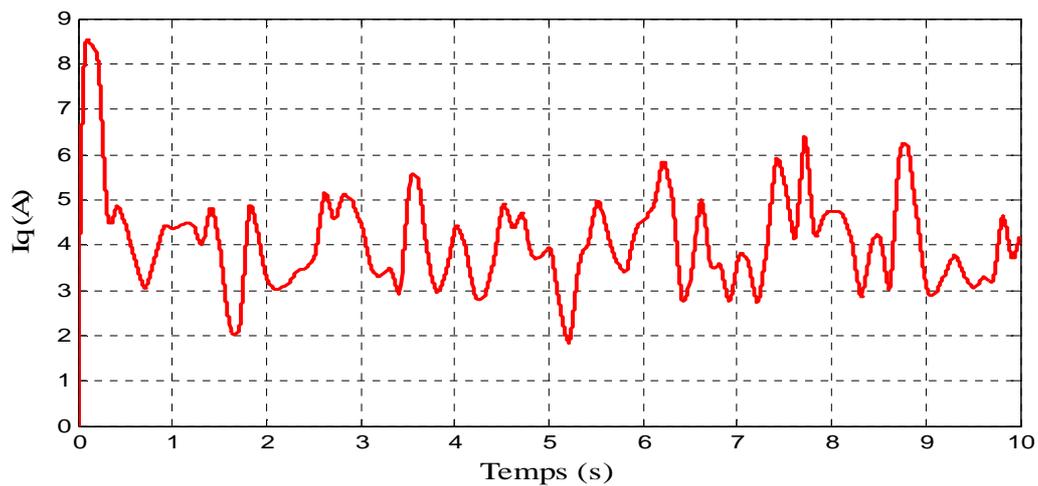


Fig. III.16: Le courant I_q de la machine en (A).

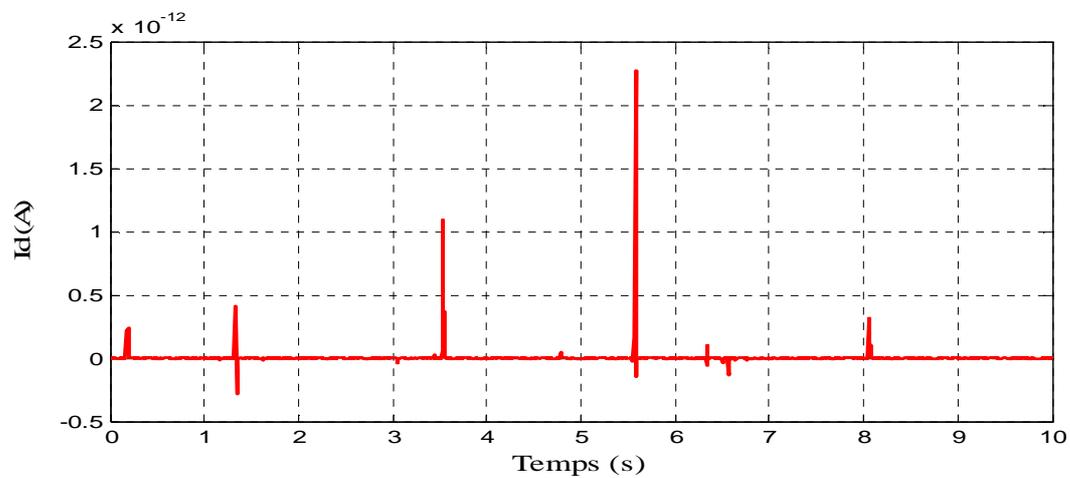


Fig. III.17: Le courant I_d de la machine en (A).

Ce test nous à permet de vérifier la robustesse de notre système vis-à-vis les changements brusque et répétés de la vitesse du vent, il est à remarquer la bonne poursuite des différentes grandeurs (vitesse, puissance, couple, courant). On remarque toujours que le courant I_q est l'image couple tan dis que le courant I_d est maintenue presque nul.

III.10 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la commande vectorielle de la machine synchrone à aimant permanent pilotée à l'aide d'un convertisseur électronique à commande MLI. Ce convertisseur joue le rôle d'un redresseur, Cette combinaison électrique nous a permis d'exécuter la stratégie de commande conçue à ce système éolien étudié à l'aide d'un asservissement de vitesse réglée par un des correcteur PI. L'analyse des résultats obtenus dans ce chapitre montre clairement un degré d'efficacité acceptable de la régulation choisie qui fait ramener le système à son point optimal après une variation de la vitesse du vent. Dans le but d'augmenter ce degré d'efficacité et d'améliorer les performances de notre système, il faut réfléchir à d'autres type des commandes plus avancés comme la commande par Backstepping, qui sera l'objectif du chapitre suivant.

Chapitre IV
Commande Backstepping d'une MSAP

IV.1 Introduction

D'après le chapitre précédant, les lois de commande classique de type PI donnent de bons résultats dans le cas des systèmes linéaires à paramètres constants. Pour un système non linéaire ayant des paramètres non constants, ces lois de commande classiques peuvent être insuffisantes et non robustes [3].

La commande par la méthode Backstepping donné un nouveau souffle à la commande des systèmes non linéaires, cette méthode à été développée au début des années 90 (Kokotovic, 1991) [63]. Dans ce chapitre on passe sur différentes connaissances de cette méthode puis on applique sur notre système éolien à machine synchrone à aimant permanent.

IV.2 Principe de la commande Backstepping

L'idée de base de la commande de type Backstepping est de rendre les systèmes bouclés équivalents à des sous-systèmes d'ordre un en cascade stable au sens de Lyapunov, ce qui leur confère des qualités de robustesse et une stabilité globale asymptotique. En d'autres termes, c'est une méthode multi-étapes. A chaque étape du processus, une commande virtuelle est ainsi générée pour assurer la convergence du système vers son état d'équilibre. Cela peut être atteint à partir des fonctions de Lyapunov qui assurent pas à pas la stabilisation de chaque étape de synthèse [63].

IV.2.1 Fonction de Lyapunov

La commande des systèmes non linéaire s'appuie sur deux approches de Lyapunov :

❖ Première méthode de Lyapunov

Cette méthode permet d'analyser la stabilité, d'un système à partir de l'étude de la stabilité locale par linéarisation de la dynamique autour d'un point d'équilibre. Cette méthode est d'une importance limitée, car elle ne permet d'étudier que la stabilité locale et ne donne pas d'information sur le domaine de stabilité globale. De plus, dû aux approximations du premier degré (linéarisation), il n'est pas possible de tenir compte de tous les types de phénomènes non-linéaires. En faite, l'étude locale est surtout intéressante pour justifier ou non la poursuite de l'étude de la stabilité [64].

❖ Deuxième méthode de Lyapunov

Cette méthode est basée sur le concept d'énergie dans un système. Le principe de cette méthode consiste à analyser la stabilité du système, sans même résoudre les équations

différentielles non linéaires qui le régissent. La stabilité dépend uniquement de l'étude des variations (signe de la dérivée) de l'énergie, ou d'une fonction qui lui est équivalente, le long de la trajectoire du système.

L'étude de la stabilité d'un système caractérisé par un vecteur d'état x consiste alors à chercher une fonction $V(x)$ (représentative de l'énergie) de signe défini positive, dont la dérivée est semi définie et de signe négative dans le même domaine [64].

IV.3 Conception de la commande Backstepping [65]

Cette méthode s'applique à des systèmes ayant une forme dite triangulaire, telle que l'indique la représentation d'état suivante : [66]

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = f_1(X_1) + g_0(X_1)X_2 \\ \dot{X}_2 = f_2(X_1, X_2) + g_1(X_1, X_2)X_3 \\ \dot{X}_n = f_n(X_1, X_2, \dots, X_n) + g_{n-1}(X_1, X_2, \dots, X_n)U \end{cases} \quad \text{IV.1}$$

Avec $X = [X_1, X_2, \dots, X_n]^T \in \mathbb{R}^n$ et $U \in \mathbb{R}$

On désire faire suivre à la sortie $y=x$ le signal de référence y_{ref} supposée connue. Le système étant d'ordre n , la conception s'effectue en n étapes.

IV.3.1. 1ère étape Calcul de la première commande virtuelle

On commence par la première équation du système (IV.1) où X_2 sera considérées comme une commande virtuelle intermédiaire. On définit la première référence désirée du sous système X_1 qui doit suivre la référence définie y_{ref} tel que : [67]

$$(X_1)_d \triangleq y_{\text{ref}} = \alpha_0 \quad \text{IV.2}$$

Où $(X_1)_d$ est l'état désiré. La première variable d'erreur du sous système est défini par :

$$\text{Et } e_1 = X_1 - \alpha_0 \quad \text{IV.3}$$

$$\dot{e}_1 = f_1(X_1) + g_0(X_1)X_2 - \dot{\alpha}_0 \quad \text{IV.4}$$

Pour un tel sous système, nous construisons d'abord la fonction de Lyapunov V_1 sous une forme quadratique :

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad \text{IV.5}$$

Sa dérivée temporelle est donnée par :

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1 [f_1(X_1) + g_0(X_1)X_2 - \dot{\alpha}_0] \quad \text{IV.6}$$

Afin d'assurer la stabilité du sous système d'après Lyapunov, il faut que V_1 soit négative.

Pour cela on choisit sous la forme :

$$\dot{V}_1 = -K_1 e_1^2 \leq 0 \quad \text{IV.7}$$

Où $K_1 > 0$ est un paramètre de conception. En substituant (IV.7) dans (IV.6) on trouve :

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1 [f_1(X_1) + g_0(X_1)X_2 - \dot{\alpha}_0] = -K_1 e_1^2 \quad \text{IV.8}$$

Cela donne la commande virtuelle X_2 :

$$X_2 = \frac{1}{g_0(X_1)} [-K_1 e_1 + \dot{\alpha}_0 - f_1(X_1)] \quad \text{IV.9}$$

Cette dernière sera la nouvelle référence désirée X_{2ref} du sous système qui suit.

IV. 3.2. 2ème étape - Calcul de la deuxième commande virtuelle

On considère les deux premières équations du système définie en (IV. 1) :

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= f_1(X_1) + g_0(X_1)X_2 \\ \text{Et} \\ \dot{X}_2 &= f_2(X_1, X_2) + g_1(X_1, X_2)X_3 \end{aligned}$$

Où la nouvelle référence désirée α_1 sera la variable de commande pour le sous système précédent X_{2ref} tel que :

$$X_{2ref} \triangleq \alpha_1 \quad \text{IV.10}$$

Et la nouvelle variable d'erreur :

$$e_2 = X_2 - \alpha_1 \quad \text{IV.11}$$

De la même manière, on définit la fonction de Lyapunov pour assurer la stabilité du sous système suivant :

$$\dot{X}_2 = f_2(X_1, X_2) + g_1(X_1, X_2)X_3 \quad \text{IV.12}$$

Ces fonctions dépendent forcément des états précédents du sous système définie par :

$$\dot{X}_1 = f_1(X_1) + g_0(X_1)X_2 \quad \text{IV.13}$$

On choisit comme fonction de Lyapunov étendue pour le sous système (IV.12) :

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}e_2^2 = \frac{1}{2}(e_1^2 + e_2^2) \quad \text{IV.14}$$

Sa dérivée est donnée par :

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + e_2 \dot{e}_2 \\ &= -K_1 e_1^2 + e_2 [f_2(X_1, X_2) + g_1(X_1, X_2)X_3 - \dot{\alpha}_1] \end{aligned} \quad \text{IV.15}$$

Afin d'assurer la stabilité de ce système d'après Lyapunov, il faut que \dot{V}_2 soit négative. Pour cela on choisit \dot{V}_2 sous la forme :

$$\dot{V}_2 = -K_1 e_1^2 - K_2 e_2^2 \leq 0 \quad \text{IV.16}$$

Où $K_2 > 0$ est un paramètre de conception.

En substituant (IV.16) dans (IV.15) on trouve :

$$\dot{V}_2 = -K_1 e_1^2 - K_2 e_2^2 = -K_1 e_1^2 + e_2 [f_2(X_1, X_2) + g_1(X_1, X_2)X_3 - \dot{\alpha}_1] \quad \text{IV.17}$$

Cela donne la commande virtuelle X_3 :

$$X_3 = \frac{1}{g_1(X_1, X_2)} [-K_2 e_2 + \dot{\alpha}_1 - f_2(X_1, X_2)] \quad \text{IV.18}$$

Avec :

$$\dot{\alpha}_1 = \frac{\frac{\partial \alpha_1}{\partial X_1} g_0(X_1) [-K_1 \dot{e}_1 + \dot{\alpha}_0 - f_1(X_1)] - [-K_1 e_1 + \dot{\alpha}_0 - f_1(X_1)] \dot{g}_0(X_1)}{g_0^2(X_1)} \quad \text{IV.19}$$

Cette dernière sera la nouvelle référence désirée $X_{3\text{ref}}$ du sous système qui suit.

On pose $X_{3\text{ref}} \triangleq \alpha_2$ et on continue jusqu'à la dernière expression du sous système (IV.1) où on atteindra le calcul de la loi de commande réelle.

IV.3.3. La 3^{ème} étape - Calcul de la loi de commande finale

Le système (IV.1) est maintenant considéré dans sa globalité. De la même façon, pour cette étape la référence à suivre sera : **[68]**

$$(X_n)_d \triangleq \alpha_{n-1} \quad \text{IV.20}$$

La variable d'erreur de régulation :

$$e_n = X_n - \alpha_{n-1} \quad \text{IV.21}$$

Sa dérivée est :

$$\dot{e}_n = f_n(X_1, X_2, \dots, X_n) + g_{n-1}(X_1, X_2, \dots, X_n)U - \dot{\alpha}_{n-1} \quad \text{IV.22}$$

Avec comme fonction de Lyapunov étendue :

$$V_n = V_1 + \dots + \frac{1}{2}e_n^2 = \frac{1}{2}(e_1^2 + \dots + e_n^2) \quad \text{IV.23}$$

La dérivée devient :

$$\begin{aligned} \dot{V}_n &= \dot{V}_1 + \dots + e_n \dot{e}_n \\ &= -K_1 e_1^2 + \dots + e_n [f_n(X_1, X_2, \dots, X_n) + g_{n-1}(X_1, X_2, \dots, X_n)U - \dot{\alpha}_{n-1}] \end{aligned} \quad \text{IV.24}$$

Dans cette dernière étape, on est arrivé à déduire la vraie loi de commande U qui permet d'atteindre les objectifs de conception pour le système global qui contrairement aux lois X_i qui sont des lois virtuelles. Un bon choix de celle-ci doit satisfaire. Pour un tel sous système, nous construisons d'abord la fonction de Lyapunov V_1 sous une forme quadratique :

$$f_n(X_1, X_2, \dots, X_n) + g_{n-1}(X_1, X_2, \dots, X_n)U - \dot{\alpha}_{n-1} = -K_n e_n^2 \quad \text{IV.25}$$

Où $K_n > 0$ est un paramètre de conception.

Ainsi, la loi de commande pour le système entier sera donnée par :

$$U = \frac{1}{g_{n-1}(X_1, X_2, \dots, X_n)} [-K_n e_n + \dot{\alpha}_{n-1} - f_n(X_1, X_2, \dots, X_n)] \quad \text{IV.26}$$

Ce qui garantit la négativité de la dérivée de la fonction de Lyapunov étendue :

$$\dot{V}_n = -K_1 e_1^2 - \dots - K_n e_n^2 < 0$$

Nous avons ainsi défini la méthodologie de la commande Backstepping que nous allons mettre en application sur le MSAP.

IV.4 Application du Backstepping à la commande du MSAP

Les équations de modèle (d, q) de la machine synchrone à aimants permanents à pôle lisse ($L_d = L_q = L$) peuvent s'écrire sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -ax_1 + px_2x_3 + bV_d \\ \dot{x}_2 = -ax_2 - px_1x_3 - pdx_3 + bV_q \\ \dot{x}_3 = k_t x_2 \end{cases} \quad \text{IV.27}$$

Avec : $x_1 = i_d$, $x_2 = i_q$, $x_3 = \Omega$;

Et : $a = \frac{R_s}{L}$, $b = \frac{1}{L}$, $d = \frac{\varphi_f}{L}$, $k_t = \frac{3P}{2J} \varphi_f$

Les erreurs définies par les expressions :

$$\begin{cases} e_1 = x_3^* - x_3 \\ e_2 = x_2^* - x_2 \\ e_3 = x_1^* - x_1 \end{cases} \quad \text{IV.28}$$

Tel que (*) représente les valeurs de référence.

Les dynamiques des erreurs est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = \dot{x}_3^* - \dot{x}_3 \\ \dot{e}_2 = \dot{x}_2^* - \dot{x}_2 \\ \dot{e}_3 = \dot{x}_1^* - \dot{x}_1 \end{cases} \quad \text{IV.29}$$

➤ Etape 01 : "boucle de vitesse"

Pour réaliser la commande du moteur et atteindre la vitesse désirée, nous adoptons la fonction de "Lyapunov" suivante :

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad \text{IV.31}$$

En faisant la dérivée de cette fonction, on aura :

$$\dot{V}_1 = \dot{e}_1 e_1 = e_1 (\dot{x}_3^* - k_t x_2) \quad \text{IV.32}$$

Par conséquent, pour assurer que $\dot{V}_1 < 0$ il faut que:

$$x_2^* = \frac{1}{k_t} (\dot{x}_3^* - k_1 e_1) \quad \text{IV.33}$$

Donc :

$$\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2 \quad \text{IV.34}$$

Avec : $k_1 > 0$ pour assurer $\dot{V}_1 < 0$.

➤ Etape 02 : "boucle de couple"

Pour ce qui suit, l'assurance de stabilité et convergences de la composante i_q à la référence i_q^* , nous conduit à choisir la fonction de "Lyapunov" suivante :

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} e_2^2 \quad \text{IV.35}$$

La dérivée de V_2 , est :

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + e_2 (\dot{x}_2^* + a x_2 + p x_1 x_3 + p d x_3 - b V_q) \quad \text{IV.36}$$

L'expression (IV.36) peut être développée de manière à avoir sa fonction dérivée :

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + e_2 \left(\frac{1}{k_t} (\ddot{x}_3^* + k_1 \dot{e}_1) + a x_2 + p x_1 x_3 + p d x_3 - b V_q \right) \quad \text{IV.37}$$

Ensuite, pour assurer que $\dot{V}_2 < 0$, il faut prendre la loi de commande V_q comme suit :

$$V_q = \frac{1}{b} \left(\frac{1}{k_t} (\ddot{x}_3^* + k_1(\dot{x}_3^* - k_t x_2)) \right) + ax_2 + px_1x_3 + pdx_3 + k_2e_2 \tag{IV.38}$$

Ce qui donne :

$$V_q = \frac{1}{b} \left(\frac{1}{k_t} (\ddot{x}_3^* + k_1\dot{x}_3^*) \right) + (a - k_1)x_2 + px_1x_3 + pdx_3 + k_2e_2 \tag{IV.39}$$

D'où :

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 - k_2e_2^2 < 0 \quad ; \text{ Tel que } k_2 > 0$$

➤ **Etape 03 : "boucle de flux"**

A fin d'assurer la commande du courant i_d , la nouvelle fonction de "Lyapov" peut se traduire de la forme, [69]

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2}e_3^2 \tag{IV.40}$$

Suivant la même procédure de développement, On a :

$$\dot{V}_3 = \dot{V}_2 + e_3(\dot{x}_1^* + ax_1 - px_2x_3 - bV_d) \tag{IV.41}$$

Ce qui nous permet de choisir la loi de commande V_d qui assure $\dot{V}_3 < 0$, comme suit:

$$V_d = \frac{1}{b}(ax_1 - px_2x_3 + k_3e_3) \tag{IV.42}$$

Ce qui nous donne : $\dot{V}_3 = \dot{V}_2 - k_3e_3^2 \quad ; \quad k_3 > 0$

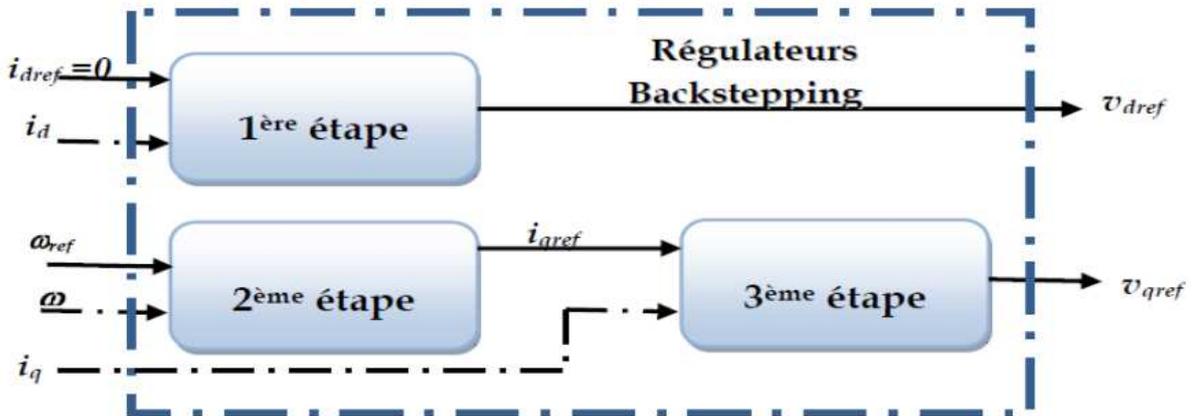


Fig. IV.1: Structure interne du bloc régulateur Backstepping [3].

IV.5 Résultats de simulation et interprétation

La commande adaptée est basé sur la méthode par Backstepping appliqué à une GSAP, dont le modèle non linéaire est testé pour :

❖ Vitesse de vent constante $V=8$ m/s :

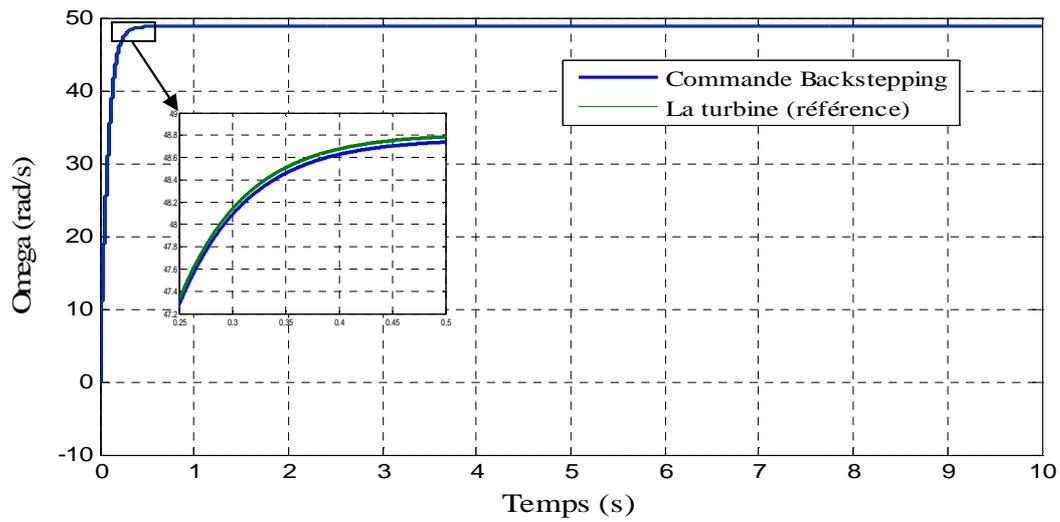


Fig. IV.2: La vitesse de rotation Ω (rad/s).

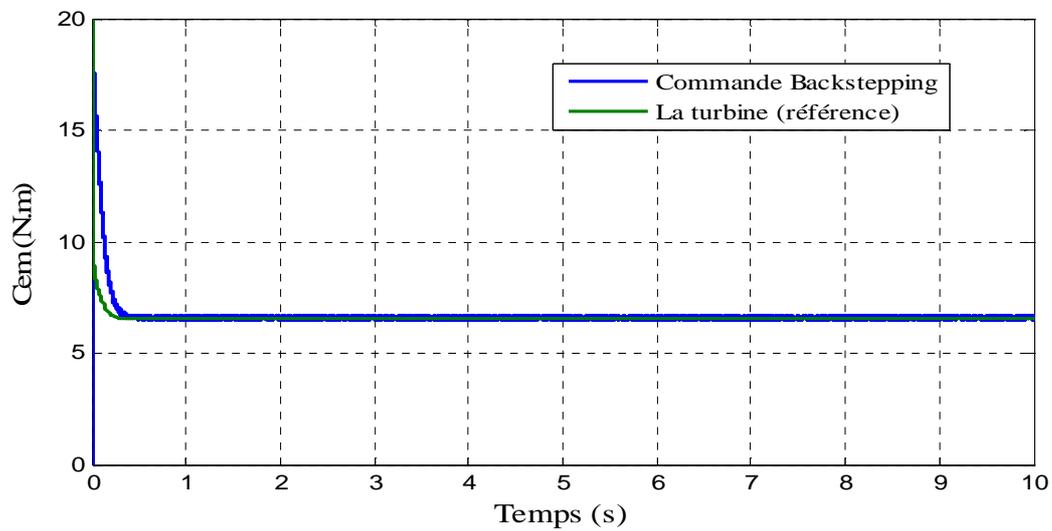


Fig. IV.3: Le couple mécanique C_{em} (N.m).

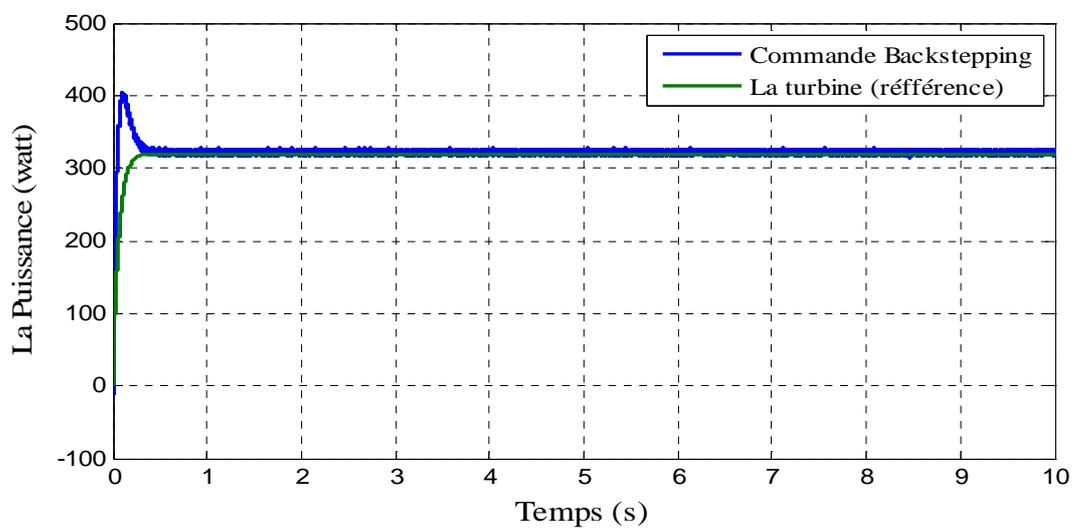


Fig. IV.4 : La Puissance générée en (watt).

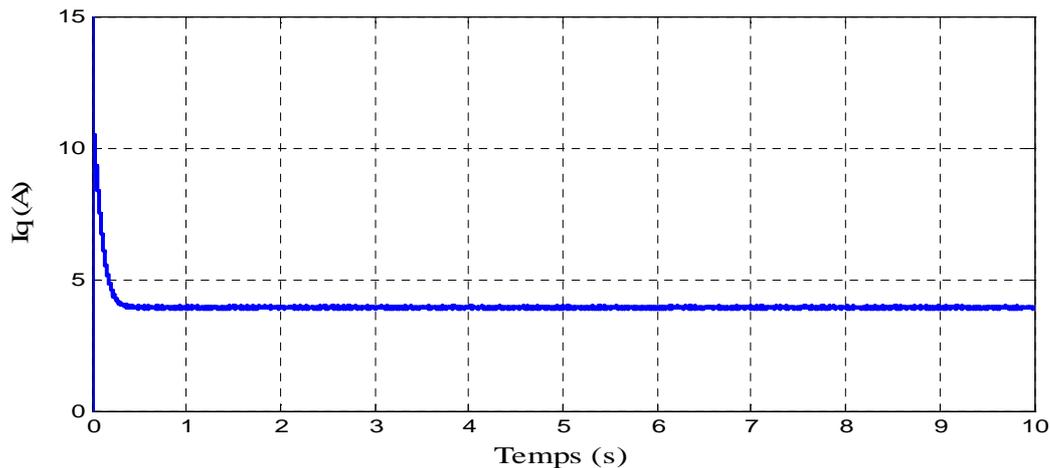


Fig. IV.5: Le courant I_q de la machine en (A).

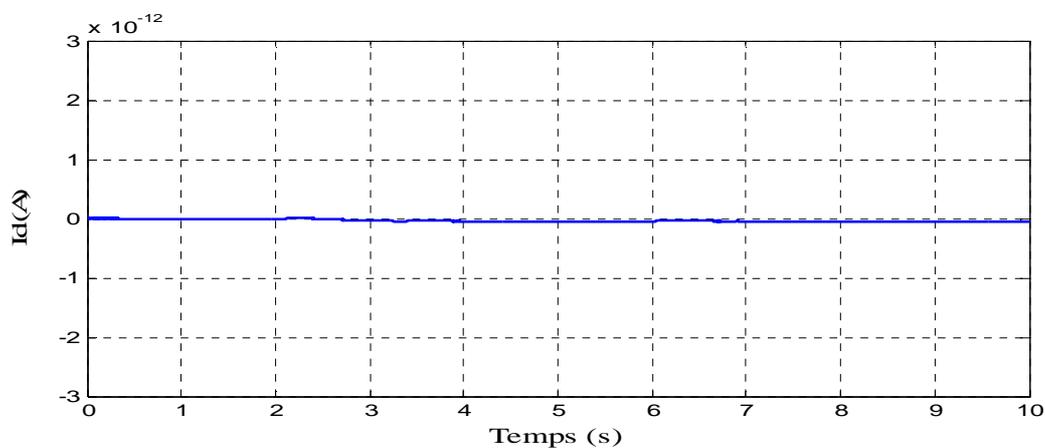


Fig. IV.6: Le courant I_d de la machine en (A).

Les résultats montrent l'évolution des grandeurs mécaniques et électriques de la GSAP en fonction de temps. Pour la vitesse et le couple, nous remarquons que la poursuite se fait sans dépassement avec un bon temps de réponse, et le rejet de la perturbation se fait efficacement.

Le courant I_q suit bien le couple électromagnétique C_{em} , et le courant I_d est nul comme celle de référence.

La puissance présente un pic au démarrage à cause des transformations électromagnétique au niveau de l'entrefer qui provoque une puissance électromécanique élevé. Après un temps très court la puissance de la MSAP atteindrent son référence en régime permanent, ce qui montre l'objectif de la commande par Backstepping la stabilité en fonction de GSAP avec présence des perturbations.

❖ Avec de vitesse du vent variable $V_{moy} = 8 \text{ m/s}$ on obtient les résultats suivant :

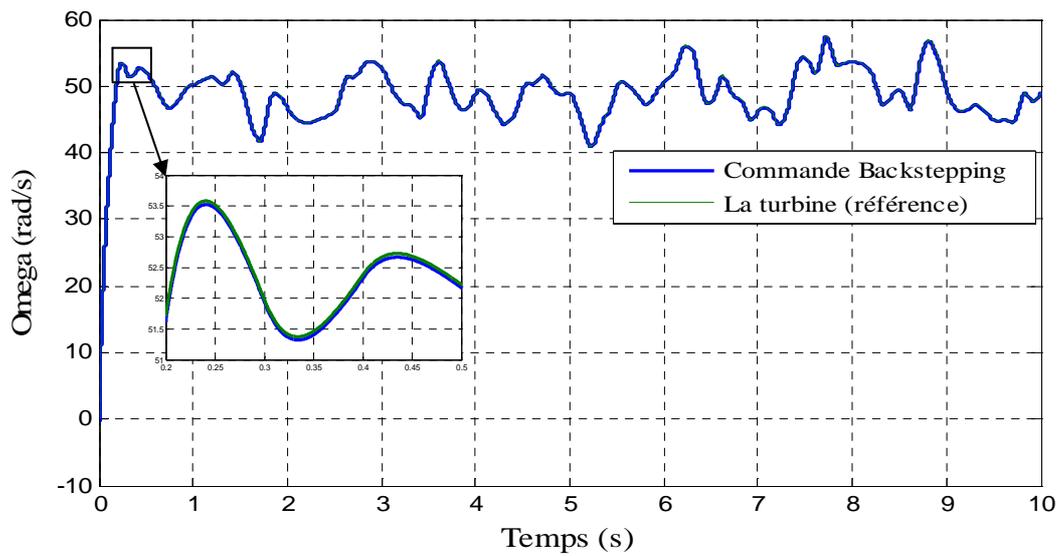


Fig. IV.7: La vitesse de rotation Ω (rad/s).

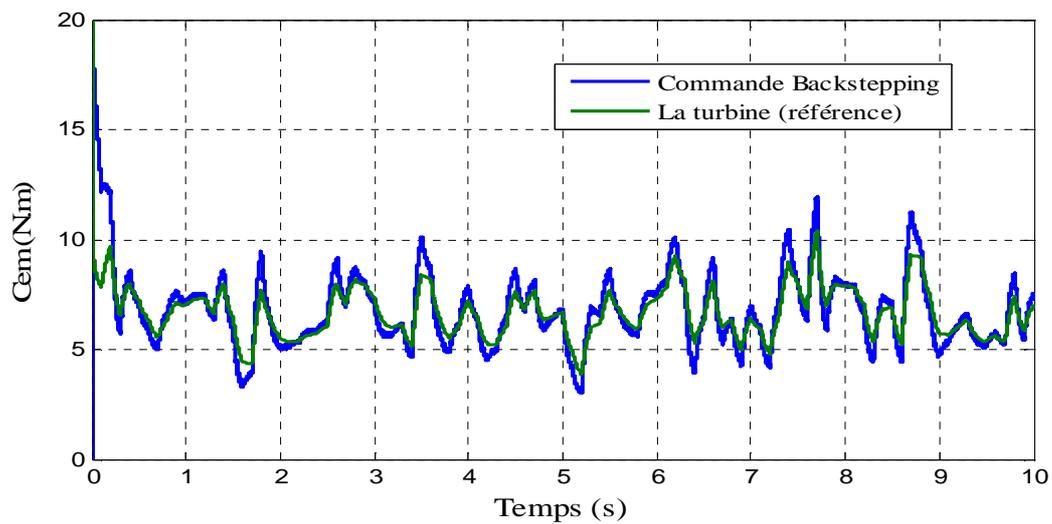


Fig. IV.8: Le couple mécanique C_{em} (N.m).

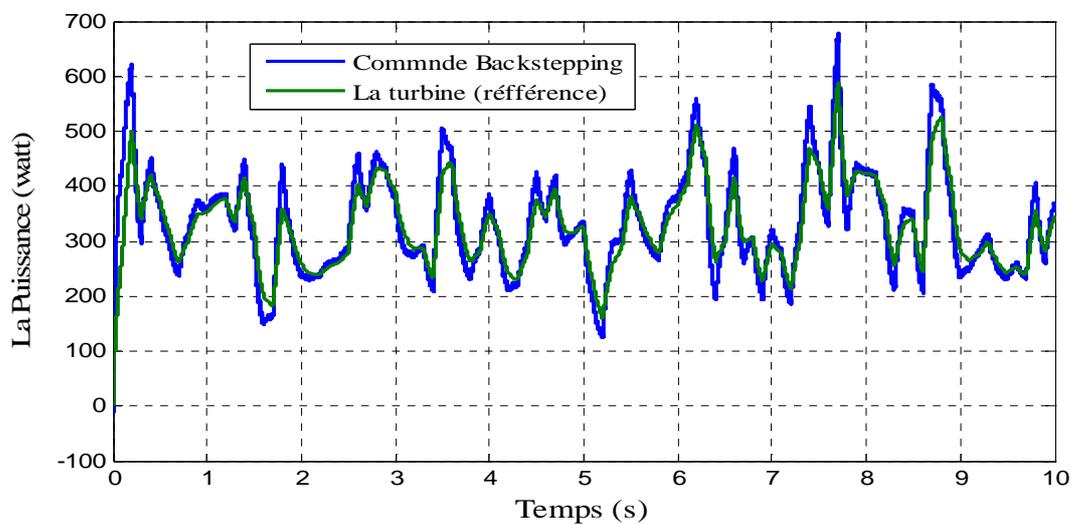


Fig. IV.9 : La Puissance générée en (watt).

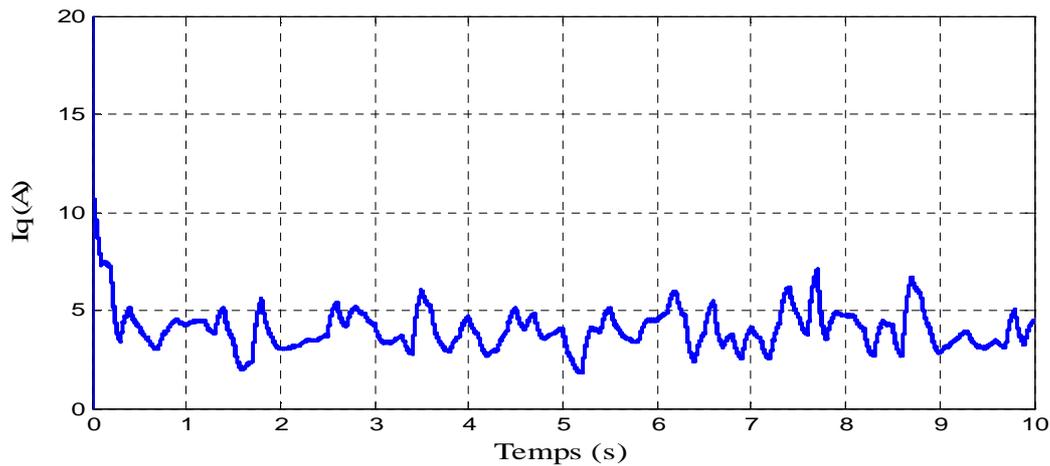


Fig. IV.10: Le courant I_q de la machine en (A).

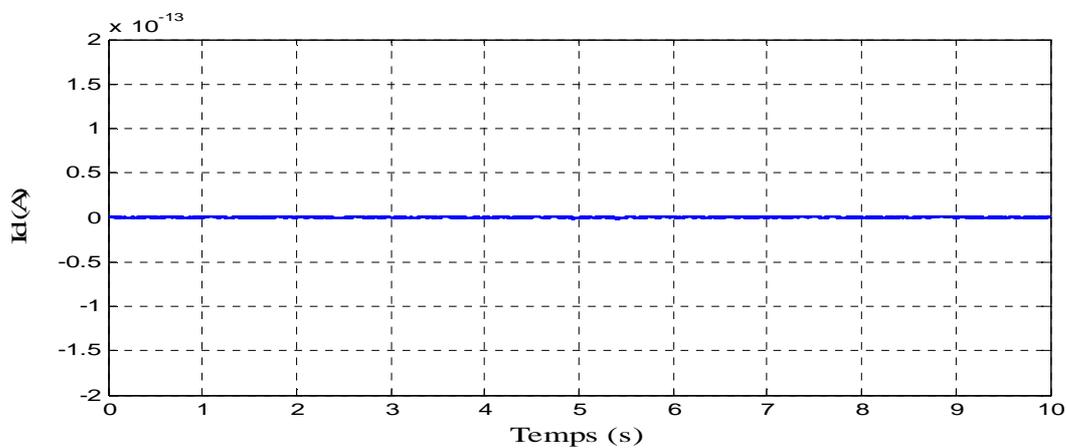


Fig. IV.11: Le courant I_d de la machine en (A).

Ce test présente la robustesse vis-à-vis des variations de la vitesse de vent brusque, et étudie le comportement dynamique des grandeurs obtenues ci-dessus.

On constate que la variation de différentes grandeurs de la turbine (vitesse, couple, puissance...) par l'effet de vent, n'influe pas sur la dynamique de celles de la génératrice lorsqu'on utilise un régulateur de type Backstepping, qui garantit la stabilité des mesures.

IV.6 Etude comparative entre la commande vectorielle et Backstepping

- ❖ La commande vectorielle : utilise des régulateurs PI et nécessite une connaissance précise de la position du rotor qui assure l'autopilotage de la machine. Cette connaissance peut être obtenue directement par un capteur de position ou indirectement par un capteur de vitesse.
- ❖ La commande non linéaire par Backstepping : la linéarisation entrée-sortie signifie la génération d'une relation différentielle entre la sortie et une nouvelle entrée, et l'idée c'est la transformation de la dynamique de la machine en une forme linéaire. Puisque

les paramètres peuvent varier, le Backstepping permet d'améliorer la performance de la commande en présence des perturbations [3].

- Avec de vitesse du vent constante ($V=8$ m/s):

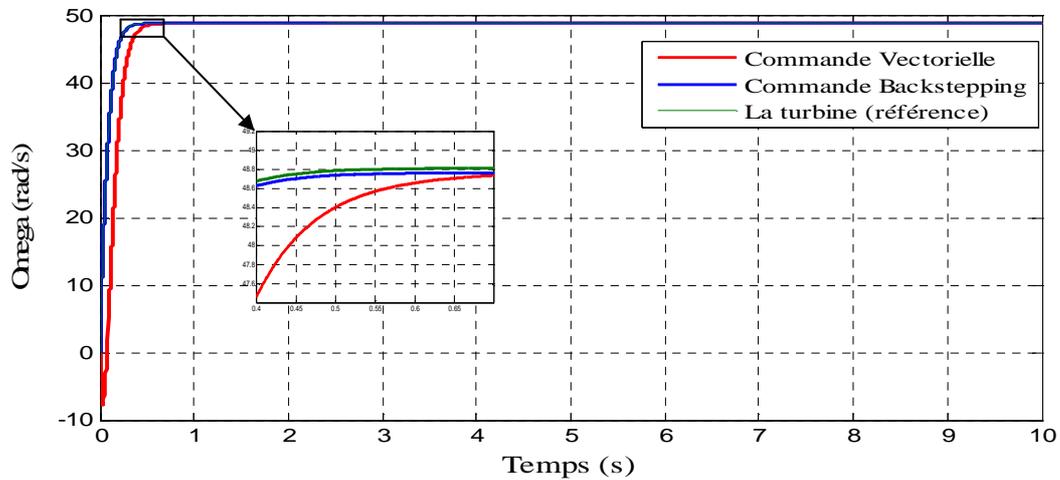


Fig. IV.12: La vitesse de rotation Ω (rad/s).

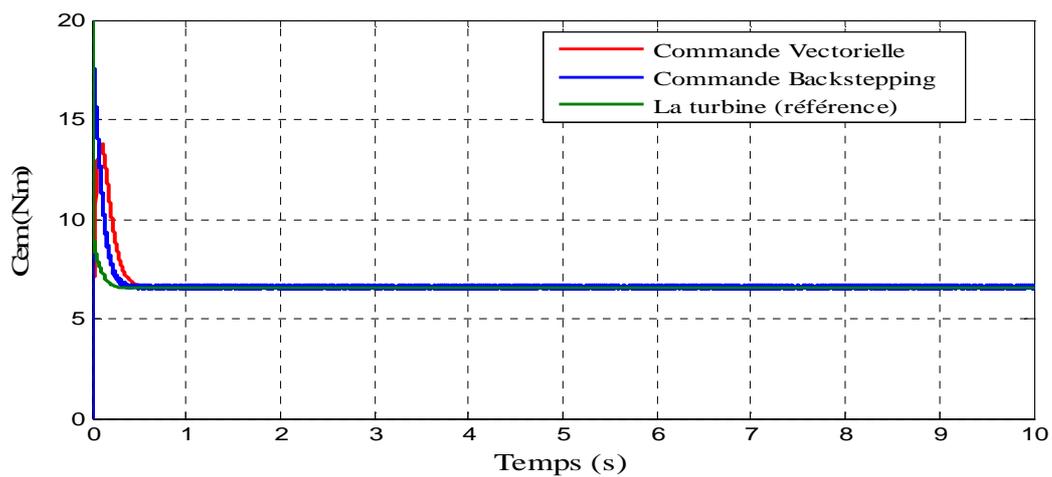


Fig. IV.13: Le couple C_{em} (N.m).

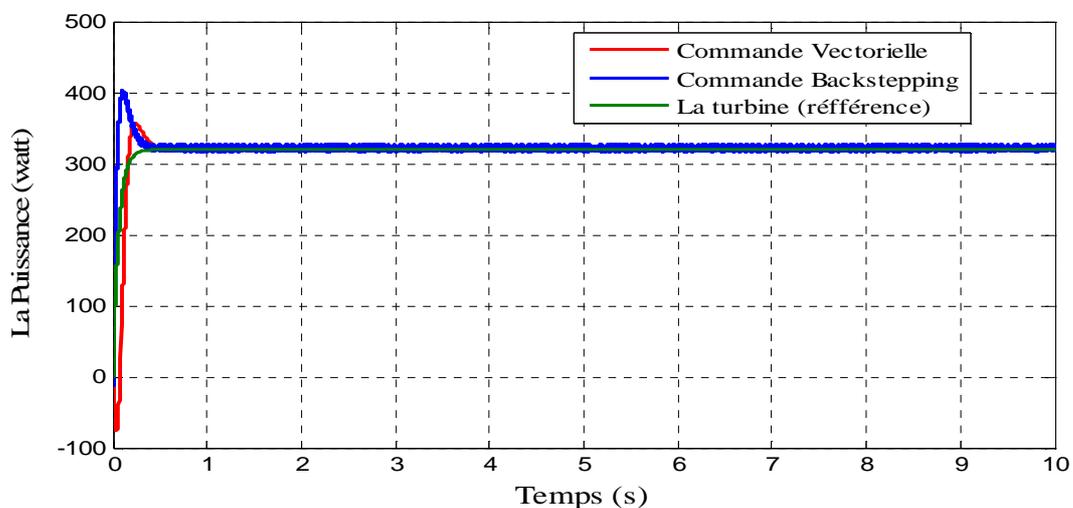


Fig. IV.14 : La Puissance générée en (watt).

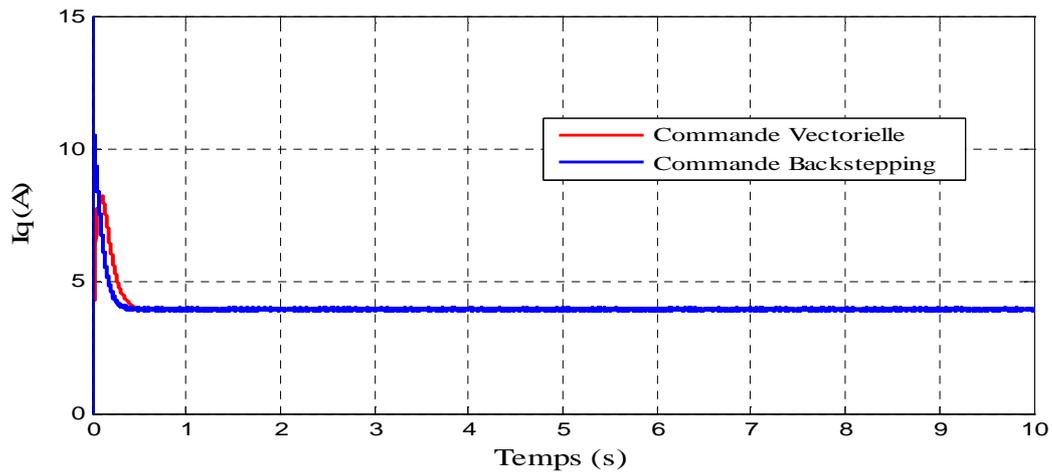


Fig. IV.15: Le courant I_q de la machine en (A).

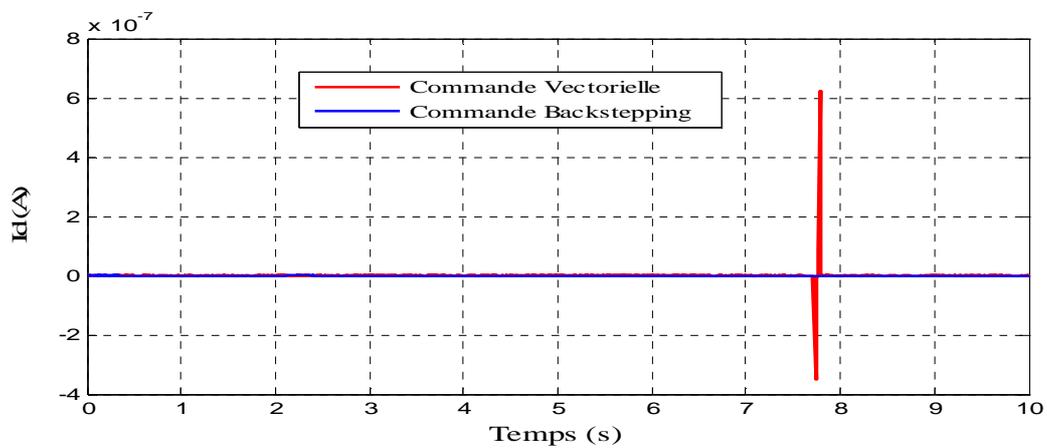


Fig. IV.16: Le courant I_d de la machine en (A).

- Avec de vitesse du vent variable ($V_{moy} = 8$ m/s):

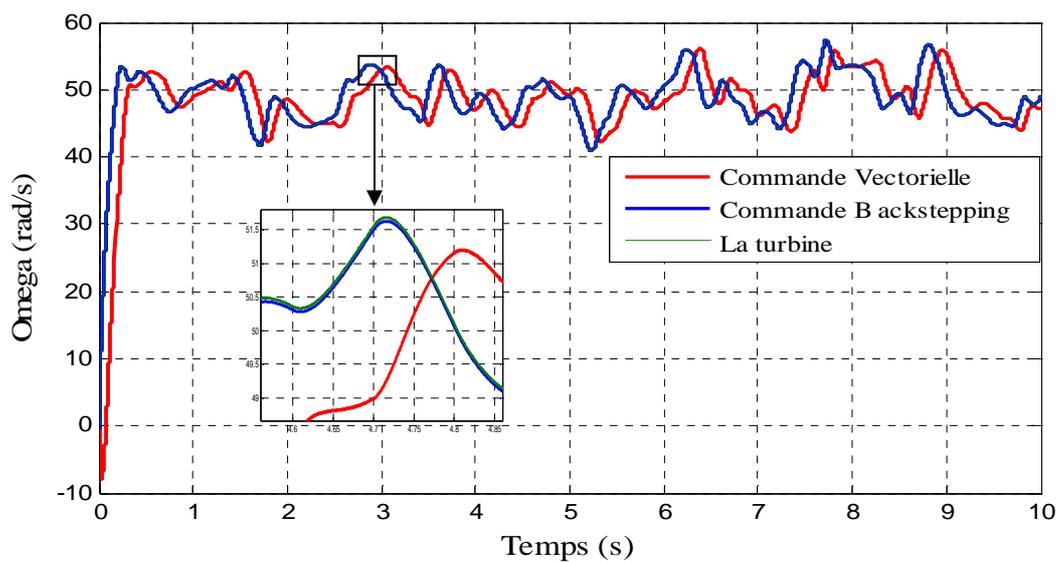


Fig. IV.17: La vitesse de rotation Ω (rad/s).

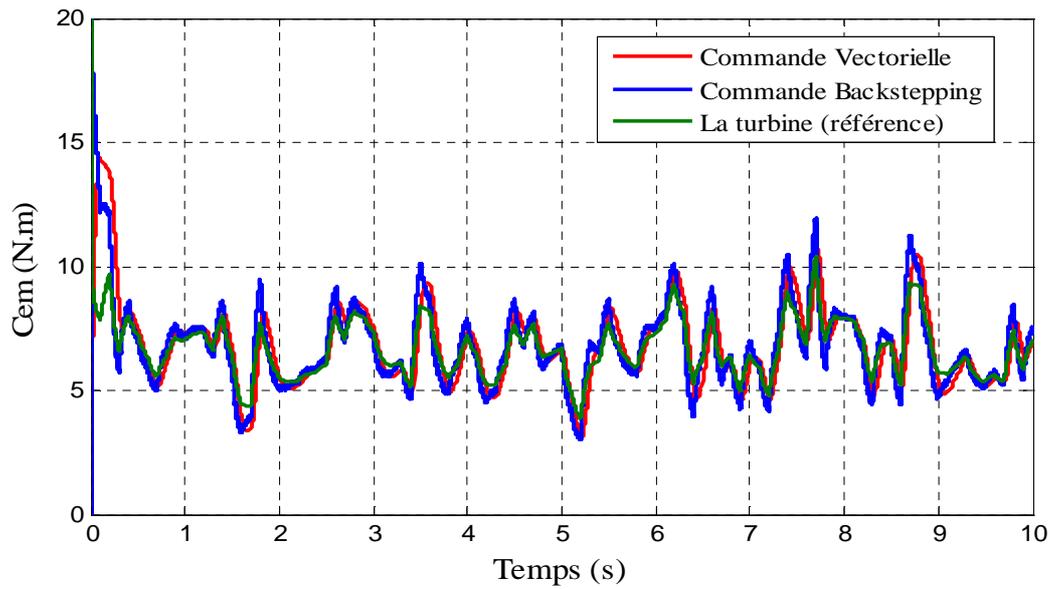


Fig. IV.18: Le couple C_{em} (N.m).

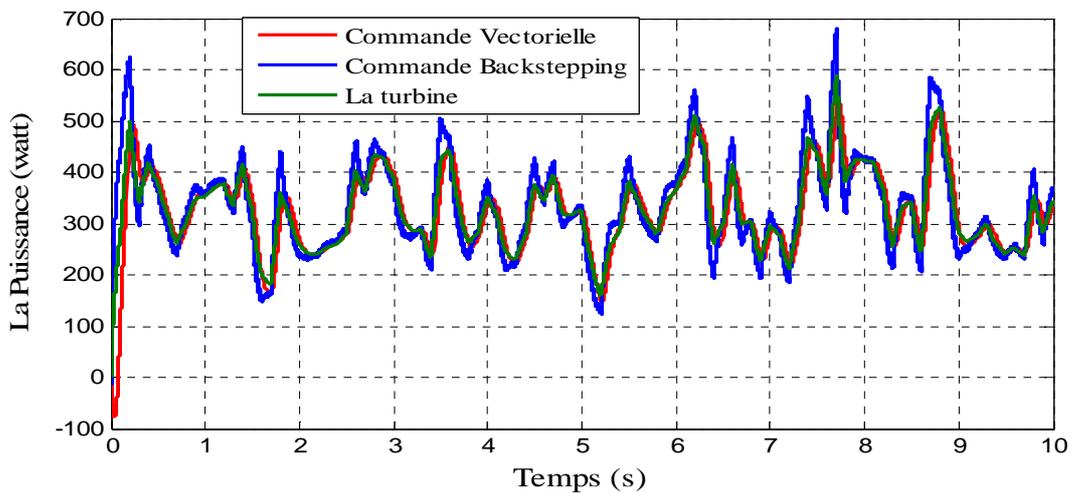


Fig. IV.19 : La Puissance générée en (watt).

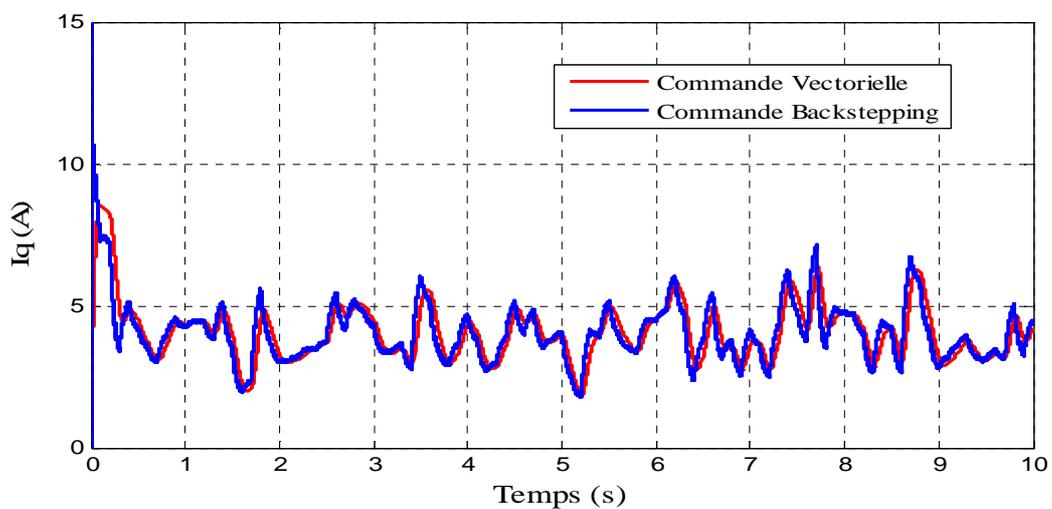


Fig. IV.20: Le courant I_q de la machine en (A).

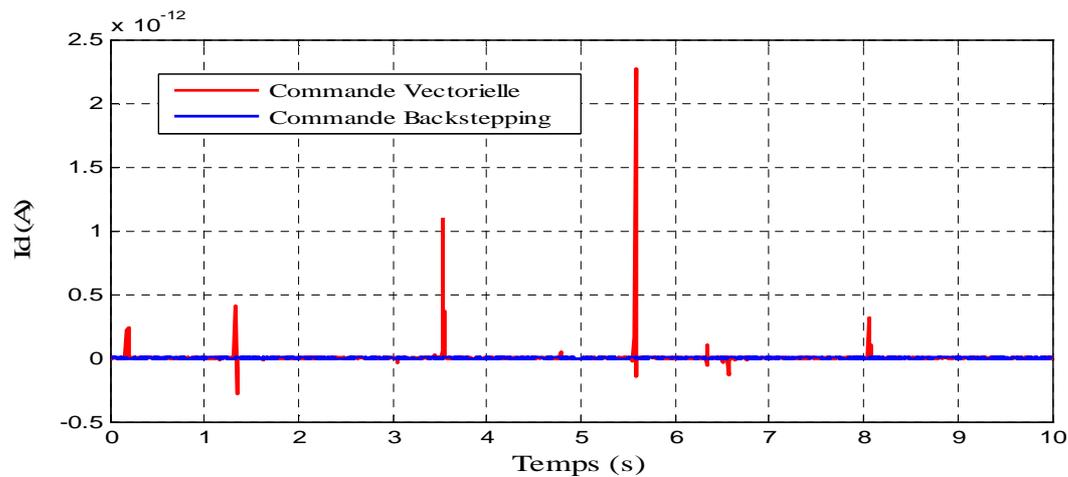


Fig. IV.21: Le courant I_d de la machine en (A).

On remarque que les grandeurs mécaniques et électriques pour les deux commandes sont presque similaires, mais on remarque bien une différence pour le temps de réponse.

A partir de là, on peut affirmer que : si on applique les mêmes conditions sur notre système nous constatons que la commande par Backstepping donne de meilleurs résultats que la commande vectorielle (PI), et les résultats de simulation montrent l'efficacité de la commande. Surtout face aux changements brusques du vent on remarque le bon suivi et la grande robustesse tout en ayant une souplesse appréciable.

On peut directement conclure que parmi les commandes testées, la commande par Backstepping est plus robuste et la meilleure soit pour assurer le découplage entre le flux et le couple de la génératrice, ou pour la bonne adaptation des paramètres qui varie dans le temps de fonctionnement.

IV.7 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude de la technique du Backstepping appliquée aux systèmes du deuxième ordre et du troisième ordre et puis, généralisée au système d'ordre n . Étape par étape, une commande est conçue et une analyse de stabilité est établie. À l'étape finale, une loi de commande globale assurant la stabilité en boucle fermée du système est construite via une fonction de Lyapunov, les erreurs convergent vers zéro et la sortie du système suit sa référence. Les résultats de simulation obtenus en fin du chapitre montrent la robustesse de cette technique.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'objectif principale de cette étude est la commande d'une machine synchrone à aimant permanent dédiée à une éolienne par la méthode de Backstepping, qui est une nouvelle technique récemment apparue et qu'est rapidement rependue dans les applications industrielles pour se faire on a subdivisé ce travail en quatre chapitres :

La première chapitre a traité des généralités sur l'énergie éolienne (définition, historique, avantages et inconvénients). Puis nous avons présenté différents types d'éoliennes existant avec leurs différentes structures à savoir les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal. Puis la comparaison entre les différentes génératrices utilisées dans ce domaine nous a permis de choisir de porter notre étude sur un système basé sur une machine synchrone à aimants permanents MSAP.

Dans le deuxième chapitre, d'abord élaboré un modèle mathématique pour les différents composants de notre chaîne de conversion éolienne. Ensuite on a revu la modélisation des différents composants du système éolien et utiliser ces modèles pour réaliser la stratégie de commande MPPT. Afin de maximiser la puissance produite par la turbine, ainsi nous avons pu avoir un fonctionnement avec un rendement maximal en tenant le coefficient C_p à sa valeur optimale.

À la fin de ce chapitre on a présenté la modélisation des différentes équations (électrique, magnétique, mécanique) régissant le fonctionnement de la MSAP dans le référentiel de Park.

Le troisième chapitre, était consacré à la commande vectorielle de la machine synchrone à aimant permanent pilotée à l'aide d'un convertisseur électronique à commande MLI (machine-convertisseur MLI). Ce convertisseur joue le rôle d'un redresseur à transistors à commutation forcée. Cette combinaison électrique nous a permis d'assimiler la MSAP à une machine à courant continu à excitation séparée. L'analyse des résultats obtenus dans ce chapitre montre clairement un degré d'efficacité acceptable de la régulation choisie qui fait ramener le système à son point optimal après une variation de la vitesse du vent.

Dernier chapitre, nous avons utilisé la commande non linéaire appelée Backstepping. Nous avons présenté l'aspect théorique de cette technique de commande et exposé les étapes permettant le dimensionnement de cette dernière, tout en assurant la stabilité globale du système non linéaire réglé. L'application du Backstepping pour la commande MSAP a conduit à des bons résultats de simulations, ce qui montre l'efficacité de cette technique pour le suivi de la vitesse, du couple et la puissance de référence ainsi que le rejet de perturbation.

Conclusion générale

Finalement, on peut envisager à la lumière de ce travail :

- ✚ Ajouté au système la commande Backstepping adaptative.
- ✚ L'étude d'autres méthodes non linéaires pour la commande d'une GSAP.
- ✚ Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne raccordée au domaine d'application.
- ✚ L'association d'un système de stockage d'énergie.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] : Lethé.M, « Les Renouvelables, enfin » Magazine de l'espace européen de la recherche, Numéro spécial, Avril 2008.
- [2] : Ramli.A. « Contribution à l'amélioration des performances d'un aérogénérateur basse sur une MSAP » mémoire de magistère, option : système électro-énergétique, UNIV A. Mira Bejaia, Algérie, 2010.
- [3] : Senhadji.N, Chalabi.A « Commande du moteur synchrone à aimant permanent par Backstepping » mémoire de master, option : Commande des machines électriques, UNIV A.B.Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2015.
- [4]: John R. Fanchi, « Energy: Technology and directions for the future », Elsevier Academic Press Copyright © 2004.
- [5]: B. Sorensen, « Renewable Energy Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects », Copyright. 2004 by Elsevier Science.
- [6]: « Perspectives d'offre d'énergie », Techniques de l'Ingénieur, BE 8 515 -2005, www.windpower.org.
- [7] : Maghsel S, «Contribution à l'amélioration et la commande d'une turbine éolienne» mémoire de magistère, option : Électrotechnique, UNIV du 20 aout 1955 – Skikda, Algérie, 2012.
- [8] : J. MARTIN « Énergies éoliennes » ; Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie Énergétique pp. B8 585 1- B 8 585 21.
- [9] : N. Mezzai « Etude d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien destiné aux systèmes de pompage d'eau », Thèse de doctorat de l'université A. MIRA Bejaia, Algérie, 2015.
- [10] : Loucif M. : Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, faculté de technologie- Université Abou Bekrbelkïd Tlemcen, 2016.
- [11] : Toual B. : Modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Magister, Université de Batna, Algérie, 2010.
- [12] : H. Camblong, «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Arts et Métiers de Bordeaux, Décembre 2003.
- [13] : P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, « Éoliennes », Techniques de l'Ingénieur, BM 4 640.
- [14] : Hamdi.N, «Amélioration des performances des aérogénérateurs», thèse de doctorat de L'université Constantine I, Option : Modélisation et commande des machines électriques, Constantine, Algérie, 2013.

Bibliographie

- [15] : CHERKAOUI.M, “contribution a la modélisation, à l’Etude et à la commande des Machines application à une machine asynchrone à double alimentation,” Thèse de Doctorat, Polytechnique de lorraine 1990, France.
- [16] : Benhadda.A, Bentifour.M «Commande d’une turbine éolienne à pitch variable basée sur un générateur synchrone à aimants permanents », mémoire de Master, option : Commande de machine électrique, UNIV A.B.Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2017.
- [17] : Bouderbala.A, Labdi.S, «Commande d’une éolienne basée sur la machine asynchrone à double alimentation », mémoire de Master, option : Automatique et systèmes de production, UNIV de Djilali Bounaama, Khemis Miliana,Algérie ,2016.
- [18] : Boyette.A «Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne», Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, France, décembre 2006.
- [19] : Mirecki A. : Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat préparée au Laboratoire d'électrotechnique et d'électronique Industrielle de IENSEEIH, Unité Mixte de Recherche CNRS No 5828, 2005.
- [20] : Poitiers F. : Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne. Machine asynchrone à cage autonome. Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, école polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.
- [21] : Eoliens autonomes, Guide de l'acheteur, Programme d'encouragement aux systèmes d'énergie renouvelables, Ressources naturelles Canada, www.rncan.gc.ca/penser.
- [22] : M. Ivan, « Modélisation et réalisation d'une chaîne de conversion éolienne petite puissance », Laboratoire d'électrotechnique de Montpellier (LEM).
- [23] : METATLA SAMIR «Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA » mémoire de magister de école nationale supérieure polytechnique d'Alger, 2009.
- [24] : Loucif Mourad, «Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur », Thèse de doctorat de l'Université de A.B.Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2016.
- [25] : Mayouf Messaoud, «Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents », Mémoire de magister, option : Energie renouvelables, UNIV de Batna, Algérie, 2008.
- [26] : Guy Cuntty, « Eoliennes et aérogénérateurs, guide de l'énergie éolienne », Edissud, Aix-en-Provence, 2001, www.edisud.com.
- [27] : <http://www.windpower.org/fr/tour/wtrb/comp/index.htm>.

Bibliographie

- [28] : LATRECHE Mohammed Tahar, «Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien», Mémoire de magister, option : Commande Electrique, Université Ferhat Abbas de Setif, Algérie, 2012.
- [29] : Adnane Zaimi, «Optimisation de la commande d'une éolienne A basse de machine synchrone à aimants permanents», Diplôme de L'ingénieur, Conservatoire Nationale des Arts et Métiers, Centre de Maroc, 2014.
- [30] : Hani Alhamed Aldwaihi, «Commande non linéaire fondée sur la platitude d'un système de production éolien», Thèse de doctorat, option : Génie Electrique de l'Université de Bretagne Occidentale, octobre 2013.
- [31] : ROUABHI Riyadh, «Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée», Thèse de doctorat, option : Commande Electrique, UNIV de Batna2, Algérie, 2016.
- [32] : BOUMARAF Farid, «Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle», Thèse de doctorat en Electrotechnique, UNIV de Batna, Algérie, 2014.
- [33] : Zeghoudi.S, «Commande par passivité de LA machine synchrone à aimants permanents», Mémoire de Master, option : Commande des Machines Electriques, Université Abou Bekr- Belkaid – Tlemcen, Algérie, 2015.
- [34] : Annando Fonseca. "Comparaison de machines a aimants permanents pour la traction de véhicules électriques et hybrides". Electric power. Institut National Polytechnique de Grenoble- INPG, 2000. French.
- [35] : Toufik Zidelmal, «Modèle de prédiction et de commande de la machine synchrone à aimants permanents : application dans les aérogénérateurs», Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie, Université du Québec en Abitibi Témiscamingue, École de Génie, AVRIL 2015.
- [36] : Touahri.A, «Application de la DTC à un aérogénérateur Asynchrone double alimentation», mémoire de magister, option : Machines Electriques, L'université Batna 2, 2016.
- [37] : S. EL AIMANI, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension ». Thèse de doctorat, École Centrale De Lille 2004
- [38]: M. Aydin, S. Huang, T. A Lipo "Quality and Comparison of Internai and External Rotor Axil Flux Surface-Magnet Dise Machines", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 53, N° 3, Juin 2006.
- [39] : K.GHEDAMSI, Contribution à la modélisation et la commande d'un convertisseur direct de fréquence. Application à la conduite de la machine asynchrone, Thèse de Doctorat, ENP Alger (Algérie), 2008.
- [40] : A. Abdelli, << Optimisation Multicritères d'une chaine éolienne passive >>, Thèse de Doctorat en Electrotechniques, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007.

Bibliographie

- [41]: Dr. Gary L. Johnson, « Wind Energy Systems », Chapter 4-Wind Turbine Power, Nov, 2001.
- [42]: A. Diop, "Contribution au développement d'un simulateur électromécanique d'aérogénérateurs: Simulation et commande en temps réel d'une turbine de puissance moyenne à angle de calage variable", Thèse de Doctorat de l'Université du Havre, 1999.
- [43]: Nicolas LAVERDURE, «l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires», Thèse de Doctorat, Spécialité : Génie Electrique, Institut national polytechnique de Grenoble, décembre 2005.
- [44]: Mokrane S, «Modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine synchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération», Université du Quebec en Abitibi-Temiscamingue, 2013.
- [45]: Heier S.: Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems. 1998.
- [46]: Tarak.Ghennam ' Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique. Apports des convertisseurs Multi-niveaux au réglage des éoliennes à base de la machine asynchrone à double alimentation.' Thèse de doctorat. Ecole militaire polytechnique Alger. Ecole centrale de Lille - 2011.
- [47]: LOUAR.F, «Modélisation et simulation d'une chaine de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent», Thèse de doctorat, option : Gestion et Qualité de l'Energie Electrique, Université Baji- Mokhtar Annaba, Algérie, 2016.
- [48]: N. Siebert « Développement de méthodes pour la prediction de la production éolienne régionale », thèse de doctorat de l'ecole des mines de Paris, 2008, France.
- [49]: K. Idjdarene, « Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes », Thèse en cotutelle entre l'Université de Bejaia, Algérie et l'Université Lille 1,France, 2010.
- [50]: <http://electronique1.blogspot.com/2011/03/02>.
- [51]: D. Lahouel. Commande Non Linéaire Adaptatif d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents, mémoire de magister, Université de Batna, 2009.
- [52]: Bensmail.S, «Optimisation Et Gestion d'Energie D'un Système Hybride A Energies Renouvelables», thèse de doctorat, Université A.MIRA-BEJAIA, Algérie. 2017.
- [53]: N. Bounasla, « Commande par mode de glissement d'ordre supérieur de la machine synchrone à aimants permanents », Mémoire de Magister, Université de Sétif, 2014.
- [54]: N.Benyahia, K. Srairi, S. M. Mimoune," Commande de la machine asynchrone par orientation du flux rotorique", pp.147-150, N°06, Juin 2005.
- [55]: F. Mudry, «Ajustage des Paramètres d'un Régulateur PID», Note d'application, Ecole d'ingénieurs du Canton de Vaud.

Bibliographie

- [56] : Annane Adel , «Analyse du comportement du moteur synchrone dans les entraînements électriques à vitesse variable». Mémoire de magister, option ELECTROMECHANIQUE , Université d'Annaba, 2009.
- [57] : Amiri.M, Ali Dahmane.O, «Commande vectorielle en vitesse du moteur synchrone à aimants permanents dotée d'un observateur mode glissant», mémoire Master, option : Commande des machines électriques, Université Aboubakr Belkaïd-Tlemcen-Algérie, 2017.
- [58] : Boulahia.A, «Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique», Mémoire Magister, option : Modélisation et Commande des Machines Electriques, Université de Constantine, Algérie, 2009.
- [59] : S. Belakehal*, A. Bentounsi, M. Merzoug et H. Benalla, «Modélisation et commande d'une génératrice Synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne», Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°1 (2010) 149 – 161.
- [60] : A.S. Toledo, 'Commande Directe et Observation des Convertisseur de Puissance: Application à l'Onduleur de Tension Triphasé', Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale de l'Institut National Polytechnique, Grenoble, 2000.
- [61] : Communication, 'Les Moteurs Synchrones et leurs Applications Industrielles', Journées de l'Enseignement, de l'Electrotechnique et de l'Electronique Industrielle, SEE-MAFPEN, Gif-sur-Yvette, Mars 1995.
- [62] : Bardadi.B.M, «Identification des paramètres d'une machine synchrone à aimant permanent en vue d'une intégration dans des simulateurs en temps réel», Mémoire Magister, Option : Composant et Système de la Microélectronique Avancée, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Algérie, 2015.
- [63] : M.M.M.Ezzat, «Commande non linéaire sans capteur de la machine synchrone à aimants permanents», Thèse de Doctorat, L'École Centrale de Nantes, 2011.
- [64] : Badraoui.M, Bereksi.R.M, «Etude et modélisation du moteur synchrone simple et double étoile avec application de la commande backstepping à la machine synchrone», Mémoire Master, option : Commande des machines électriques, Université Abou BekrBelkaïd – Tlemcen, Algérie, 2016.
- [65] : **Bekkouche.B, Aber.B**, «Commande par Backstepping d'un MSAP sans capteur mécanique en utilisant l'observateur de Luenberger», Mémoire Master, Automatisme et contrôle des systèmes industriels, Université Dr.Tahar Moulayde Saïda, Algérie, 2017.
- [66]: K.Paponpen and M.Konghirum “ Speed Sensorless Control Of PMSM using An Improved Sliding Mode Observer WithSigmoid function” ECTI- Vol5.NO1 February2007.
- [67]: Shahnazari, M.; Vahedi, A. “Improved Dynamic Average Modeling of Synchronous Machine with DiodeRectified Output” Vol 4‘issue6) pg 1248-1258 Nov-Dec 2009.
- [68]: A. Lagrioui, H.Mahmoudi « Nonlinear Tracking Speed Control for the PMSM using an Adaptive Backstepping Method »ICEED'08-Tunisia.

Bibliographie

[69]: Backstepping Adaptive Control Of Permanent Magnet Synchronous Motor Drive
N.Goléa, A.Goléa and M.Kadjouj EE Institute, Oum El-Bouaghi University, 04000 Oum El-
Bouaghi, Algeria, 2004.

Annexes

Paramètres de générateur éolien [9] :

- **Caractéristique du vent :**

Vitesse du vent moyenne: $V_{\text{moy}} = 8 \text{ m/s}$;

Masse volumique de l'air : $\rho = 1.225 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$.

- **Paramètres de la turbine :**

Puissance nominale : $P_n = 1 \text{ kW}$;

Rayon de la turbine : $R_t = 1.05 \text{ m}$;

Vitesse du vent maximale: $V_{\text{vmax}} = 12 \text{ tr/mn}$;

Vitesse du vent minimal: $V_{\text{vmin}} = 3 \text{ tr/mn}$;

Moment d'inertie : $J = 0.021 \text{ Kg. m}^2$;

Frottement : $f = 0.001 \text{ N.s/rad}$;

Le gain de multiplicateur $G = 1$;

- **Caractéristique de la génératrice synchrone à aimant permanent [9]**

R_s	0.5Ω
L	0.016 H
φ_f	0.148 Wb
P	17

Paramètres des régulateurs

- **La commande vectorielle**

- Le courant I_d :

$$K_p = 5$$

$$K_i = 156.25$$

- Le courant I_q :

$$K_p = 5$$

$$K_i = 156.25$$

- La vitesse Ω :

$$K_p = 0.24525172$$

$$K_i = 0.7272655$$

- **La commande Backstepping**

$$K_1 = 80000$$

$$K_2 = 18000$$

$$K_3 = 5$$